

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
INTERNATIONAL CONFERENCE **В Л И Я Н И Е**
КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ЧЕЛОВЕКА
В КОСМОСЕ И НА ЗЕМЛЕ 4-8 ИЮНЯ/JUNE 2012
SPACE WEATHER EFFECTS ON HUMANS
IN SPACE AND ON EARTH ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
SPACE RESEARCH INSTITUTE

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

1

Под редакцией

вице-президента РАН
академика

А. И. Григорьева
и академика РАН
Л. М. Зелёного

В двух томах

МОСКВА
2013

Space Weather Effects on Humans: in Space and on Earth Proceedings of the International Conference

Space Research Institute, Moscow, Russia, June 4–8, 2012, Ed. A. I. Grigoriev, L. M. Zeleny

In two volumes

Volume 1

During the last thirty years there has been steady progress in our understanding of the influence that space weather has on the state of human health both in Space and at Earth. This development is mainly based on research conducted on humans onboard space stations and spacecrafts, as well as on ground based observations and experimental studies simulating conditions in space. This interdisciplinary field of research requires a wide exchange of expertise in various topics. Only with a global approach it will be possible to establish a mutual understanding, in regard to defining the current state of this research problem as well as identifying what should be pursued in future research activities.

Main Topics of Conference

1. Space Weather and its role in defining the Local Environment. Physical factors and their effects (e.g. solar and geomagnetic activity, interplanetary disturbances, galactic cosmic rays).
2. Space weather and Human health on Earth. Laboratory investigations and natural observations. Combined influence of space and terrestrial weather on biological objects and sick and healthy people. Health risks. Space weather biotropic effects and its role in human survival.
3. Assessment and paths of risks reduction of diseases caused by the impact of weather and climatic and environmental factors in a changing climate.
4. Space Weather and Human health in Space. Human habitation in stress situation associated with weightlessness, combined with additional risks (e.g. increased radiation, weakening of the influence of Earth's magnetic field, long duration isolation in limited space on stations etc.). Ground based laboratory studies, in particular Roscosmos – ESA project MARS-500.

Keywords: space weather, geomagnetic field, solar activity, cosmic rays, climate, radiation load, human health on the Earth, human health in Space.

Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле

Труды Международной конференции

ИКИ РАН, Москва, Россия, 4–8 июня 2012 г. Под ред. А. И. Григорьева, Л. М. Зелёного

В двух томах

Том 1

В последние тридцать лет наши знания о влиянии космической погоды на состояние здоровья людей на Земле и в Космосе получили существенное развитие. Развитие это опиралось главным образом на исследования в космосе на орбитальных станциях и космических аппаратах, на наземные наблюдения и экспериментальные исследования, имитирующих многофакторные условия в космическом пространстве. Эта междисциплинарная область нуждается в широком обмене мнениями между специалистами разного профиля, и определении основных направлений дальнейших исследований.

На конференции обсуждались следующие темы:

1. Космическая погода и ее роль в формировании свойств локальной окружающей среды. Физические факторы и их эффекты (солнечная и геомагнитная активность, межпланетные возмущения, галактические космические лучи и т. д.).
2. Космическая погода и здоровье человека на Земле. Лабораторные исследования и натурные наблюдения. Комбинированное воздействие космической и земной погоды на биологические объекты и здоровых и больных людей. Группы риска. Биотропность космической погоды, и ее роль в выживании человека.
3. Оценка и пути снижения рисков заболеваний, обусловленных влиянием погодно-климатических и экологических факторов в условиях изменяющегося климата.
4. Космическая погода и здоровье людей в Космосе. Здоровье людей в стрессовых условиях, связанных с невесомостью и другими факторами (возросшей радиацией, ослаблением влияния магнитного поля Земли, длительной изоляцией в ограниченном пространстве станции и т. д.). Наземные лабораторные исследования.

Ключевые слова: космическая погода, геомагнитное поле, климат, солнечная активность, космические лучи, радиационная опасность, здоровье людей на Земле, здоровье людей в космосе.

Редактор: *Корниленко В. С.*

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Дизайн обложки: *Захаров А. Н.*

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

Электронная версия сборника размещена на сайте ИКИ РАН: <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
-------------------	---

Том 1

Часть 1

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ЕЁ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ ЛОКАЛЬНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

<i>Кузнецов В. Д.</i> Солнечные источники космической погоды	11
<i>Обридко В. Н.</i> Циклы солнечной активности: состояние проблемы, основные механизмы, прогноз	28
<i>Ishkov V. N.</i> Solar Geoeffective Phenomena: Action on the Environment Space and the Possibility of the Forecast	46
<i>Застенкер Г. Н.</i> Некоторые новые свойства солнечного ветра, найденные на основе измерений с высоким временным разрешением	65
<i>Xystouris G., Sigala E., Mavromichalaki H.</i> An analysis of the High-Speed Solar Wind Streams activity during solar cycle 23: Sources of radiation hazards in Geospace	73
<i>Дорман Л. И.</i> Космические лучи как фактор и инструмент для предсказания влияния космической погоды на биосферу	92
<i>Miroshnichenko L. I.</i> Cosmic Rays and Evolution of the Biosphere: Search for New Approaches	110
<i>Панасюк М. И.</i> Тяжёлые ядра в космосе — источник радиационной опасности	137
<i>Клейменова Н. Г.</i> Пулсации в геомагнитном поле как важный биотропный фактор космической погоды	163

Том 1

Часть 2

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ЗДОРОВЬЕ ЛЮДЕЙ В КОСМОСЕ

<i>Григорьев А. И.</i> Организм и среда в космическом полёте	187
<i>Моруков Б. В., Суворов А. В., Балаковский М. С., Васильева Г. Ю.</i> Моделирование пилотируемых космических полётов на другие планеты (на примере проекта МАРС-500)	189
<i>Ушаков И. Б., Петров В. М., Шафиркин А. В.</i> Специфика применения радиационного риска при оценке опасности воздействия космической радиации в полёте	200
<i>Dachev T. P.</i> Analysis of the Space Radiation Doses in the Extra Vehicular Environment of the International Space Station	223
<i>Труханов К. А.</i> Космические проблемы магнитобиологии	249
<i>Kubančák J., Ploc O., Ambrožová I., Kovář I., Kudela K., Langer R., Spurný F.</i> Long-term monitoring of cosmic radiation on-board aircraft with the silicon spectrometer Liulin — comparison with neutron monitor data	269

<i>Лишневский А. Э., Панасюк М. И., Нечаев О. Ю., Бенгин В. В., Петров В. М., Волков А. Н., Лягушин В. И., Николаев И. В.</i>	
Вариации радиационной обстановки на Международной космической станции за период 2001–2011 гг. по данным системы радиационного контроля.	276
<i>Ambrožová I., Shurshakov V. A., Toloček R. V., Pachnerová Brabcová K., Kubančák J., Vlček B., Spurný F.,</i>	
Monitoring onboard of ISS with passive detectors — 5 years experience	284

Том 1

Часть 3

ОЦЕНКА И ПУТИ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ЗАБОЛЕВАНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

<i>Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Токаревич Н.</i>	
Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых регионах России	295
<i>Анисимов В. Н., Виноградова И. А., Букалев А. В., Панченко А. В., Попович И. Г., Семенченко А. В., Забежинский М. А.</i>	
Роль светового режима и мелатонина в развитии возрастной патологии	316
<i>Макоско А. А., Матешева А. В.</i>	
Медико-экологическое страхование как форма социально-экономической адаптации к неблагоприятному влиянию окружающей среды	324
<i>Матешева А. В., Макоско А. А.</i>	
Долгосрочный прогноз риска для здоровья вследствие загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата.	333
<i>Pustil'nik L. A., Yom G. Din</i>	
Does Space Weather Influence on Observed Indices of Agricultural Markets? Part 1. Necessary Conditions and Possible Scenarios.	346
Part 2. Sources of Data, Methods of Analysis and Results of Application to Medieval Europe, Modern Usa and Famines in Iceland	358
<i>Щербань Э. А., Заславская Р. М., Тейблум М. М.</i>	
Влияние метеорологической и геомагнитной активности на гемодинамику больных артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца и поиск фармакологической защиты	374
<i>Лушников А. А., Загайнов В. А., Любовцева Ю. С., Гишиани А. Д.</i>	
Космическая погода и атмосферные наноаэрозоли	396
<i>Kharitonov A. L., Kharitonova G. P.</i>	
Communication of Regularities of Differential Rotation of Deep Physical Covers of the Sun, Earth, Other Planets and Regularities of Biological and Atmospheric Ash Value of Planets.	411
<i>Котельников С. Н., Олюнин Э. А., Манаков М. А.</i>	
Влияние жаркой погоды, дыма от лесных пожаров и приземного озона на здоровье населения в Вятских полянах летом 2010 г.	421
<i>Lazutin L. L.</i>	
Shift of the Earth's Magnetic Pole: How it Will Influence on Technosphere and Biosphere.	429
<i>Любовцева Ю. С., Макоско А. А., Воронова Е. В., Пятыхина О. О., Шibaева А. А., Красноперов Р. И.</i>	
Медицинская геоинформационная система России в условиях изменяющегося климата	435
<i>Марков А. Л.</i>	
Вегетативная регуляция кровообращения и состояние миокарда у мужчин Европейского Севера России при длительном мониторинге и разной активности геомагнитного поля.	450

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Москве с 4 по 8 июля 2012 г. происходила Международная конференция «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле», организованная Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) совместно с другими институтами Российской академии наук, Академией медицинских наук, Российским университетом дружбы народов, Проблемным советом академии наук «Солнце – Земля», Проблемной комиссией Российской академии медицинских наук по хронобиологии и хрономедицине, а также COST (Европейской кооперацией по науке и технологиям).

На конференции обсуждались следующие темы:

- космическая погода и её роль в формировании свойств локальной окружающей среды;
- физические факторы и их эффекты (солнечная и геомагнитная активность, межпланетные возмущения, галактические космические лучи и т.д.);
- космическая погода и здоровье человека на Земле, лабораторные исследования и натурные наблюдения, комбинированное воздействие космической и земной погоды на биологические объекты здоровых и больных людей; группы риска; биотропность космической погоды и её роль в выживании человека;
- оценка и пути снижения рисков заболеваний, обусловленных влиянием погодно-климатических и экологических факторов в условиях изменяющегося климата;
- космическая погода и здоровье людей в космосе; здоровье людей в стрессовых условиях, связанных с невесомостью и другими факторами (возросшей радиацией, ослаблением влияния магнитного поля Земли, длительной изоляцией в ограниченном пространстве станции и т.д.); наземные лабораторные исследования (в частности, проект МАРС-500).

Конференция собрала более 160 учёных различных специальностей из 11 стран мира (США, Японии, Германии, Австрии, Чехии, Болгарии, Греции, Индии, Венгрии, Израиля, Грузии), трёх стран СНГ, 14 городов России.

Следует отметить, что конференции, в той или иной степени посвящённые перечисленным выше вопросам, достаточно регулярно проводятся у нас в стране и за рубежом на протяжении последних десятилетий. С 1986

по 1993 г. в Институте биофизики РАН (Пушино Московской области) по инициативе проф. С. Э. Шноля были проведены 4 Международных симпозиума «Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды». С 1995 г. каждые два года в Крыму по инициативе проф. Б. М. Владимирского проходят Международные конференции «Космос и биосфера», на которых рассматривается очень широкий круг вопросов из области солнечно-биосферных связей. В 2004 г. в Пушино совместно ИКИ РАН и Институтом теоретической и экспериментальной биофизики (ИТЭБ РАН) был проведён междисциплинарный семинар «Биологические эффекты солнечной активности». Упомянутый выше COST провёл в Бельгии в ноябре 2012 г. уже 9-ю конференцию — «Неделя космической погоды» ESWW9 (COST ES0803).

Конференция в ИКИ РАН отличалась от своих предшественников, во-первых, более глубокой и детальной проработкой вопросов исследования факторов космической погоды именно в плане применения накопленных знаний к области гелиобиологии. Во-вторых, из широкого спектра проявлений влияния космической погоды на биосферу были специально отобраны и подробно рассмотрены вопросы влияния этих факторов на организм человека, от возможных механизмов воздействия на атомном и молекулярном уровне до изменения функционального состояния и риска развития сердечно-сосудистых катастроф. В отличие от предыдущих конференций в ИКИ РАН обсуждались также негативные последствия воздействия космической погоды на человека в космосе — т.е. в современных средствах космической техники, а также на Земле, в сочетании с дополняющими её влияниями земной погоды и развивающихся климатических изменений.

Авторы статей этого сборника — учёные разных специальностей — старались осветить понятно и лаконично для широкого читателя предмет своих исследований, для того чтобы он был доступен междисциплинарному сообществу (некоторые доклады даны на языке оригинала).

Следует подчеркнуть, что мы всё-таки имеем дело в нашей междисциплинарной области с явлениями, которые пока не получили удовлетворительного теоретического объяснения. Как отмечает проф. В. Н. Бинги, «Проблема связана с парадоксальностью биологического действия слабых низкочастотных магнитных полей, которые по энергии далеко не сопоставимы с характерной энергией биохимических превращений. Из-за этого вопрос о самом существовании такой проблемы вызывает неоднозначную реакцию значительной части научного сообщества — несмотря на громадное число экспериментальных свидетельств».

Термин «космическая погода» (**Space Weather**) получил широкое распространение ещё в 90-х гг. XX в. Он охватывает наиболее важные аспекты раздела научных знаний о солнечно-земных связях — совокупности взаимодействия гелио- и геофизических явлений. Эта наука занимается исследованиями влияния солнечной активности через межпланетную среду на Землю: её магнитосферу, ионосферу, атмосферу.

Строго говоря, к космической погоде относится динамическая (с характерными временами — сутки и менее) часть солнечно-земных связей: вариации магнитосферы, ионосферы и атмосферы, индуцированные солнечной активностью. По аналогии с земными процессами более стационарная часть солнечно-земных связей называется космическим климатом.

В практическом применении к тематике космической погоды относят прогноз солнечной и геомагнитной активности, исследования воздействия солнечных факторов на технические системы и земную биосферу, включая человеческую популяцию.

Основоположником исследований влияния космической погоды на биологические объекты и человеческую популяцию гелиобиологии был наш соотечественник А.Л. Чижевский (он впервые и ввёл термины «космическая погода» и «гелиобиология»). Им был собран, обработан и интерпретирован богатейший экспериментальный материал, позволивший сделать вывод о существовании внешних факторов воздействия на Землю, связанных со свойствами околоземного пространства в целом и процессами на Солнце, вызывающими глобальные изменения в биосфере. Чижевским отмечалась, в том числе, выраженная цикличность различных погодных аномалий с периодами, близкими к 11- и 22-летним периодам солнечной активности. Эта цикличность отражалась и на объектах живой природы.

Биологические объекты за время своей эволюции должны были адаптироваться к этим ритмам и интегрировать их периоды во временную структуру своих клеток, органов и организмов в целом, преобразовав в эндогенные, т.е. собственные ритмы, в принципе синхронизированные с внешними ритмами среды обитания, так же как суточные ритмы освещённости и температуры, обусловленные вращением Земли, образовав всем хорошо известные биологические ритмы, например, сна и бодрствования. Возмущения, генерированные солнечной активностью, нарушают обычное течение этих собственных ритмов и создают десинхронизацию с внешними условиями или адаптивную стресс-реакцию.

В сущности, реакция человеческого организма на возмущения в среде обитания представляет собой нарушения в механизмах регуляции внутренней структуры согласования ритмов всех уровней организма. Основной мишенью воздействия при этом оказываются сердце, сердечно-сосудистая и нервная системы, система крови: изменяется частота сердечных сокращений, возникают аритмии, происходят скачки артериального давления, увеличивается вязкость крови, агрегация эритроцитов, наблюдается замедление кровотока в капиллярах. Фактически наблюдаются реакция по типу адаптационного стресса и изменения сосудистого тонуса, по характеру сходные с реакцией на метеорологические изменения. Именно поэтому такие эффекты усиливаются в том случае, если они накладываются на изменения метеорологической обстановки. Геомагнитные бури, например, сказываются на выработке организмом гормона мелатонина — регулятора суточных ритмов сна и бодрствования.

Мнение о зависимости самочувствия от геомагнитных бурь уже твёрдо устоялось в общественном сознании. Сегодня оно подтверждается и статистическими, и клиническими исследованиями. Установлено, что число обострений сердечно-сосудистых заболеваний возрастает после магнитной бури. В последние тридцать лет знание о влиянии космической погоды на состояние здоровья человека получило существенное развитие. Оно опиралось в том числе на исследования, выполненные в космосе с помощью пилотируемых орбитальных станций и автоматических космических аппаратов, а также на наземные наблюдения и эксперименты, имитирующие многофакторные условия в космическом пространстве.

Эта междисциплинарная область знания, несомненно, нуждается в широком обмене мнениями между специалистами разного профиля и определении основных направлений дальнейших исследований. Насколько жизнь на Земле и здоровье человека зависят от Солнца? Что происходит с климатом планеты и как на него влияет космос? Можно ли предугадать катастрофы и погодные катаклизмы? На эти и многие другие вопросы можно будет получить ответ в сборнике трудов Международной конференции «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле».

Том 1

Часть 1

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ЕЁ РОЛЬ
В ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ
ЛОКАЛЬНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

СОЛНЕЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В. Д. Кузнецов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, Россия, e-mail: kvd@izmiran.ru

Даётся обзор основных явлений солнечной активности, которые ответственны за возмущения околоземного космического пространства и формирование космической погоды. Такие спорадические явления солнечной активности как вспышки и выбросы массы, высокоскоростные потоки солнечного ветра и ударные волны воздействуют на околоземное космическое пространство, вызывая геомагнитные бури и сопутствующие эффекты, изменения в состоянии ионосферы и верхних слоёв атмосферы, а также изменения в среде обитания человека.

Приводится описание наиболее характерных факторов космической погоды, обусловленных солнечной активностью, и их воздействий на различные сферы человеческой деятельности.

В аспекте прогноза космической погоды и её воздействий на Землю делается акцент на нерешённые проблемы, связанные с изучением механизма солнечного цикла как основного модулятора общего уровня возмущённости околоземного космического пространства и как основы для разработки методов предсказания амплитуды и длительности предстоящих циклов, а также на проблемы прогноза наиболее мощных проявлений солнечной активности — вспышек и выбросов, обладающих наибольшей геоэффективностью.

ВВЕДЕНИЕ

Человек и жизнь на Земле не отделимы от Солнца. Сегодня само Солнце и система Солнце—Земля, в которой возникла и продолжается жизнь, находятся в устойчивом динамическом состоянии с характерным временем в миллиарды лет. Солнечная активность вызывает возмущения в системе Солнце—Земля, в результате чего околоземное космическое пространство (магнитосфера, ионосфера, атмосфера) и среда обитания человека непрерывно изменяются относительно некоторого равновесного состояния. Иногда такие изменения носят экстремальный характер, создавая опасность для человека и его деятельности.

«Космическая погода» описывает состояние системы Солнце—Земля и имеет дело с физическими условиями на Солнце и в солнечном ветре, магнитосфере, ионосфере и атмосфере, которые могут влиять на состояние здоровья человека, его жизнь и деятельность на Земле и в космосе. Сегодня исследования космической погоды и её влияния на человека и различные сферы человеческой деятельности востребованы временем, они ведутся весьма активно, и на их основе делаются прогнозы, необходимые на практике — в медицине, космонавтике, энергетике и других сферах деятельности.

СОЛНЕЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И ЕЁ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Основные источники космической погоды связаны с Солнцем и его активностью (рис. 1). Имеются подробные изложения современного понимания ключевых аспектов космической погоды [Кузнецов, 2012; Bothmer, Daglis, 2007;

Severe Space..., 2009; Solar dynamics..., 2007], которые непрерывно уточняются по результатам космических и наземных исследований.

Воздействующими агентами солнечной активности, и, соответственно, источниками космической погоды являются электромагнитное излучение Солнца, энергичные частицы и потоки солнечной плазмы с магнитным полем (табл. 1). Эти воздействующие на Землю агенты имеют различные временные и амплитудные характеристики. Рисунок 2 иллюстрирует многообразие физических явлений космической погоды, которые происходят в разных геосферах — магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли.

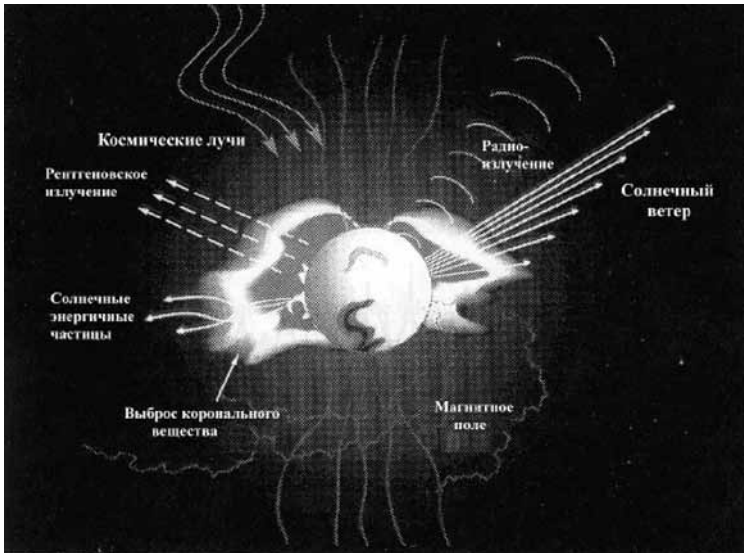


Рис. 1. Солнечная активность — основной источник космической погоды (адаптировано из [Lanzerotti et al., 1999])

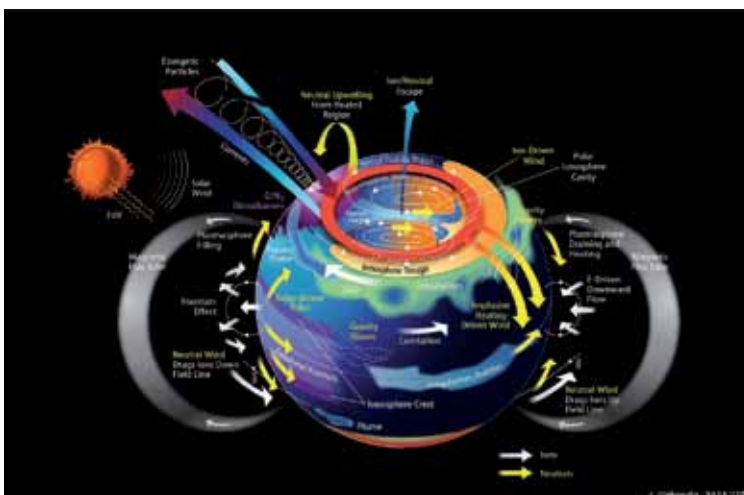


Рис. 2. Многообразие физических явлений космической погоды в околоземном космическом пространстве (J. Grabowsky/NASA/GSFC)

Таблица 1. Солнечные источники космической погоды

Временные и амплитудные характеристики	Источники		
	Электромагнитное излучение (от радио- до гамма-)	Частицы (корпускулярное излучение)	
		энергичные частицы	потоки плазмы с магнитным полем
Стационарные (медленно меняющиеся)	Солнечный спектр (фотосфера, хромосфера, корона)	Отсутствуют или малы	Солнечный ветер (медленный и быстрый)
Спорадические (от секунд до суток)	Активные области, вспышки, транзитные явления	Вспышки, ударные волны, магнитное пересоединение	Выбросы массы, ударные волны
Экстремальные (по амплитуде)	Рентгеновские вспышки	Большие вспышки (протонные события, GLE-события)	Выбросы массы

Стационарные источники космической погоды

Такие источники представляют собой медленно меняющиеся потоки солнечного излучения и солнечного ветра, которые, с известной долей условности, можно отнести к спокойному Солнцу.

Солнечное электромагнитное излучение

Постоянная составляющая солнечного излучения — это спектр полного излучения Солнца с максимумом в оптическом диапазоне (рис. 3). Солнечное излучение пронизывает все оболочки Земли, доходит до поверхности, являясь источником самой жизни. Коротковолновая часть спектра поглощается в различных слоях атмосферы, в длинноволновой части заметную роль играют полосы поглощения излучения различными молекулами, между которыми существуют узкие полосы пропускания в ИК-диапазоне (рис. 4).

Биотропность солнечного излучения (биотропная часть спектра показана между оптическим и УФ-диапазоном) определяется не только изменениями его интенсивности, если иметь в виду изменения освещённости день — ночь, влияние облаков и альbedo, разные широты на Земле и т. д., но и изменениями спектрального состава излучения, который связан с изменением свойств пропускания атмосферы, например, при образовании озоновых дыр и других аномалий атмосферного состава. Интегральное излучение по всему спектру обеспечивает плотность потока излучения у Земли («солнечная постоянная») 1367 Вт/м^2 . Общая мощность солнечного излучения, падающего на Землю, составляет около $1,73 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$, что намного превышает энергетическую мощность всех других источников энергии от Солнца. Для сравнения энергетическая мощность солнечного ветра, падающего на Землю (диск радиуса Земли), составляет всего около 10^{13} Вт . Интегральный поток солнечного излучения очень незначительно меняется с солнечным циклом — около 0,1 %.

На эти вариации влияют яркие факелы и тёмные пятна на поверхности Солнца [Lean et al., 2005]. Сопоставление хода долговременных вариаций величины солнечной постоянной и числа пятен показывает, что за время порядка

месяца Солнце испускает больше энергии не при минимальном, а именно при максимальном числе пятен, хотя сами изменения интегрального потока ничтожны. В рентгеновской области спектра поток излучения сильно меняется с фазой солнечного цикла — в сотни раз, от максимума к минимуму цикла (рис. 5), что связано с вариациями в цикле напряжённости магнитного поля и числа солнечных пятен, влияющих на нагревные процессы в активных областях солнечной атмосферы. Так, в диапазоне 2...30 Å изменение составило около 100 в период между максимумом 1992 г. и минимумом 1996 г.

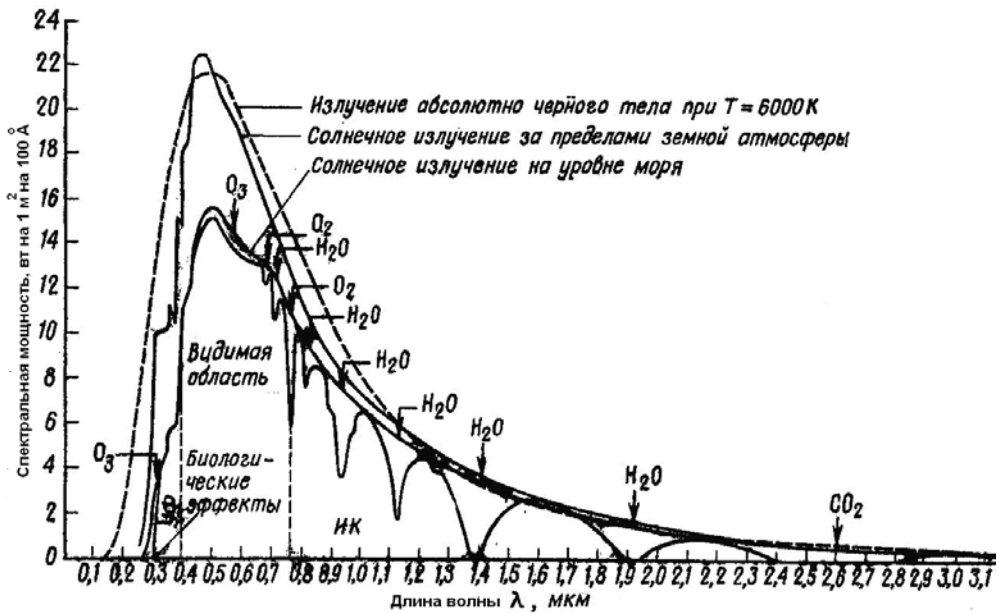


Рис. 3. Спектр солнечного излучения у орбиты Земли и после прохождения через земную атмосферу [Гибсон, 1977]

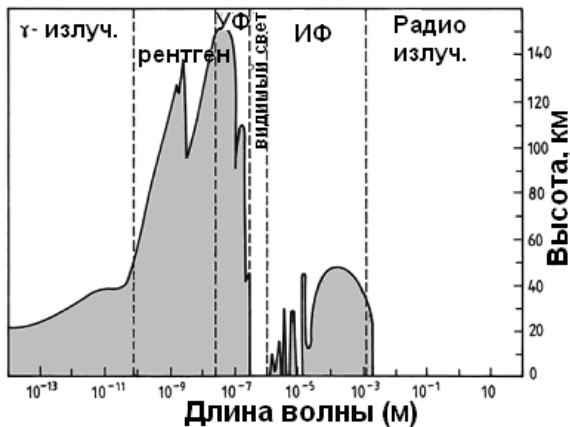


Рис. 4. Пропускание электромагнитного излучения земной атмосферой. Заштрихованные области показывают высоту над поверхностью Земли, где излучение поглощается на 50 % от его первоначальной интенсивности [Nicolson, 1982; Stix, 2004]

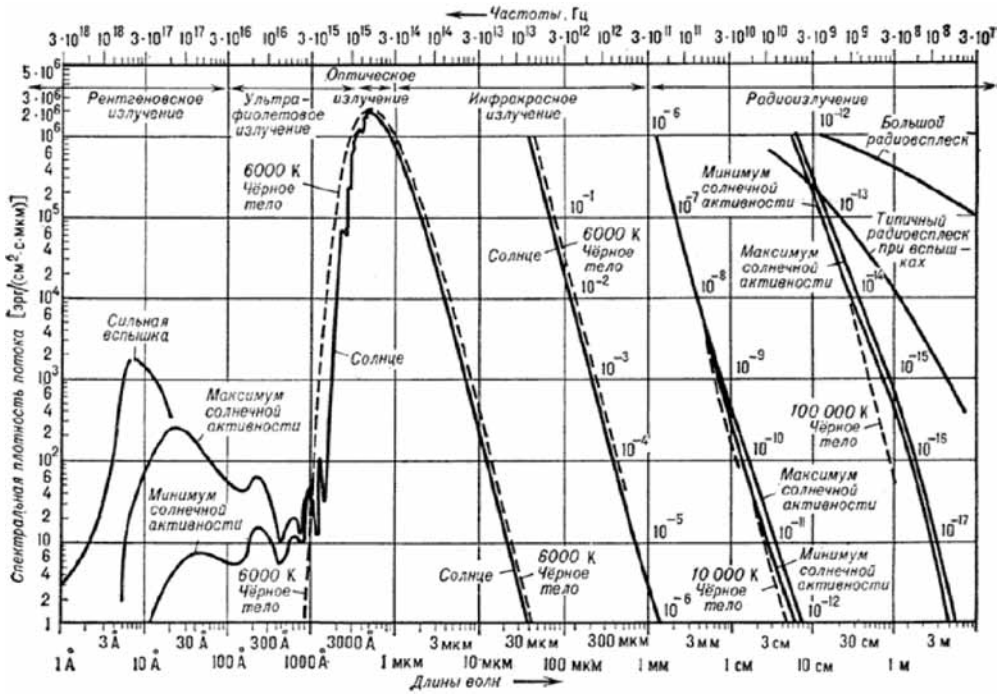


Рис. 5. Спектр излучения Солнца и его часть в рентгеновском диапазоне (в максимуме и минимуме солнечного цикла) и от солнечной вспышки. Непрерывные линии — результаты измерений, штриховые — распределение энергии в спектре абсолютно черного тела с температурой $T \approx 6000$ К (или с $T = 104$ и 105 К в длинноволновой части спектра). Для волн длиннее 30 мкм порядки величин потоков указаны отдельно (близ кривых) [Физика космоса, 1986].

Солнечный ветер

Непрерывно истекающие потоки солнечного ветра, которые очень изменчивы во времени, имеют медленную составляющую и быструю составляющую, связанную с корональными дырами и приполярными областями Солнца с открытыми силовыми линиями магнитного поля, уходящими в гелиосферу (рис. 6). Эти силовые линии с удалением от Солнца нередко опускаются до низких гелиоширот, канализируя потоки высокоскоростного солнечного ветра в плоскость эклиптики, где они обтекают магнитосферу Земли. Типичные параметры солнечного ветра на орбите Земли приведены в табл. 2. Они испытывают вариации в зависимости от ситуации на Солнце, что отражается на взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли и служит источником геомагнитной возмущённости.

Спорадические источники космической погоды

Такие источники связаны с активными явлениями на Солнце — вспышками и корональными выбросами массы (СМЕs — Coronal Mass Ejections), которые порождают повышенные потоки жёсткого электромагнитного излучения

(гамма-, рентгеновского и ультрафиолетового диапазона), потоки энергичных частиц, а также магнитные облака (межпланетные CMEs), ударные волны и высокоскоростные потоки плазмы в гелиосфере.

Основной причиной активных явлений на Солнце являются магнитные поля, которые генерируются в подфотосферных слоях дифференциальным вращением, усиливаются и выносятся благодаря эффекту магнитной плавучести на поверхность, где они проявляются в виде солнечных пятен, активных областей, в виде магнитной сетки и магнитного ковра и т. д.

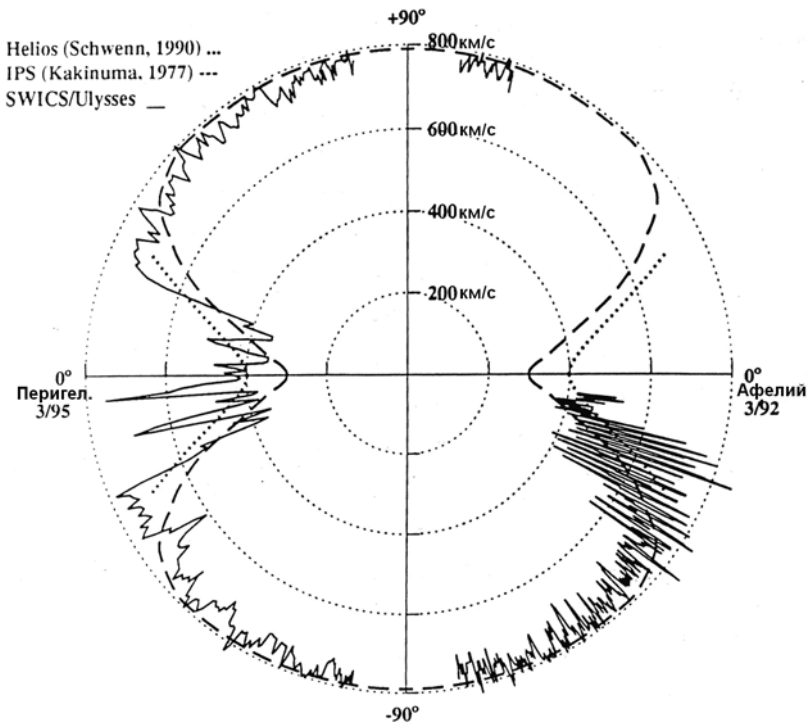


Рис. 6. Полярная диаграмма солнечного ветра — зависимость скорости солнечного ветра от гелиошироты (NASA/JPL-Caltech)

Таблица 2. Основные характеристики солнечного ветра на орбите Земли [Bothmer, Daglis, 2007]

Параметр	Солнечный ветер	
	быстрый	медленный
Скорость	450...800 км/с	≤450 км/с
Концентрация	~3 см ⁻³	~7...10 см ⁻³
Состав	95 % H, 5 % He, i, e	94 % H, 4 % He, i, e
Температура	~2·10 ⁵ К	~4·10 ⁴ К
Магнитное поле	~5 нТ	~4 нТ
Флуктуации	Альфвеновские (магнитные)	Плотности
Происхождение	Корональные дыры	Над корональными стримерами

Даже в минимуме солнечного цикла вся поверхность Солнца покрыта магнитным ковром, а непрекращающаяся конвекция, обусловленная потоками тепла из недр Солнца от термоядерных реакций, постоянно возмущает магнитное поле на уровне фотосферы, вызывая спорадическую активность Солнца — вспышки, выбросы массы и связанные с ними явления.

Спорадическое электромагнитное излучение Солнца и его источники

Во время солнечных вспышек заряженные частицы, ускоренные в процессах магнитного пересоединения, при вторжении в плотные слои солнечной атмосферы генерируют жёсткое электромагнитное излучение — от ультрафиолетового до рентгеновского и гамма-диапазона. Рентгеновское излучение генерируется ускоренными электронами, а гамма-излучение — ускоренными протонами и ионами. На рис. 5 показан вклад, который дают солнечные вспышки в излучение на характерных временах от минут до нескольких часов. Потоки жёсткого излучения вспышки могут в сотни и тысячи раз превышать излучение спокойного Солнца в отдельных спектральных диапазонах, что вызывает заметное повышение ионизации ионосферы Земли.

Спорадическое корпускулярное излучение Солнца и его источники

Быстрый и медленный солнечный ветер, истекающий из разных источников на Солнце (см. табл. 2), определяют спорадический характер взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли при пересечении границ корональных дыр, когда Земля оказывается в секторе межпланетного магнитного поля с высокоскоростными потоками солнечного ветра (рис. 7). Эти периоды, как правило, сопровождаются повышением геомагнитной активности и магнитными бурями.

Источниками повышенных геомагнитных возмущений являются также коротационные области (CIRs — Corotating Interaction Regions) в гелиосфере (рис. 8), которые образуются, когда быстрый солнечный ветер догоняет медленный, истекающий из Солнца западнее медленного. При этом возникает сжатие быстрого солнечного ветра впереди потока, возможно с образованием ударной волны, а также небольшое отклонение в обратном направлении. Магнитное поле внутри CIRs возрастает и появляется внеэклиптическая компонента поля, что сопровождается возмущениями межпланетного магнитного поля, генерацией и распространением альфвеновских волн. При взаимодействии с магнитосферой Земли имеющие высокую скорость и плотность CIRs вызывают магнитные бури, длительность которых, как правило, не превышает одни сутки.



Рис. 7. Секторная структура межпланетного магнитного поля с высокоскоростными потоками солнечного ветра, истекающими из корональной дыры на Солнце

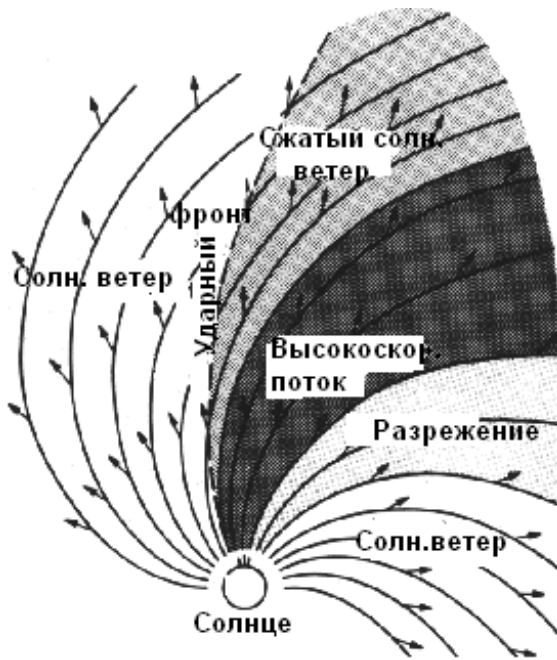


Рис. 8. Коротационные взаимодействующие области в гелиосфере — источники повышенной геомагнитной активности [Bothmer, Daglis, 2007]

Предположительно, источники солнечного ветра на Солнце — это границы и узлы хромосферной сетки, где во встречных плазменных потоках конвективных ячеек происходит магнитное пересоединение непрерывно всплывающих маленьких магнитных арок, и нагретая плазма выдувается вверх по магнитным трубам — открытым силовым линиям, и ещё выше она находит выход в корону в областях над корональными стримерами.

Основные геоэффективные параметры солнечного ветра, от которых зависит характер и амплитуда его взаимодействия с магнитосферой Земли, — это скорость солнечного ветра, его плотность и направление магнитного поля (север—юг), причём скорость солнечного ветра — один из наиболее геоэффективных параметров. Чем выше скорость, тем сильнее вмороженное электрическое поле, влияющее на характер взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Если магнитное поле в плазменном облаке или солнечном ветре направлено на юг, то их взаимодействие с магнитосферой сопровождается магнитным пересоединением на дневной стороне и эффект этого взаимодействия наиболее сильный — внутрь магнитосферы наиболее эффективно проникает плазма солнечного ветра, усиливая магнитосферные токовые системы и флуктуации магнитного поля.

Самые мощные проявления солнечной активности — корональные выбросы массы (CMEs — Coronal Mass Ejections) [Кузнецов, 2008], наиболее геоэффективные явления в системе Солнце—Земля. Распространяясь от Солнца, они переходят в межпланетные магнитные плазменные облака (ICMEs — Interplanetary CMEs), впереди которых формируется ударная волна. Скорость таких облаков и ударных волн может достигать 2000 км/с и более. Их столкновение с магнитосферой Земли приводит к магнитным бурям

и многочисленным сопутствующим явлениям — высыпанию энергичных частиц из радиационных поясов Земли в атмосферу, генерации повышенных токовых систем (электроджет и кольцевой ток) и магнитных возмущений, ионосферным возмущениям и т. д. Геомагнитные возмущения связаны с двумя основными эффектами — сжатием магнитосферы (определяется напором солнечного ветра) и кольцевым током (определяется в основном вмороженным электрическим полем $c\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ солнечного ветра). Эти эффекты сильно зависят от скорости солнечного ветра и относительно слабо от плотности. В первые несколько секунд магнитной бури, в соответствии с законом электромагнитной индукции, возникает глобальное вихревое электрическое поле, которое пронизывает всё ОКП и саму Землю. Величина этого поля около 2...3 В/км. Оно приводит к генерации геомагнитно-индуцированных токов в природных и технических проводящих системах, создавая помехи и аварийные ситуации, по примеру той, которая произошла 13–14 марта 1989 г. в провинции Квебек (Канада) [Larose, 1989]. В периоды магнитных бурь происходит усиление (примерно на 15 %) электромагнитных колебаний в области шумановских резонансов 1...10 Гц, частоты которых обладают биотропностью и близки к характерным частотами работы мозга и сердца [Птицына и др., 1998].

Если в обычном состоянии граница магнитосферы на её дневной стороне находится на расстоянии 10 земных радиусов от Земли, то в периоды попадания на Землю самых мощных магнитных плазменных облаков эта граница может поджиматься до 5 земных радиусов, лишая магнитного щита всю геостационарную орбиту, на которой располагаются многочисленные спутники связи, телевидения и т. д. При этом сильными геомагнитными возмущениями охватываются более низкие широты.

На разных фазах солнечного цикла максимальный вклад в геомагнитную активность дают разные солнечные агенты (рис. 9). В максимуме солнечного цикла число самых сильных магнитных бурь возрастает примерно в три раза по сравнению с минимумом и они вызываются в основном межпланетными CMEs. В максимуме цикла CMEs дают в основном вклад в возникновение не только больших, но и всех остальных бурь, малых и средних. Другие максимумы в появлении магнитных бурь связаны с корональными дырами (Coronal Holes — CH), но они немного ниже (см. рис. 9). В минимуме цикла малые и средние бури в большей степени порождаются потоками солнечного ветра.

Активные области на Солнце и его вращение определяют секторную структуру межпланетного магнитного поля (ММП) — спиральную и гофрированную («юбочка балерины»). При своём движении вокруг Солнца Земля, пересекая эту структуру, оказывается в секторах с разной полярностью ММП, что сопровождается изменением взаимодействия солнечного ветра, в который вморожено ММП, с магнитосферой Земли. На эту картину накладываются те возмущения, которые возникают в солнечном ветре от выбросов массы, ударных волн, корональных дыр и т. д.

Эффект Вилкокса — изменение завихрённости и образование внетропических циклонов в атмосфере Земли при изменении знака ММП у Земли [Wilcox et al., 1974] — получил подтверждение по данным наблюдений в работе [Prikry et al., 2009]. Естественно, при этом меняется картина атмосферных процессов (давление, ветер и т. д.) — один из показателей среды обитания человека (характерные времена от менее недели до нескольких недель).

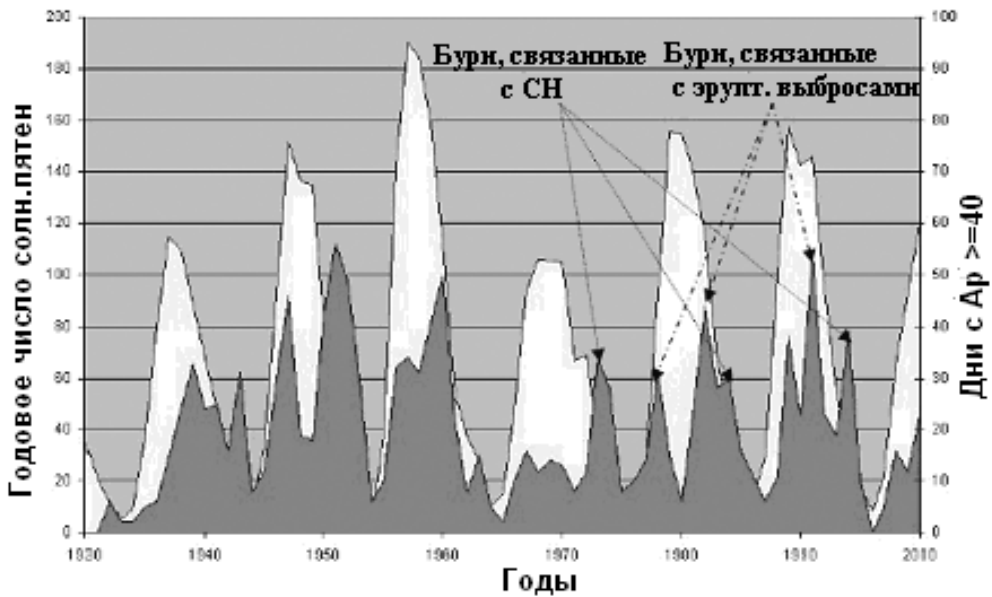


Рис. 9. Вариации геомагнитно возмущенных дней ($A_p > 40$) солнечным циклом. Белым цветом показано число солнечных пятен. Показаны несколько временных интервалов, для которых были определены солнечные источники (адаптировано из J. Allen. http://www.ngdc.noaa.gov/GEOMAG/image/APStar_2000sm.gif)

Энергичные частицы

Солнечные вспышки и ударные волны в короне и гелиосфере порождают высокоэнергичные частицы, которые, распространяясь в короне и гелиосфере, попадают внутрь магнитосферы Земли, формируя радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве и создавая опасность для космонавтов и спутников. Если излучение приходит на Землю через 8 мин, то частицы — примерно через час и более. Энергия электронов достигает более 100 МэВ, протонов — до 10 ГэВ. Спектры частиц, как правило, степенные (рис. 10).

Усреднённые годовые потоки электронов во внешнем радиационном поясе меняются с фазой солнечного цикла (рис. 11), и такая картина с некоторыми изменениями повторяется от цикла к циклу [Bothmer, Daglis, 2007].

Внутренний радиационный или протонный пояс, образованный действием галактических космических лучей (ГКЛ) (распад нейтронов), во время магнитных возмущений является источником высыпающихся энергичных протонов, и его состояние зависит от солнечной активности, так как формирующие его потоки ГКЛ понижаются в максимуме солнечного цикла и повышаются в минимуме (эффект экранировки ГКЛ межпланетным магнитным полем и солнечным ветром, рис. 12). Другой эффект связан с потерей протонов пояса в максимуме цикла из-за разбухания атмосферы Земли, обусловленного повышенными потоками солнечного рентгеновского излучения. В области Бразильской магнитной аномалии минимальная высота внутреннего радиационного пояса опускается до 250 км.

Энергичные частицы и жесткое излучение вспышек

Импульсная фаза -
около 1 мин.

Вспышечная фаза
- от нескольких
минут до 15 мин.

Угасание вспышки
- от 20 мин до 3 ч.

**Общее излучение
вспышки** - 10^{-5} от
светимости всего
Солнца.

**Рентгеновский
поток излучения
($\lambda < 1 \text{ \AA}$) может
возрастать в 100
раз.**

**Энергии
ускоренных частиц**
- от 20 кэВ
до 10 ГэВ.

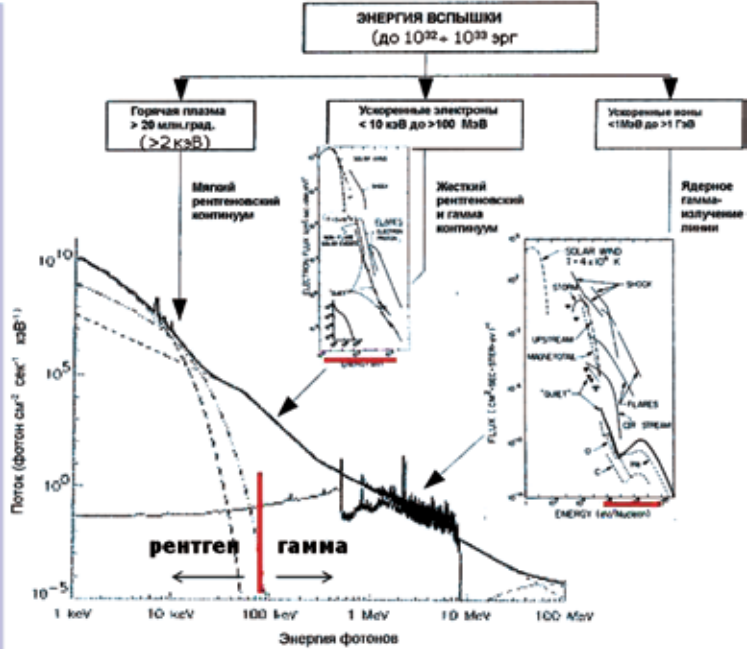


Рис. 10. Спектры энергичных частиц и жесткое излучение от солнечных вспышек

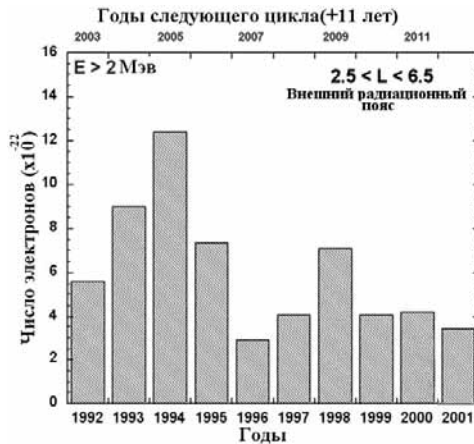


Рис. 11. Усредненные годовые потоки электронов ($E > 1,4 \text{ МэВ}$) во внешнем радиационном поясе. Верхняя шкала — соответствие годам 23-го цикла [Bothmer, Daglis, 2007]

Во время вспышек потоки протонов и рентгеновского излучения возрастают на несколько порядков величин (в 280...2000 раз), что вызывает дополнительную ионизацию ионосферы, вплоть до низких высот. Во время протонных событий на Солнце протоны ($E > 100 \text{ МэВ}$) проникают в ионосферу и могут вызвать ионизацию, большую, чем электроны (т.е. более чем

в 10 раз). Ионосферные эффекты космической погоды связаны с изменением ионизации и проводимости ионосферной плазмы, возникновением токовых систем, и, как следствие, диссипацией этих токов, нагревом атмосферы, что приводит к разбуханию атмосферы и аномальному торможению низкоорбитальных спутников и МКС. Эти ионосферные токи приводят также к возмущениям геомагнитного поля.

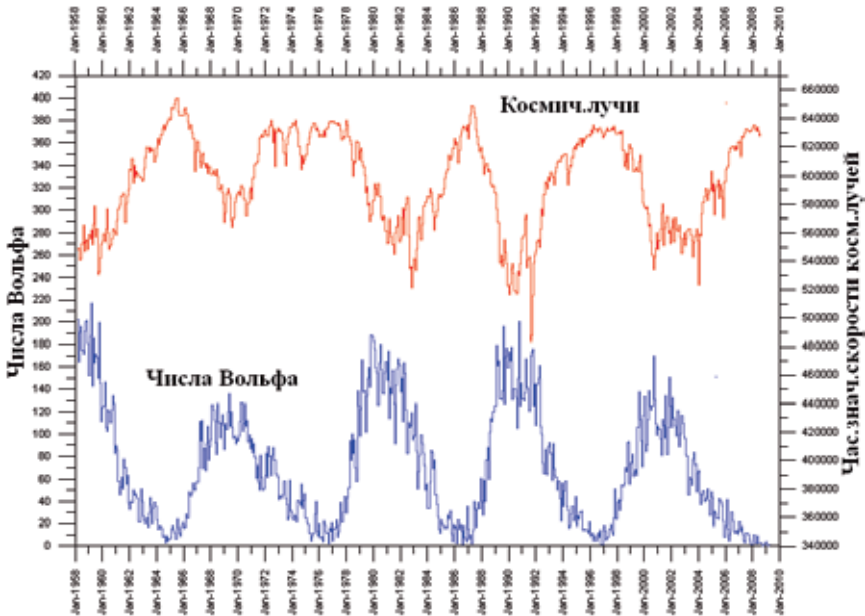


Рис. 12. Корреляция повышенных потоков галактических космических лучей с минимумами солнечной активности с 1958 г. (<http://www.climate4you.com/Sun.html>)

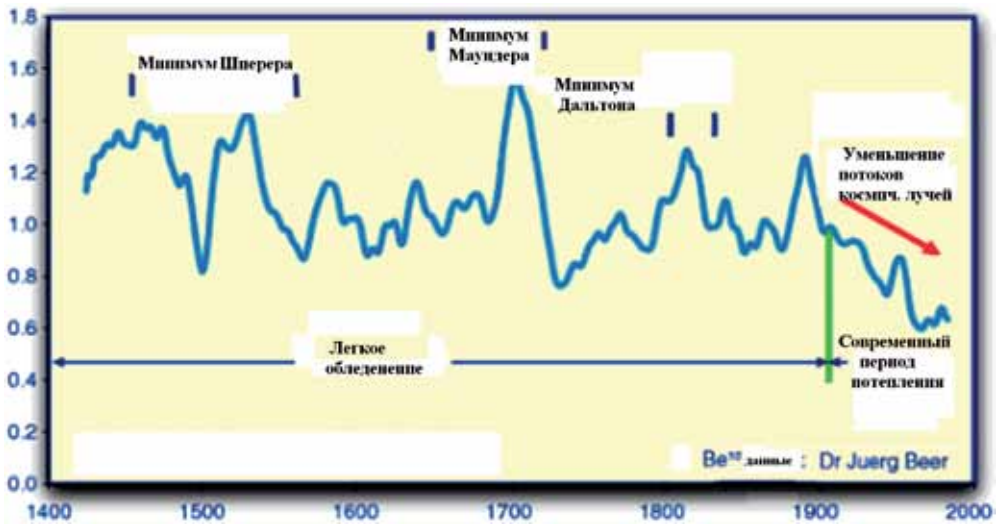


Рис. 13. Соответствие между потоком галактических космических лучей и солнечной активностью (1400...2000)

Энергичные протоны от мощных солнечных вспышек, попадая в атмосферу Земли в области полюсов, инициируют химические реакции, которые приводят к разрушению озона — жизненно важного слоя, защищающего Землю от губительного ультрафиолета, в результате в средней мезосфере на высотах 55 км разрушается до 70 % озона. Длительность периодов восстановления озонового слоя составляет от нескольких недель до месяца [Jackman et al., 2001].

Геоэффективность солнечных источников космической погоды и её воздействующих агентов определяется рядом факторов — положением на Солнце, ориентацией магнитного диполя Земли и т. д. Известно, что наибольшей геоэффективностью, в смысле максимального воздействия на ОКП, обладают события на западной, уходящей за лимб части Солнца, что связано со спиральной структурой гелиосферного магнитного поля, которое, в известной мере, является канализатором идущих от Солнца возмущений — потоков энергичных частиц и плазмы.

Один из факторов космической погоды — это также общее состояние гелиосферы, определяемое как солнечной активностью, так и той межзвёздной средой, в которой движется Солнечная система, — плотные рукава Галактики, пузыри — разреженные области и т. д. Гелиосфера ограничена гелиопаузой (около 100 а. е. от Солнца), по обе стороны от которой располагаются ударные волны, гасящие встречные сверхзвуковые потоки солнечного ветра и межзвёздной среды. Солнечный ветер, заполняющий гелиосферу, и напряжённость общего магнитного поля Солнца модулируются солнечным циклом, что в итоге приводит к модуляции потока галактических космических лучей (ГКЛ), проникающих в гелиосферу и попадающих на Землю. Галактические космические лучи — важный источник космической погоды, поскольку они формируют внутренний радиационный пояс Земли, а также, попадая в атмосферу Земли через образование вторичных частиц, влияют на образование облаков и климат Земли. Поток ГКЛ и солнечная активность антикоррелируют — чем выше уровень солнечной активности, тем меньше поток ГКЛ, и наоборот (см. рис. 12; рис. 13). При высокой солнечной активности поток ГКЛ мал, облаков мало, альbedo Земли мало и солнечное излучение нагревает атмосферу и Землю. При низкой солнечной активности всё наоборот.

Рассмотренные выше основные солнечные источники космической погоды модулируются 11-летним солнечным циклом — максимальные число и интенсивность геоэффективных явлений на Солнце происходит вблизи максимума солнечного цикла, соответствующим образом меняется и космическая погода в ОКП — число магнитных бурь, радиационная обстановка и т. д. Некоторые количественные показатели такой модуляции приведены выше. За 11-летний цикл активности на Солнце происходит около 37 000 вспышек; в максимуме цикла — 12...24 вспышки в день, и от 5 до 10 выбросов в день. Земля за это время испытывает более 600 магнитных бурь. Изучение механизма солнечного цикла до сих пор остаётся одной из актуальных проблем солнечной и солнечно-земной физики. Мы не знаем, почему от цикла к циклу меняется амплитуда и длительность цикла, мы не умеем надёжно предсказывать особенности предстоящих циклов. Для получения информации о предстоящих солнечных циклах используются наблюдения зональных течений на поверхности Солнца, на основе которых в последнее

время удалось сделать удачные прогнозы относительно 24-го солнечного цикла [Altrock, 2010].

Помимо 11-летнего цикла солнечных пятен известны и другие, более длиннопериодные солнечные циклы (22–23-летний цикл изменения магнитной полярности Солнца, 80–90-летний (вековой) цикл амплитудной модуляции 11-летних циклов, 180–230-летний цикл, 2300–2400-летний цикл), которые необходимо иметь в виду в плане долгосрочного прогноза ситуации в системе Солнце – Земля.

Экстремальные события космической погоды

Иногда в системе Солнце – Земля случаются экстремальные явления, когда произошедшие на Солнце вспышки и выбросы массы оказывают очень сильное воздействие на ОКП и среду обитания человека. К таким событиям относят Каррингтоновское событие 1859 г., событие 1921 г., событие августа 1972 г., Квебекское событие 13–14 марта 1989 г., события октября – ноября 2003 г. Эти события продемонстрировали уязвимость среды обитания человека и его деятельности по отношению к проявлениям космической погоды и необходимость более детального её изучения и учёта воздействующих факторов на человека и при эксплуатации и проектировании технических систем на Земле и в космосе.



Рис. 14. Аномальные периоды солнечной активности и их связь с проявлениями на Земле [Eddy, 1976, 1980]

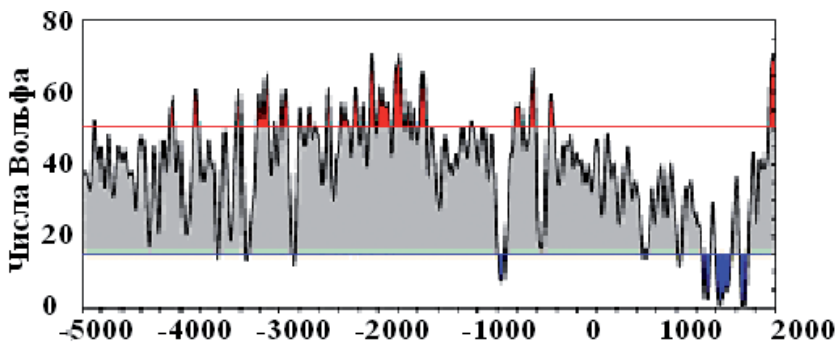


Рис. 15. Солнечная активность в период Голоцен (5000 лет до н.э. — 2000 лет н.э.) [Usoskin et al., 2007]

К долговременным экстремальным событиям космической погоды можно отнести также длительные периоды похолоданий и ледниковые периоды в истории Земли, которые коррелируют с аномальными периодами солнечной активности [Eddy, 1976, 1980] (рис. 14). Такие периоды по результатам реконструкции в далёкое прошлое происходили регулярно [Usoskin et al., 2007] (рис. 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космическая погода, основными источниками которой является Солнце и его активность, оказывает непосредственное воздействие на среду обитания человека на Земле и в космосе и на его повседневную деятельность. Солнце как звезда стабильно на огромных временных масштабах, солнечная активность — основной источник космической погоды, подвержена сильным вариациям в 11-летнем цикле и имеет более долговременные изменения. Задача предсказания общего уровня солнечной активности на больших временах и в 11-летних циклах, так же как и периодов мощных вспышек и выбросов массы, влияющих на среду обитания человека на разных временных масштабах, остаётся одной из актуальных проблем современной солнечно-земной физики — науки, которая является научной основой для изучения и прогнозирования космической погоды и её влияния на человека. Для обеспечения устойчивого существования человечества необходимы прогнозы характеристик предстоящих солнечных циклов и общего уровня солнечной активности на больших временах. Прогресс в изучении космической погоды, её солнечных источников, равно как и надёжный её прогноз, возможны на основе дальнейших исследований, в которых существенную роль играют космические аппараты, — из них сегодня создают целые флотилии, изучающие всю цепочку процессов от Солнца до Земли. Эти исследования позволят продвинуться в ключевых вопросах науки о космической погоде — понимании механизма солнечных циклов, механизмов нагрева короны и ускорения солнечного ветра, триггерных механизмов наиболее мощных проявлений солнечной активности — вспышек и выбросов массы, а также в прогнозировании аномальных солнечных событий, представляющих реальную опасность для современной техносферы — наземных и космических систем.

ЛИТЕРАТУРА

- [Гибсон, 1977] *Гибсон Э.* Спокойное Солнце. М.: Мир, 1977.
- [Кузнецов, 2008] *Кузнецов В.Д.* Выбросы массы // Плазменная гелиогеофизика. Т. 1 / Под ред. Л. М. Зелёного, И. С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. С. 81–98.
- [Кузнецов, 2012] *Кузнецов В.Д.* Солнечно-земная физика и её приложения // Успехи физ. наук. 2012. Т. 182. № 3. С. 327–336.
- [Кузнецов, Махутов, 2012] *Кузнецов В.Д., Махутов Н.А.* Солнечно-земная физика и проблемы безопасности энергоинфраструктуры // Вестн. РАН. 2012. Т. 82. № 2. С. 110–118.
- [Птицына и др., 1998] *Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Дорман Л.И., Ючки Н., Тясто М.И.* Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // Успехи физ. наук. 1998. Т. 168. № 7. С. 767–791.
- [Физика космоса, 1986] *Физика космоса: Маленькая энциклопедия.* М.: Сов. энциклопедия, 1986.
- [Altrock, 2010] *Altrock R.* SOHO-23: Understanding a Peculiar Solar Minimum // ASP Conference Series / Eds. S. Cranmer, T. Hoeksema, J. Kohl. 2010. V. 428. P. 147.
- [Bothmer, Daglis, 2007] *Bothmer M., Daglis I.* A Space Weather — Physics and Effects. Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2007.
- [Eddy, 1976] *Eddy J.* The Maunder Minimum // Science. 1976. V. 192. P. 1189–1202.
- [Eddy, 1980] *Eddy J.* The historical Records of Solar Activity // The Ancient Sun / Ed. R. Pepin, J. Eddy, R. Merrill. Pergamon, 1980. P. 119.
- [Jackman et al., 2001] *Jackman C.H. et al.* Northern hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. P. 2883–2886.
- [Lanzerotti et al., 1999] *Lanzerotti L.J., McLennan C.G., Thomson D.J.* Engineering issues in space weather // Modern Radio Science / Ed. M.A. Stuchly. Oxford: University Press, 1999. P. 25–50.
- [Larose, 1989] *Larose D.* The Hydro-Quebec System Blackout of March 13, 1989 // IEEE Special Publication 90TH0291-5 PWR. 1989. P. 10.
- [Lean et al., 2005] *Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G.* Sorce Contributions to New Understanding of Global Change and Solar Variability // Solar Physics. 2005. V. 230. P. 27–53.
- [Nicolson, 1982] *Nicolson I.* Die Sonne. Herder Verlag, Freiburg, Germany, 1982.
- [Prikry et al., 2009] *Prikry P., Rusin V., Rybansky M.* The influence of solar wind on extratropical cyclones — Part 1: Wilcox effect revisited // Annales Geophysicae. 2009. V. 27. N. 1.
- [Severe Space..., 2009] *Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report.* Washington DC: The National Academies Press, 2009.
- [Solar dynamics..., 2007] *Solar dynamics and its effects on the heliosphere and Earth / Eds. Baker D.N., Klecker B., Schwartz S.J. et al.* Springer, 2007.
- [Stix, 2004] *Stix M.* The Sun: an Introduction. 2nd ed. Astronomy and Astrophysics Library, Springer Verlag, 2004.
- [Usoskin et al., 2007] *Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A.* Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints // Astronomy and Astrophysics. 2007. V. 471. P. 301–309.
- [Wilcox et al., 1974] *Wilcox J.M., Scherrer P.H., Svalgaard L., Roberts W.O., Olson R.H., Jenne R.L.* Influence of solar magnetic structure on terrestrial atmospheric vorticity // J. Atmospheric Sciences. 1974. V. 31. P. 581–588.

SOLAR SOURCES OF SPACE WEATHER

V. D. Kuznetsov

N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia,
e-mail: kvd@izmiran.ru

The basic phenomena of solar activity responsible for the space weather conditions and disturbances in near-Earth space are discussed. The sporadic phenomena of solar activity such as flares, CMEs, high-speed solar wind streams, and shock waves affect near-Earth space, where they cause geomagnetic storms and related effects, variations in the ionosphere, upper atmosphere, and human environment.

The most typical factors of space weather controlled by solar activity and their effect on various aspects of the human life are described.

In the context of the forecast of space weather and its effects on the Earth, the attention is mainly focused on the unsolved problems related to the mechanism of the solar cycle as a principal modulator of the general disturbance level in near-Earth space and the basis for predicting the amplitude and duration of the forthcoming solar cycles, as well as on the forecast of solar flares and CMEs, which are the most powerful geoeffective phenomena of solar activity.

ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ, ПРОГНОЗ

В. Н. Обридко

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, Россия, e-mail: obridko@izmiran.ru

Снова и снова Солнце ставит проблемы перед астрономами. Одной из таких проблем является аномальное поведение солнечной активности в течение последнего 23-го цикла. Даже сейчас не ясно, прекратились ли эти аномалии с началом нового 24-го цикла или по-прежнему можно ожидать начала периода низкой солнечной активности. Обсуждаемые аномалии проявились в различных параметрах, таких как собственно число солнечных пятен, количество и интенсивность выбросов корональной массы, необычное распределение яркости в короне, параметров солнечного ветра, появление больших низкоширотных корональных дыр и т. п. **Обсуждались следующие проблемы:**

- Каковы особенности солнечной активности, которые позволяют говорить об аномальном цикле? Возможно ли, что мы находимся на пороге сильного снижения солнечной активности? Наблюдались ли аналогичные эпизоды в истории солнечной активности? Каковы сходные черты и различия между циклами активности Солнца и звёзд?
- Могут ли современные теории объяснить резкие изменения в высоте цикла (до одного порядка величины) для одной и той же звезды? Можно ли предсказать высоту и особенности циклов на основе теории динамо?
- Существуют ли дополнительные аргументы, указывающие на влияние планет на солнечную активность?
- Чего можно ожидать в будущем? Есть ли возможность улучшить прогноз солнечной активности?

ВВЕДЕНИЕ

Начнём с того, почему доклад так озаглавлен и в чем, собственно, состоит вызов теории динамо. Этот минимум и весь 23-й цикл были весьма необычными. Действительно ли эта необычность выходит за пределы наблюдавшегося ранее разброса характеристик циклов активности? И можем ли мы сегодня хотя бы в общих чертах указать причины значительных вариаций в характеристиках солнечных циклов? Следует заметить, что особая необычность прошедшего минимума состояла в том, что поля были слабые, а морфология гелиосферы сложная. Наблюдалось большое число объектов промежуточного масштаба — не глобальных и не локальных. Не может ли это быть использовано для оценки высоты следующего максимума? Каковы современные модели солнечного динамо, могут ли они обеспечить наблюдаемые напряжённости магнитных полей пятен и от чего зависит уровень активности в данном цикле? И, наконец, чего же нам ждать от цикла 24, в который мы вступили?

Как солнечные пятна — самый известный объект на Солнце, так и 11-летний солнечный цикл — самое известное периодическое явление на Солнце и, вероятно, в астрофизике вообще. Как часто астрономам приходится отвечать на вопросы, когда будет «солнечный максимум» и что нас при этом ждёт. Необходимо здесь ещё раз подчеркнуть, что солнечная активность чрезвычайно многосторонняя, в ней существует много различных периодических процессов и 11-летний цикл солнечных пятен является, в первую очередь,

естественным календарём солнечной деятельности. Отнюдь не все процессы на Солнце, даже те из них, которые тоже имеют 11-летнюю периодичность, совпадают с циклом пятен по фазе.

Обычно принято употреблять термин «солнечный цикл» без уточнения, какой именно индекс используется для его определения. При этом всегда имеют в виду цикл солнечных пятен, определённый по сглаженным среднемесячным значениям индекса солнечных пятен (число Вольфа), который связан с числом солнечных пятен непростым и довольно субъективным соотношением. Однако следует иметь в виду, что этот цикл есть не более чем удобный календарь. Часто можно встретить среди неспециалистов представление, что все активные явления происходят в максимумах циклов, а в минимуме «Солнце спокойно». На самом деле в этом утверждении не больше информации, чем в том, что на Земле в январе снега больше, чем в феврале (что, очевидно, неверно, скажем, для жителей Австралии, да и в северном полушарии меняется от года к году). В дальнейшем мы будем употреблять это понятие именно как календарный термин.

1. ТРАДИЦИОННЫЙ СЦЕНАРИЙ 11-ЛЕТНЕГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Прежде чем обсуждать особенности 23-го цикла, стоит определить, что такое нормальный цикл.

Как говорилось выше, под циклом мы будем понимать 11-летний цикл солнечных пятен, или 11-летний цикл локальных полей. Продолжительность «11-летнего цикла» в XX в. была 10,35 года. Начало каждого цикла отождествляется с фазой минимума. Эта фаза определяется задним числом довольно сложным образом как некий средний момент продолжительного периода минимальных значений, и её момент является довольно условным. Очевидно, что сглаженные числа также можно вычислять только задним числом, и для их вычисления необходимо знание 13 среднемесячных значений, поэтому их иногда называют не совсем корректно 13-месячными средними.

Числа Вольфа в максимуме цикла достигают почти 200, в низких циклах они могут быть всего лишь около 50. Суммарные площади пятен могут достигать 5000-миллионных долей диска.

Можно сформулировать следующие основные закономерности цикла солнечных пятен.

1. Пятна нового цикла возникают за несколько лет до минимума на относительно высоких широтах $\sim 35...40^\circ$. С течением времени пятна возникают на всё более низких широтах, приближаясь к экватору. Но в непосредственной близости от экватора, в пределах $\pm 5^\circ$, пятна не появляются никогда. Этот закон часто называют законом Шперера, а график зависимости положения пятен от времени и широты — диаграммой бабочек Маундера (рис. 1).
2. Согласно закону Хейла, полярность пятен в каждом цикле меняется на обратную. Это, естественно, указывает на то, что физическим является не 11-летний, а 22-летний цикл. Естественно задать в таком случае вопрос, что считать началом 22-летнего цикла. Если бы все 11-летние циклы были одинаковы, этот вопрос был бы довольно бессмысленным. Однако оказалось, что, обычно, нечётный

цикл выше предшествовавшего ему чётного. Это правило установлено М. Н. Гневнышевым и А. И. Олем [Гневнышев, Оль, 1948] первоначально — для интегральных за цикл значений числа Вольфа, и только позднее М. Копецкий [Кореску, 1950] распространил его на максимальные в цикле значения. Это правило было нарушено ранее в паре 4–5.

3. Вблизи максимума циклов часто наблюдается локальный минимум. Иногда его называют провалом Гневнышева (Gnevyshev gap).
4. Первые пятна нового цикла появляются задолго до минимума, то есть раньше, чем исчезают пятна предыдущего цикла. Циклы как бы существуют одновременно, но на разных широтах. Это дало основание предположить, что истинная длина цикла не 11, а 15–17 лет [Harvey, 1992].

Для характеристики временного сценария цикла было введено понятие опорных точек цикла [Витинский и др., 1986; Kuklin et al., 1990]. Эти опорные точки следующие: t_{Dm} и t_{mA} — начало и конец фазы минимума, соответственно (от английских слов “ascending”, “descending” и “minimum”), t_{AM} и t_{MD} — начало и конец фазы максимума, обозначаемого буквой M . По существу, 11-летний цикл сегодня — естественный календарь для описания временного развития многих явлений на Солнце.

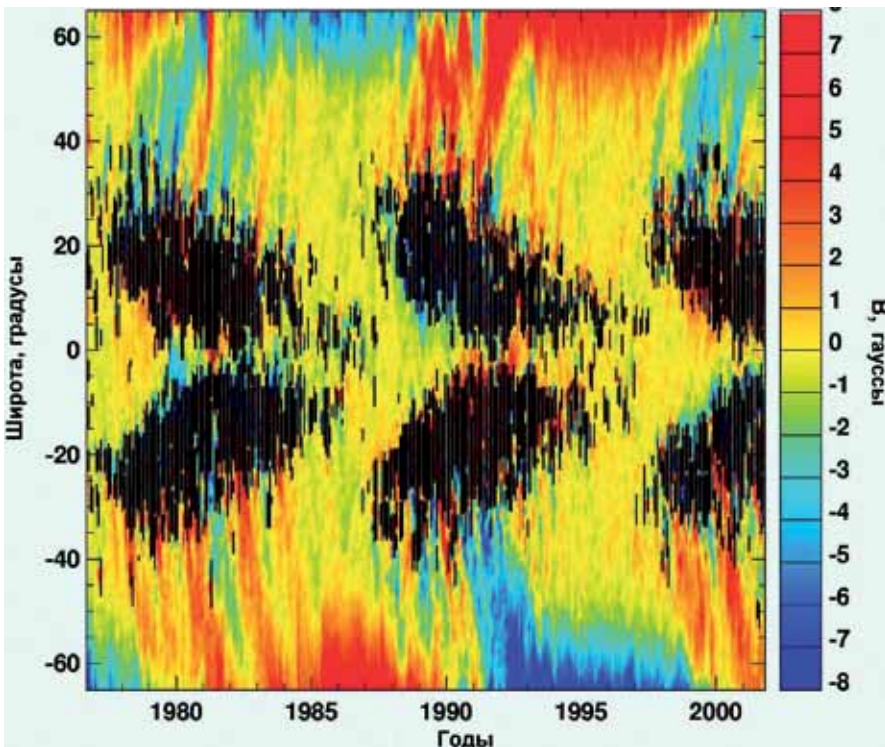


Рис. 1. Смещение зон активности в течение солнечного цикла. Черным цветом показаны пятна. Цветные участки показывают магнитное поле в единицах Гаусс в соответствии со шкалой слева

Именно поэтому при введении понятия опорных точек ожидалось, что они будут проявляться одновременно во всех солнечных индексах как моменты их резких изменений. Хотя это в целом и подтвердилось, однако оказалось, что существует довольно много явлений (в первую очередь, относящихся к крупномасштабным полям), резкие изменения в которых сдвинуты по времени по сравнению с опорными точками, определёнными по локальным полям. Тем не менее, понятие опорных точек и сейчас удобно использовать как основу для описания циклов любых индексов. Подробное определение опорных точек и их дат дано в работе [Обридко, Шельтинг, 2003].

Крупномасштабное магнитное поле также меняется с 11-летним циклом. Строго говоря, под крупномасштабным магнитным полем следует понимать все поля за пределами активных областей. В этом смысле они распространены по всей поверхности Солнца и не ограничиваются каким-либо поясом широт. Если мы выделяем среди них масштаб, сравнимый с радиусом Солнца, такое поле принято называть **глобальным**. Можно измерять поле вблизи полюсов Солнца, и тогда такое поле следует называть **полярным**. Можно просто анализировать характеристики **поля на поверхности источника**, которое полностью определяется только полями с самым большим масштабом. Можно выделить отдельно **дипольную или квадрупольную составляющие**. Существует ещё термин **общее магнитное поле**, который не имеет чёткого физического определения и часто отождествляется с крупномасштабным полем. Наконец, есть ещё измерения **магнитного поля Солнца как звезды** в интегральном потоке. Все эти поля тесно связаны друг с другом, сходным образом зависят от времени и во многих публикациях различие между ними игнорируется. Тем не менее, следует всегда иметь в виду, что с физической точки зрения всё это совершенно разные объекты и в различных приложениях они могут выступать по-разному.

Как уже говорилось, крупномасштабные поля простираются по всей поверхности Солнца. В отличие от локальных полей, с течением времени они дрейфуют к полюсам. Видно, что крупномасштабное поле дрейфует к полюсам, достигая максимума на полюсах одновременно с минимумом локальных полей (см. рис. 1). Часто можно слышать, что крупномасштабное поле меняет свой знак в максимуме цикла локальных полей. Это не совсем корректное утверждение. Оно относится только к полярному полю либо к дипольной составляющей крупномасштабного поля (этот момент часто называют **переполлюсовкой**). На самом деле, смена знака крупномасштабного поля на разных широтах происходит в различные моменты времени. Это хорошо видно на рис. 2, на котором показан расчёт радиальной компоненты среднего радиального поля с таким усреднением, что локальные поля на них не видны.

Заметим, что и здесь период от смены знака в приэкваториальных широтах до переполлюсовки полярного поля занимает больше 11 лет (примерно 15–17 лет). Иногда в низких широтах можно наблюдать нечто вроде предвестника переполлюсовки [Obridko, Gaziev, 1992].

Другое принципиальное правило локальных полей — закон Хейла — тоже следует пересмотреть в отношении крупномасштабных полей. Вообще говоря, в крупномасштабных полях нельзя говорить о ведущей или ведомой полярности. Поэтому закон Хейла следует переформулировать так: внутри активной области трансверсальная компонента поля в северном полушарии в нечётном цикле направлена к востоку ($B_{\phi} < 0$).

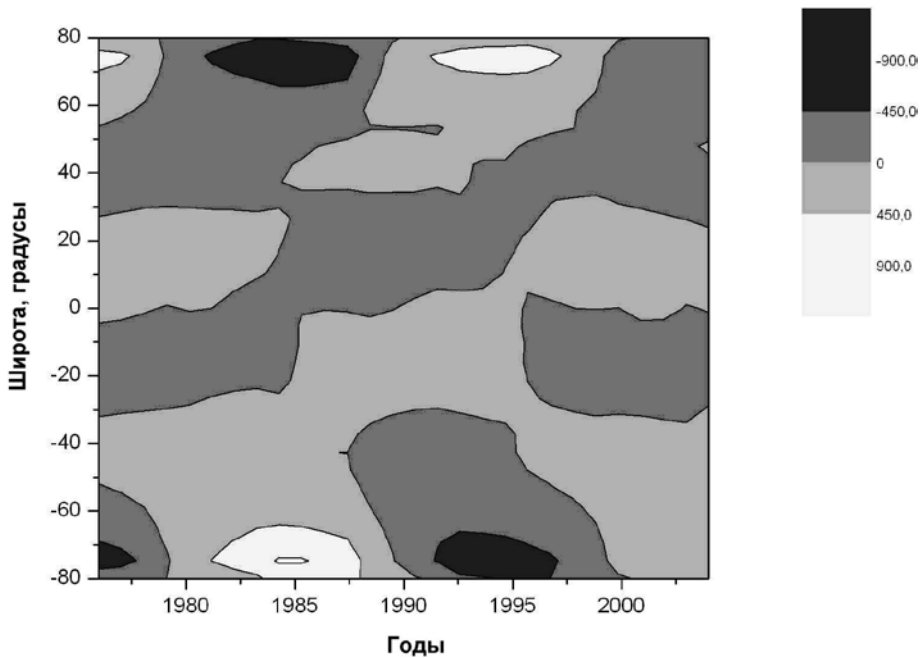


Рис. 2. Смещение зон крупномасштабного магнитного поля в единицах микротесла в соответствии со шкалой

Имея расчёт всех компонент магнитного поля, этот закон можно проверить для крупномасштабного поля. Естественно, среднее поле B_{ϕ} вдоль данного круга широты при отсутствии глобальных токов на фотосфере должно быть равно нулю. Но можно подсчитать, одинаковую ли площадь занимают поля с разным знаком B_{ϕ} . Оказалось, что антихейловское направление B_{ϕ} в крупномасштабном поле встречается значительно чаще.

Таким образом, локальные поля с хейловским законом направления поля погружены в антихейловскую среду. Это можно интерпретировать как следствие того, что крупномасштабное поле хранит следы предыдущего цикла. В этом случае крупномасштабное и локальное поля принадлежат к разным циклам. С другой стороны, это может быть специфическим отражением механизма генерации магнитного поля в конвективной зоне.

Крупномасштабное поле также резко меняется с фазой цикла. В период максимума цикла оно, кроме основной дипольной составляющей, содержит много гармоник более высокого порядка, и поэтому силовые линии образуют довольно сложную структуру. На рис. 3 на нижней панели показана структура крупномасштабного поля при наблюдении с Земли (слева) и с северного полюса Солнца (справа). Эта структура в обычных солнечных циклах сильно упрощается в период минимума цикла. Она показана на верхней панели рис. 3 также при наблюдении с Земли (слева) и с северного полюса (справа). Видно, что структура очень напоминает классическую структуру диполя с некоторым искажением в экваториальной зоне вследствие истечения солнечного ветра. Таково стандартное поведение крупномасштабного поля в обычных циклах активности. Далее мы увидим, что в 24-м цикле и в этом отношении наблюдались значительные аномалии.

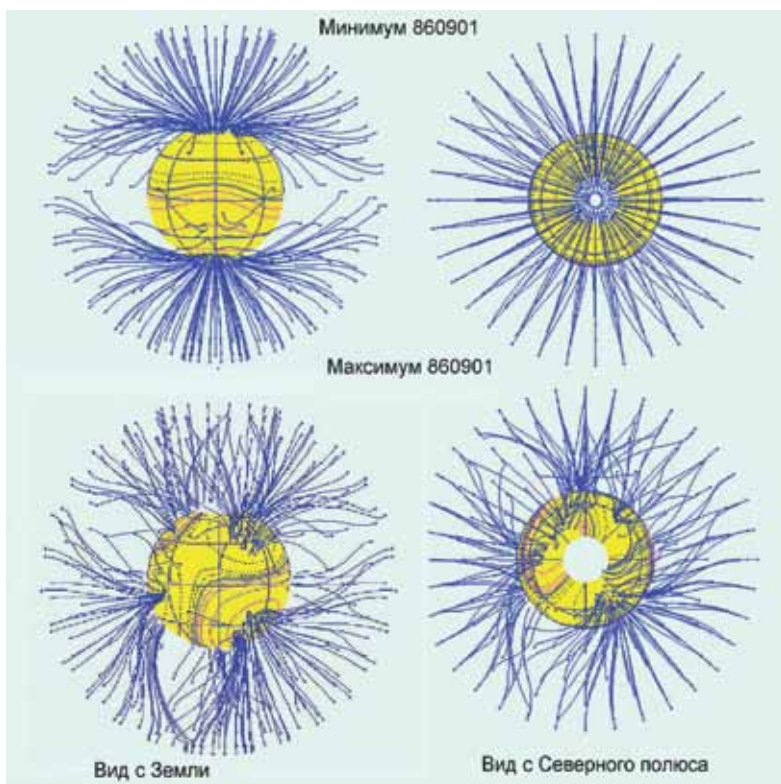


Рис. 3. Структура открытых силовых линий в минимуме цикла (вид с Земли слева и с северного полюса справа) на верхней панели. На нижней панели то же самое в максимуме цикла

Собственно дипольное поле меняется в противофазе с локальными полями. Однако бытующее зачастую представление об исчезновении дипольной составляющей в период максимума циклов неверно. На самом деле, солнечный диполь подвижен в теле Солнца. В течение некоторого времени вблизи минимума цикла полюс диполя располагается вблизи полюса вращения Солнца, совершая при этом перемещение по долготе, напоминающее прецессию с характерным временем порядка двух лет. Затем он перемещается в экваториальную зону, где и остаётся в течение 1–2 лет в максимуме цикла. В это время магнитный момент сильно уменьшается. В течение 1–2 лет на фазе спада и роста цикла осевой и экваториальный магнитные моменты сравнимы. Это соответствует тому, что в астрофизике называется наклонным ротатором.

Переход магнитной оси из одной полусферы в другую мы воспринимаем как переполюсовку полярного поля. Но при этом нужно иметь в виду, что это никогда не означает обращение магнитного момента Солнца в нуль [Лившиц, Обридко, 2005, 2006].

Для характеристики цикла крупномасштабного поля создано несколько индексов [Obridko, Ermakov, 1989; Obridko, Shelting, 1992; Obridko et al., 1989]. Поведение одного из них, наиболее распространённого, $I_{\text{Вг}}$, характеризует собой энергетику наиболее крупномасштабных магнитных полей на Солнце. Максимум этого интегрального индекса не совпадает ни с максимумом, ни

с минимумом локальных полей, поскольку отражает вариацию крупномасштабных полей на всех широтах.

Особое значение имеют области так называемых открытых полей. Условно под открытым полем принято называть такое, силовые линии которого достигают зоны, где преобладает солнечный ветер. Другими словами, открытым считается поле, силовые линии которого свободно уходят в космическое пространство и образуют магнитную структуру гелиосферы. Хотя они заполняют собой всю гелиосферу (или в рамках традиционной модели — всю поверхность источника), на уровне фотосферы или в нижней короне они обычно обрисовывают собой довольно ограниченные детали. Физически именно они и являются тем агентом, который приводит к возникновению корональных дыр. В минимуме цикла открытые поля образуют нечто вроде полярной шапки; с приближением к максимуму они становятся многосвязными и сдвигаются к средним и экваториальным широтам. В минимуме цикла они могут существовать без значительных изменений несколько лет; в максимуме их характерное время жизни — несколько оборотов. Циклическая вариация открытых полей была изучена на большом временном интервале В. Н. Обридко и Б. Д. Шельтингом [Obridko, Shelting, 1999].

До сих пор мы рассматривали циклы локальных и крупномасштабных полей раздельно как вариацию двух независимых объектов. На самом деле, они, конечно, теснейшим образом связаны. Скорее всего именно крупномасштабные поля поставляют тот материал, из которого и формируются локальные поля. Обратная ветвь пока не ясна. Механизм Бибкока–Лейтона, в котором крупномасштабное поле формируется из остатков активных областей, встречает ряд трудностей. Более того в многочисленных работах пулковских коллег (см. работу [Makarov et al., 2001] и ссылки в ней) показано, что развитие цикла локальных полей повторяет цикл полярного поля со сдвигом на полцикла. Организующая роль крупномасштабных полей видна также в хорошо известном факте концентрации мощных активных областей к границам секторной структуры [Obridko, Vumba, 1969].

Именно глобальные солнечные магнитные поля и определяют собой как структуру гелиосферы, так и общую структуру полей других масштабов. К так называемому гелиосферному экватору концентрируются все наиболее крупные активные области на Солнце.

2. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНИМУМА 23/24

Что 23-й цикл был необычным, сегодня широко известно. По большинству прогнозов, минимум должен был наступить ещё в 2006 г. Однако число пятен уменьшалось гораздо медленнее и достигло минимума только в декабре 2008 г. Таким образом, фаза спада оказалась рекордной длины — 8,6 года. Это самое большое значение со времён начала достоверных наблюдений. Несколько более длинной была фаза спада в 4-м цикле с 1788,1 по 1798,3 г. (12,2 года), но эти значения получены не в результате прямых наблюдений а восстановлены по косвенным данным. Более того, есть гипотеза [Uosokin et al., 2001, 2003], что 4-й цикл на самом деле представлял собой последовательность двух низких циклов, что и привело к кажущемуся завышению фазы спада.

Вторая особенность, связанная с числом пятен, состоит в нарушении правила Гневнышева–Оля. Как было сказано выше, нечётный 23-й цикл должен был быть выше предшествовавшего 22-го цикла. Но 22-й цикл сам по себе был довольно высоким; число солнечных пятен в максимуме этого цикла составляло 158,5, что существенно превышает среднее значение 113,2. Это дало основание ожидать очень высокого значения в максимуме 23-го цикла. Были основания предполагать, что он побьёт рекорд 19-го цикла (201,3) и, таким образом, мы станем свидетелями цикла *maximim maximorum*. Ничего этого не произошло. Высота цикла составила 120,8, что практически совпадает со средним значением, а очень важное правило Гневнышева–Оля оказалось нарушенным.

На рис. 4 показано месячное число беспятенных дней в последних десяти солнечных циклах. Видно, что минимум 23/24 отличается большим количеством беспятенных дней. Однако в целом в прошлом столетии был минимум в 1913 г., в котором беспятенных дней было ещё больше.

Число пятен в 2008 г. было чрезвычайно мало, но аномалия 23-го цикла состоит не только, и даже не столько в том, что он был невысоким. По существу, 23-й цикл нарушил весь стройный сценарий, который был изложен выше.

На рис. 5 показана структура силовых линий в минимуме 23/24 31 декабря 2008 г. (слева — предполагаемый вид с Земли, справа — вид с северного полюса). Если сравнить эти два рисунка с верхней панелью рис. 3, видно разительное отличие. Никакой стройной структуры, такой, как наблюдалась в 1986 г. в 21–22-м цикле, в 2000 г. нет. Кроме стандартного диполя, явно видны и другие гармоники, более характерные для возмущённого периода. При этом гелиосферный токовый слой не был плоским, как это должно быть в минимуме, при полном исчезновении других гармоник, кроме осевого диполя. Об этом говорит и структура короны в трёх последовательных прохождении космического аппарата *Ulysses*.



Рис. 4. Месячное число беспятенных дней в последних 10 солнечных циклах (<http://spaceweather.com/glossary/spotlessdays.htm>)

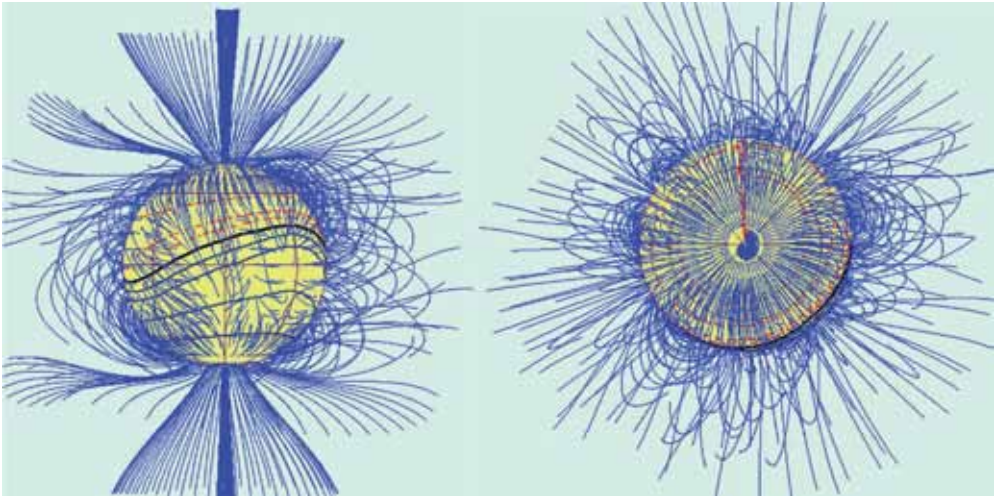


Рис. 5. Структура открытых силовых линий в минимуме 23/24 31 декабря 2008 г.: слева — предполагаемый вид с Земли, справа — вид с северного полюса

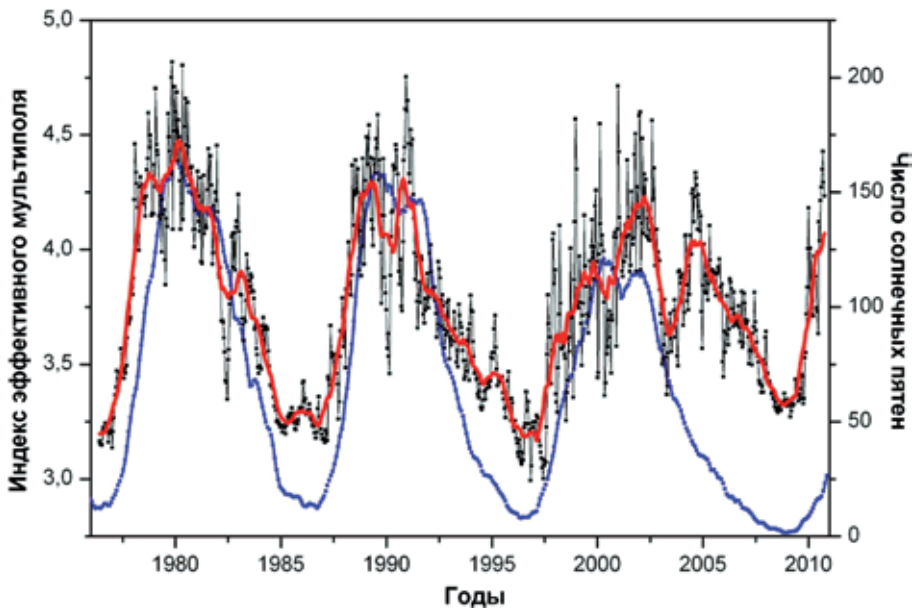


Рис. 6. Индекс эффективного мультиполя

Ситуация в период минимума 2008 г. разительно отличается от ситуации минимума 1996 г. Структура короны в 1996 г. стандартная, наблюдается резко выраженный стример в экваториальной плоскости, что свидетельствует о типичной структуре с осевым диполем. В 2008 г. наблюдаются многочисленные внеэкваториальные стримеры, которые уже нельзя связать с осевым диполем.

На рис. 6 показана также циклическая вариация введенного нами [Ivanov et al., 1999] индекса эффективного мультиполя. Этот индекс равен 3 для диполя и сильно увеличивается в максимуме цикла. В минимуме 23/24 ситуация

сильно отличалась от ситуации в минимумах 20/21 и 21/22. Если в предыдущих минимумах индекс опускался почти до дипольного значения, то на нисходящей ветви 23-го цикла начавшийся спад затем сменился ростом почти до значения, соответствующего максимуму цикла, и в последующем сильно отличался от дипольного значения. Рост этого индекса на нисходящей ветви 23-го цикла указывает на необычно большое число экваториальных корональных дыр.

Расчёты показывают, что даже в 2009 г. глобальное поле определялось не только диполем, как в 1996 г., а содержало большое количество малых областей открытого магнитного поля на всех широтах. Это привело к тому, что наблюдалось очень большое число внеэкваториальных источников солнечного ветра [Tokumaru et al., 2009].

Из других особенностей цикла можно упомянуть пониженную высоту, концентрацию и температуру земной ионосферы, самое низкое за последние три цикла значение интегрального потока солнечного излучения (“solar irradiance”). Магнитное поле в солнечном ветре было несколько ниже (среднее значение 3,7 по сравнению со значением 4,5 в прошлом минимуме), а диапазон значений ниже в полтора раза.

3. ВЫСОТА СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА И МЕРИДИОНАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС

Что же определило столь низкое значение числа солнечных пятен в минимуме 23/24? Что вообще определяет высоту цикла как в локальных, так и в глобальных полях?

Есть основания полагать, что это связано с изменением меридионального потока на фазе роста текущего или на фазе спада предыдущего циклов.

Как известно, солнечное динамо определяется двумя процессами. На первой стадии (Ω -эффект) из полоидального возникает тороидальное поле. В минимуме магнитное поле имеет квазидипольную структуру. Дифференциальное вращение в основании конвективной зоны вытягивает силовые линии полоидального поля и отклоняет их в азимутальном направлении, создавая тороидальное поле. Силы магнитной плавучести поднимают магнитные трубки на поверхность, давая начало стандартной биполярной группе пятен. Этот процесс хорошо изучен и не вызывает особых сомнений. Впрочем, пока не ясно, удастся ли при этом получать локальные изолированные трубки с напряжённостью до 3000 Гс.

Обратный процесс формирования полоидального поля из тороидального (α -эффект) ясен гораздо меньше. Наиболее часто цитируется механизм Беккока – Лейтона, при котором поток хвостовых пятен смещается к полюсам, где и возникает в результате полоидальное поле следующего цикла. При этом полярность полоидального поля меняется на обратную. Что касается головных пятен, то они смещаются к экватору, где их поток, взаимодействуя с противоположным по знаку потоком головных пятен другого полушария, приводит к исчезновению солнечных пятен и возникновению минимума цикла.

Хотя сама ветвь α -эффекта в деталях не ясна, но очевидно, что именно меридиональная циркуляция является ключом к пониманию характеристик цикла. Амплитуда и период цикла солнечных пятен определяется скоростью

меридиональной циркуляции [Hathaway et al., 2003; Karak, 2010; Karak, Choudhuri, 2011; Passos, Lopes, 2009, 2011; Wang et al., 2002], а величина коэффициента турбулентной диффузии определяет режим действия динамо [Choudhuri, 2010; Hotta, Yokoyama, 2010; Yeates et al., 2008].

На рис. 1 и 2 видно, что в течение цикла локальные и крупномасштабные поля смещаются в противоположных направлениях. Простейшая интерпретация этого явления состоит в следующем [Обридко, Шельтинг, 2003]. Магнитные поля генерируются в основании конвективной зоны. Волна генерации перемещается от средних широт к экватору. Быстро всплывающие концентрированные локальные поля обрисовывают эту волну генерации в виде бабочки-диаграммы. В то же время медленно всплывающие диффузные крупномасштабные поля теряют связь с волной генерации и сносятся к полюсам меридиональным течением.

Все активные явления на Солнце — результат взаимодействия глубинного полоидального и подповерхностного квадрупольного полей.

Таким образом, есть основания полагать, что высота предстоящего цикла связана со скоростью и интенсивностью меридионального течения. При этом зависимость высоты цикла от меридионального течения может помочь понять статистически наблюдаемую, но физически до сих пор не объяснённую корреляцию солнечной активности с периодами вращения планет вокруг Солнца. Разумеется, планеты не могут вызвать солнечную активность. Но они могут модулировать солнечную активность путём воздействия на меридиональные течения [Georgieva, 2011, 2011; Georgieva, Kirov, 2009].

4. ТАХОКЛИННОЕ ДИНАМО В СОПОСТАВЛЕНИИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ/ПОДПОВЕРХНОСТНЫМ ДИНАМО

Большинство современных моделей динамо предполагают, что тороидальное магнитное поле образуется вблизи основания конвективной зоны, в тахоклине, или непосредственно под ней и затем всплывает на поверхность в виде солнечных пятен (см. например, [Choudhuri et al., 1995; Parker 1993; Ruediger, Brandenburg, 1995; Tobias and Weiss, 2007]). Уверенность в предпочтительности глубинного динамо проистекает из того факта, что эта область устойчива для накопления магнитного потока, несмотря на эффекты магнитной плавучести.

Однако наблюдения скорости вращения всплывающих магнитных потоков в различных широтных зонах указывают скорее на относительно малую глубину солнечных пятен [Benevolenskaya et al., 1999], по-видимому, укоренённых в подповерхностном слое. Эта концепция подтверждается также результатами локальной гелиосейсмологии [Birch, 2011]. Все активные явления на Солнце — результат взаимодействия крупномасштабных глубинных полоидальных (осесимметричных квазидипольных) полей и неосесимметричных (квадрупольных) полей. При этом имеются две области генерации магнитных полей — глубинная (тахоклина) и подповерхностные слои [Обридко, 2009].

Ряд процессов, при которых возможна генерация магнитного поля, имеет место в подповерхностном слое, на уровне $0,995R_{\odot}$, который принято называть *лентоклиной*. Здесь наблюдается колебательный режим сейсмического

радиуса, резкое изменение турбулентного давления. Есть указания на изменение радиального градиента скорости вращения на широте 50° и т. д. Именно здесь, по-видимому, и укоренено магнитное поле пятен [Lefebvre et al., 2006].

В 2005 г. Аксель Бранденбург сформулировал достоинства и недостатки тахоклинного и пространственно распределённого/подповерхностного динамо. Среди недостатков тахоклинного динамо он обратил внимание на то, что в тахоклине наблюдаются колебания с периодом 1,3 года и нет никаких следов 11-летнего цикла. Тахоклинное динамо не объясняет возникновения килогауссовых локально распределённых магнитных полей.

Среди достоинств пространственно распределённого/подповерхностного динамо А. Бранденбург [Brandenburg, 2005] упомянул наличие топологической накачки в подповерхностном слое. В недавней работе [Pipin, Kosovichev, 2011] приведена модель, в которой в подповерхностном слое реализуется топологическая накачка. Оказалось, что динамо — модель с подповерхностным шир-слоем — может удовлетворить всем требованиям по генерации общего магнитного потока механизмом динамо и в то же время способна количественно воспроизвести известные статистические свойства солнечного цикла, в частности эффекты Вальдмайера, и связь периода и амплитуды.

Таким образом, направленная вниз турбулентная накачка горизонтального магнитного поля (связанного или с тороидальной, или с меридиональной компонентами магнитного поля) даёт лучшее согласие свойств динамо с наблюдениями, увеличивая, при данном профиле турбулентной диффузии, период магнитного цикла. Модель обеспечивает асимметрию восходящей и нисходящей ветвей (как и продолжительность фаз) тороидального магнитного поля. Асимметрия растёт с увеличением градиента турбулентной диффузии в подфотосферном слое. Из расчётов следует также, что токовая спиральность меняет знак в подфотосферных слоях в начале цикла.

Именно турбулентная топологическая накачка превращает слабое диффузное поле, создаваемое глубинным тахоклинным динамо, в сильное тороидальное поле активных областей.

5. ЧТО ЖЕ ЖДЁТ НАС В БЛИЖАЙШИЕ ОДИН ИЛИ НЕСКОЛЬКО ЦИКЛОВ?

В 1985 г. рост глобального магнитного момента сменился спадом. На рис. 7 показан ход магнитного момента с 1918 по 2006 г. Зелёным цветом показан ход момента с 1918 по 1990 годы, как это было получено нами ранее [Makarov et al., 2001]. Толстая кривая показывает сглаженные по 13 оборотам средние за кэррингтоновский оборот значения, тонкая прямая представляет собой линейную аппроксимацию. Обращает на себя внимание непрерывное нарастание момента с начала XX в. Это привело к предположению о будущем нарастании солнечной активности. Однако уже тогда беспокойство вызывало падение момента после 1982 г. В дальнейшем В. Н. Обридко и Б. Д. Шельтинг (2009) провели расчёты вплоть до 2006 г. Оказалось, что этот спад продолжился. На рис. 7 сглаженные среднеоборотные значения показаны синими точками, а линейная аппроксимация — синей прямой.

В работе [Обридко, Шельтинг, 2009] высказаны соображения, согласно которым есть основания полагать, что мы приближаемся к группе низких циклов.

Расчёты, выполненные в этой работе, были подтверждены далее [Ожередов и др., 2009, 2011] и предсказана высота текущего цикла около 70 единиц.

Что касается даты предстоящего максимума, то необходимо отметить, что сама эта дата — понятие довольно неопределённое. Фактически лучше говорить о фазе максимума, которая длится один-два года, в течение которой среднемесячные значения числа солнечных пятен отличаются друг от друга не более чем на 10%. При этом указанный период совпадает с переполусовкой, т.е. с периодом, когда магнитный полюс опускается в приэкваториальную область, раствор гелиосферного токового слоя (“tilt”) превышает 70%, а глобальная нейтральная линия проходит через полюс вращения Солнца.

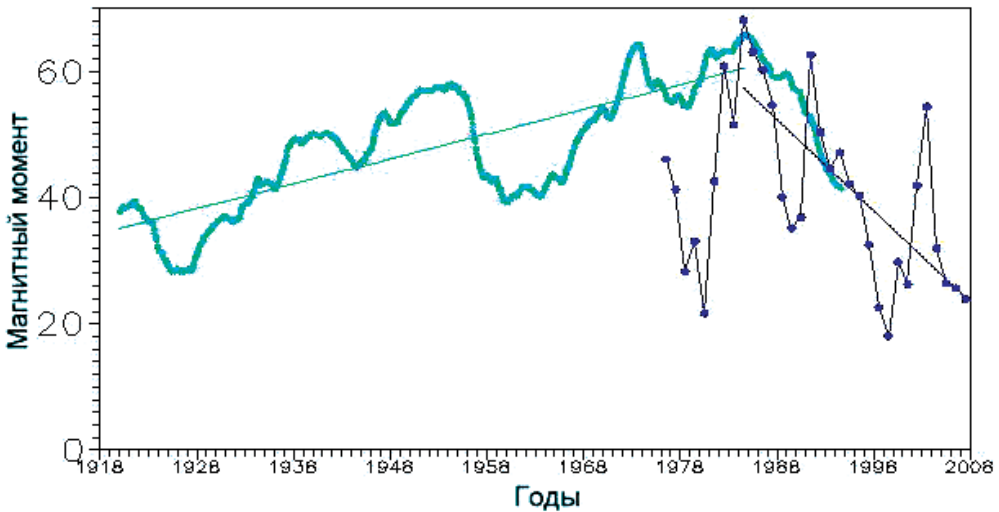


Рис. 7. Ход магнитного момента глобального солнечного диполя

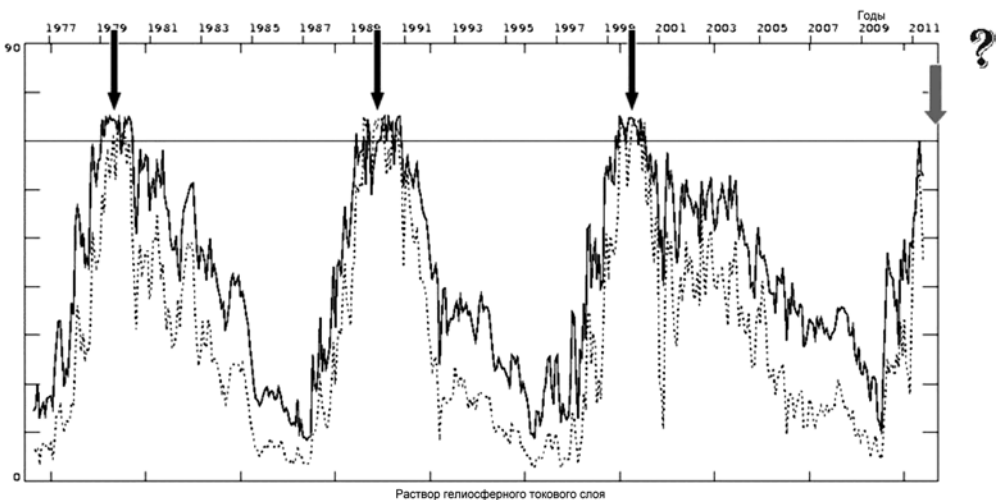


Рис. 8. График раствора гелиосферного токового слоя за 1976–2011 гг.

Согласно этим определениям, мы вступили в фазу максимума 24-го цикла ещё в конце 2011 г. На рис. 8 приведён график раствора гелиосферного токового слоя за 1976–2011 гг. Стрелками показаны моменты соответствующих максимумов. Малой толстой стрелкой отмечен наступивший в настоящее время максимум 24-го цикла.

На рис. 9 изображена структура силовых линий, как она была бы видна с северного полюса Солнца 31 декабря 2011 г. Это типичная максимальная структура.

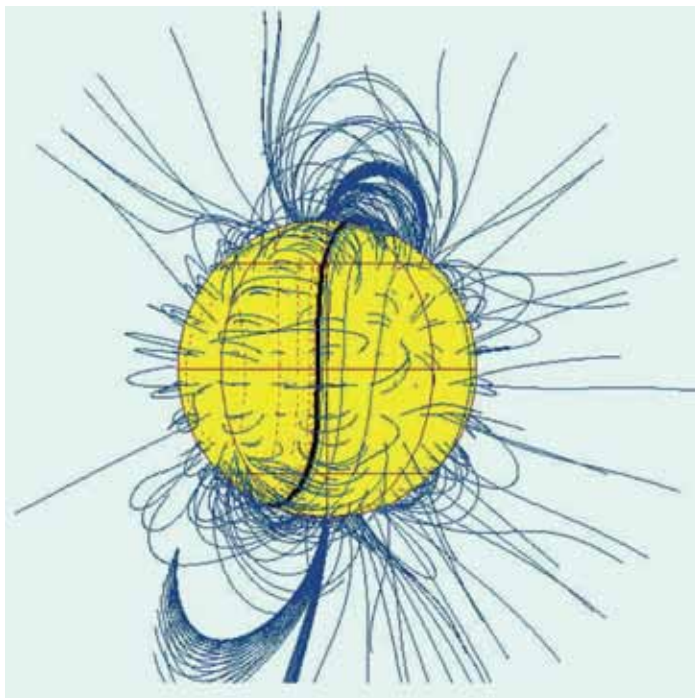


Рис. 9. Структура силовых линий, как она была бы видна с северного полюса Солнца 31 декабря 2011 г. Это типичная максимальная структура

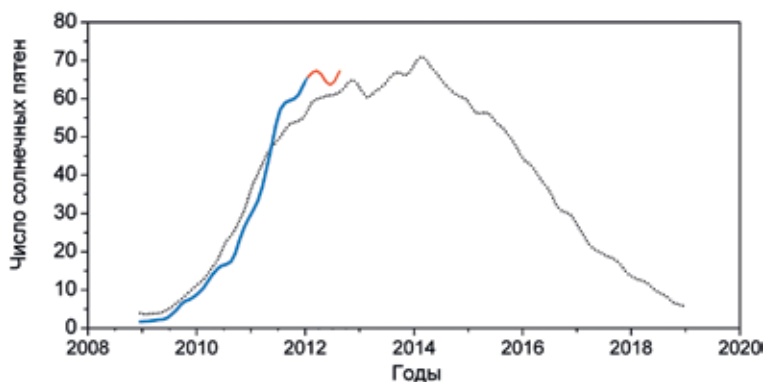


Рис. 10. Ход сглаженных месячных чисел солнечных пятен и прогноз дальнейшего поведения 24-го цикла

Наконец, на рис. 10 синей кривой показан ход сглаженных месячных чисел солнечных пятен; малой красной кривой — ход несглаженных месячных значений за последние 6 месяцев; чёрной пунктирной кривой — ход, усреднённый по трём невысоким циклам — 12–14 и 16. Видно, что данный нами [Обридко, Шельтинг, 2009; Ожередов и др., 2009, 2011] прогноз оправдывается с очень хорошей точностью. Возможно, что самое высокое значение будет достигнуто несколько позднее, но в целом двухлетняя фаза максимума продолжится с середины 2011 по середину 2013 г.

Есть все основания полагать, что 23-й цикл — не последний низкий цикл активности в начале XXI столетия. Так, в частности, Р.К. Альтрок [Altrock, 2010] показал, что в 24-м цикле отсутствует специфическая структура в короне, которую он назвал “rush to the poles”. Эта структура всегда наблюдается вблизи фазы максимума каждого цикла, и её отсутствие указывает на то, что и 25-й цикл, вероятно, будет невысоким.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, необычность 23-го цикла оказалась чрезвычайно полезной для изучения солнечной цикличности. Необычные свойства 23-го цикла осмысленным образом перешли в необычность 24-го цикла. При этом особые свойства этих двух циклов оказались весьма удобным пробным камнем для понимания природы и свойств солнечной цикличности, физических процессов её возникновения, основой для прогноза.

Диффузное поле генерируется в тахоклине, а цикл пятен — в подповерхностном слое. Общее динамо обеспечивает строительный материал для локальных полей. Именно поверхностное динамо определяет собой высоту цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-02-00259-а).

ЛИТЕРАТУРА

- [Витинский и др., 1986] *Витинский Ю. И., Куклин Г. В., Обридко В. Н.* Об основных фазах солнечного цикла // Солнечные данные. 1986. № 4. С. 53–56.
- [Гневывшев, Оль, 1948] *Гневывшев М. Н., Оль А. И.* О 22-летнем цикле солнечной активности // Астрон. журн. 1948. Т. 25. № 1. С. 18–20.
- [Лившиц, Обридко, 2005] *Лившиц И. М., Обридко В. Н.* Магнитный момент солнечного диполя на различных фазах цикла // Тр. конф. «Солнечная активность как фактор космической погоды». СПб.: ГАО РАН, 2005. С. 417–422.
- [Лившиц, Обридко, 2006] *Лившиц И. М., Обридко В. Н.* Изменения дипольного магнитного момента Солнца в течение цикла активности // Астрон. журн. 2006. Т. 83. № 11. С. 1031–1041.
- [Обридко, Шельтинг, 2003] *Обридко В. Н., Шельтинг Б. Д.* Глобальная магнитология Солнца и опорные точки солнечного цикла // Астрон. журн. 2003. Т. 80. № 11. С. 1034–1045.
- [Обридко, Шельтинг, 2009] *Обридко В. Н., Шельтинг Б. Д.* Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных магнитных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в Астрон. журн. 2009. Т. 35. № 3. С. 38–44.

- [Ожередов и др., 2009] *Ожередов В. А., Бреус Т. К., Обридко В. Н.* Сингулярный спектральный анализ в солнечно-земной физике // Bulgarian Academy of Sciences; Russian Academy of Sciences. Fundamental Space Research: Proc. Bulgaria, Dec. 2009. / Ed. Dimitar Danov. 2009. P. 184–188.
- [Ожередов и др., 2011] *Ожередов В. А., Бреус Т. К., Обридко В. Н.* Прогнозирование полного 24-го цикла солнечной активности несколькими вариантами авторегрессии и методом предвестника // Геофиз. процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 3. С. 51–65.
- [Altrock, 2010] *Altrock R. C.* The Progress of Solar Cycle 24 at High Latitudes. SOHO-23 // ASP Conf. Series. / Eds. Cranmer S. R., Hoeksema T., John L. Kohl J. L. San Francisco: 377 Astronomical Society of the Pacific, 2010. V. 428. P. 147.
- [Benevolenskaya et al., 1999] *Benevolenskaya E. E., Hoeksema J. T., Kosovichev A. G., Scherrer P. H.* The Interaction of 351 New and Old Magnetic Fluxes at the Beginning of Solar Cycle 23 // Astrophysical J. 1999. V. 517. N. 2. P. L163–L166.
- [Birch, 2011] *Birch A. C.* Progress in sunspot helioseismology // J. Physics: Conference Series. 2011. V. 271. N. 1. P. 012001.
- [Brandenburg, 2005] *Brandenburg A.* The Case for a Distributed Solar Dynamo Shaped by Near-Surface Shear // Astrophysical J. 2005. V. 625. N. 1. P. 539–547.
- [Choudhuri et al., 1995] *Choudhuri A. R., Schussler M., Dikpati M.* The solar dynamo with meridional circulation // Astronomy and Astrophysics. 1995. V. 303. P. L29–L32.
- [Choudhuri, 2010] *Choudhuri A. R.* Astrophysics for Physicists. Cambridge University Press. 2010.
- [Georgieva, 2011] *Georgieva K.* Why the Sunspot Cycle Is Double Peaked // ISRN Astronomy and Astrophysics. 2011. id.#437838.
- [Georgieva, Kirov, 2009] *Georgieva K., Kirov B.* Solar dynamo and geomagnetic activity // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. V. 73. N. 2–3. P. 207–222.
- [Harvey, 1992] *Harvey K. L.* The Cyclic Behavior of Solar Activity. “The solar cycle” // Proc. National Solar Observatory/Sacramento Peak 12th Summer Workshop. ASP Conference Series (ASP: San Francisco). 1992. V. 27. P. 335.
- [Hathaway et al., 2003] *Hathaway D., Nandy D., Wilson R., Reichmann E.* Evidence that a Deep Meridional Flow Sets the Sunspot Cycle Period // Astrophysical J. 2003. V. 589. P. 665–670.
- [Hotta, Yokoyama, 2010] *Hotta H., Yokoyama T.* Importance of Surface Turbulent Diffusivity in the Solar Flux-Transport Dynamo // Astrophysical J. 2010. V. 709. N. 2. P. 1009–1017.
- [Ivanov et al., 1999] *Ivanov E. V., Obridko V. N., Nepomnyashchaya E. V., Kutilina N. V.* Relevance of CME to the structure of large-scale solar magnetic fields // Solar Physics. 1999. V. 184. P. 369–384.
- [Karak, 2010] *Karak B. B.* Importance of Meridional Circulation in Flux Transport Dynamo: The Possibility of a Maunder-like Grand Minimum // Astrophysical J. 2010. V. 724. P. 1021–1029.
- [Karak, Choudhuri, 2011] *Karak B. B., Choudhuri A. R.* The Waldmeier effect and the flux transport solar dynamo // Monthly Notices of The Royal Astronomical. Soc. 2011. V. 410. P. 1503–1512.
- [Kopecky, 1950] *Kopecky M.* Cycle de 22 ans de l’activité solaire // Bull. Astronomical Institutes of Czechoslovakia. 1950. V. 2. P. 14–29.
- [Kuklin et al., 1990] *Kuklin G., Obridko V. N., Vitinsky Yu.* Modern Scenario of an 11 Year Cycle // Solar Terrestrial Predictions: Proc. Workshop at Leura. Australia, Oct. 16–20, 1989. 1990. V. 1. P. 474–482.
- [Lefebvre et al., 2006] *Lefebvre S., Kosovichev A. G., Nghiem P., Turck-Chièze S., Rozelot J. P.* Cyclic variability of the seismic solar radius from SOHO/MDI and related physics

- // Proc. SOHO 18/GONG 2006/HELAS I. 7–11 Aug. 2006. Sheffield, UK. / Ed. Fletcher K. Thompson M. (Sci. Ed.). [Электрон. текст]. Published on CD-ROM. 2006. P. 9.1.
- [Makarov et al., 2001] *Makarov V. I., Tlatov A. G., Callebaut D. K., Obridko V. N., Shelting B. D.* Large scale solar magnetic field and 11-year cycles of activity // *Solar Physics*. 2001. V. 198. P. 409.
- [McComas et al., 2008] *McComas D. J., Ebert R. W., Elliott H. A., Goldstein B. E., Gosling J. T., Schwadron N. A., Skoug R. M.* Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. Iss. 18. CiteID L18103.
- [Obridko, 2009] *Obridko V. N.* Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets // Proc. Intern. Astronomical Union, IAU Symp. 2009. V. 264. P. 241–250.
- [Obridko, Bumba, 1969] *Obridko V. N., Bumba V.* “Bartels active longitudes”, sector boundaries and flare activity // *Solar Physics*. 1969. V. 6. N. 1. P. 104–110.
- [Obridko, Gaziev, 1992] *Obridko V. N., Gaziev G.* Some comments to the problem of extended cycles in large scale magnetiv fields. “The solar cycle” // Proc. National Solar Observatory, Sacramento Peak 12 Summer Workshop / Ed. K. L. Harvey. 1992. V. 27. P. 187–188.
- [Obridko, Shelting. 1992] *Obridko V. N., Shelting B. D.* Cyclic variation of the global magnetic field indices // *Solar Physics*. 1992. V. 137. N. 1. P. 167–177.
- [Obridko, Shelting. 1999] *Obridko V. N., Shelting B. D.* Structure and Cyclic Variations of open Magnetic Fields in the Sun / *Solar Physics*. 1999. V. 187. P. 185–205.
- [Obridko, Ermakov, 1989] *Obridko V. N., Ermakov F.* Solar Cycle 21 in Heliomagnetic Indices // *Astron. Tsirk.* 1989. N. 1539. P. 24–26.
- [Obridko et al., 1989] *Obridko V. N., Shelting B., Yermakov F.* The Structure of the solar cycle // *Astron. Tsirk.* 1989. N. 1540. P. 23–24.
- [Parker, 1993] *Parker E. N.* A solar dynamo surface wave at the interface between convection and nonuniform rotation // *Astrophysics J.* 1993. Pt. 1. V. 408. N. 2. P. 707–719.
- [Passos, Lopes, 2009] *Passos D., Lopes I.* Grand minima under the light of a low order dynamo model. 2009arXiv0908.0496P.
- [Passos, Lopes, 2011] *Passos D., Lopes I.* Grand minima under the light of a low order dynamo model // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. V. 73. N. 2–3. P. 191–197.
- [Pipin, Kosovichev, 2011] *Pipin V. V., Kosovichev A. G.* The Asymmetry of Sunspot Cycles and Waldmeier Relations as a Result of Nonlinear Surface-shear Shaped Dynamo // *Astrophysics J.* 2011. V. 741. N. 1. article id. 1.
- [Ruediger, Brandenburg, 1995] *Ruediger G., Brandenburg A.* A solar dynamo in the overshoot layer: cycle period and butterfly diagram // *Astronomy and Astrophysics*. 1995. V. 296. P. 557–556.
- [Tobias, Weiss, 2007] *Tobias S., Weiss N.* The Solar Tachocline / Eds. Hughes D. W., Rosner R., Weiss N. O. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [Tokumaru et al., 2009] *Tokumaru M., Kojima M., Fujiki K., Hayashi K.* Non-dipolar solar wind structure observed in the cyce 23/24 minimum // *Geophysical Research Letters*. 2009. doi:10.1029/2009GL037461.
- [Usoskin et al., 2001] *Usoskin I. G., Mursula K., Kovaltsov G. A.* Was one sunspot cycle lost in late XVIII century? // *Astronomy and Astrophysics*. 2001. V. 370. P. L31–L34.
- [Usoskin et al., 2003] *Usoskin I. G., Mursula K., Kovaltsov G. A.* The lost sunspot cycle: Reanalysis of sunspot statistics // *Astronomy and Astrophysics*. 2003. V. 403. P. 743–748.
- [Wang et al., 2002] *Wang Y.-M., Sheeley N. R. Jr., Lean J.* Meridional Flow and the Solar Cycle Variation of the Sun’s Open Magnetic Flux // *Astrophysics J.* 2002. V. 580. P. 1188–1196.
- [Yeates et al., 2008] *Yeates A. R., Nandy D., Mackay D. H.* Exploring the Physical Basis of Solar Cycle Predictions: Flux Transport Dynamics and Persistence of Memory in Advection-versus Diffusion-dominated Solar Convection Zones // *Astrophysics J.* 2008. V. 673. N. 1. P. 544–556.

CYCLES OF SOLAR ACTIVITY: THE STATE OF THE ART OF THE PROBLEM, BASIC MECHANISMS, AND FORECAST

V. N. Obridko

N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia,
e-mail: obridko@izmiran.ru

Now and again, the Sun sets new problems before the astronomers. One of such problems is the abnormal behavior of solar activity during the past, 23rd cycle. Even now, it is not clear whether the anomalies have ceased with the beginning of the new cycle 24 or we are still facing a long period of low solar activity. The anomalies in question have manifested themselves in various parameters, such as the sunspots per se, the number and intensity of coronal mass ejections, extraordinary brightness distributions in the corona, solar wind parameters, the persistent big low latitude coronal holes, etc.

We suppose to discuss following problems:

- What are the characteristics of solar activity that display abnormal behavior? Is it possible that we are on the threshold of a strong decrease of solar activity? Were analogous episodes in the history of solar activity? What are the similar features and differences between the activity cycles in the Sun and stars?
- Are the present-day theories able to account for strong variations in the height of the cycles (up to an order of magnitude) on one and the same star? Is it possible to predict the heights and peculiarities of the cycles on the basis of the dynamo theory?
- Are there additional arguments for the influence of planets on solar activity?
- What is to be expected in future? Is there an opportunity to improve the forecast of solar activity?

SOLAR GEOEFFECTIVE PHENOMENA: ACTION ON THE ENVIRONMENT SPACE AND THE POSSIBILITY OF THE FORECAST

V. N. Ishkov

N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia, e-mail: ishkov@izmiran.ru

Solar studies of past century did not leave doubt, that the geoeffective phenomena in the Sun, which dynamically influence the state of environment space, are the large flare events and coronal holes. To the class of flare phenomena we carry solar flares with emission in all ranges of electromagnetic spectrum and entire spectrum of the mass motion dynamic manifestations with all associating those phenomena. The agents, which cause the disturbances environment, are: the coronal mass ejections being the consequence of active processes in flares and solar filament ejection; the high-speed streams of the solar plasma, which follow behind the shock wave from the large solar flare events or escaping from the regions with the open configuration of magnetic field. The complete chain of disturbances in environment from the separate large flare event can be presented in the form three separate stages of the action: — electromagnetic impact disrupts radio connection in the ionosphere because of an increase in the radiant flux in the ranges UV and the soft X-ray; corpuscular impact solar proton events increase the level of the radiation danger, when the intrusion of the significant fluxes of the solar charged particles occurs; plasma impact magnetic storms: the disturbances in the geomagnetic field, which are caused by arrival in environment of the excited structures of solar wind. The forecast of the disturbances beginnings in environment and their duration is possible for the period from 1 to 5 days, and coronal holes for the period of one solar rotation (27,3 days). This gives the possibility to plan different kind technological, biological and medical experiments and shielding measures for the command and the instruments of space laboratories.

INTRODUCTION

The beginning of the Space Age became new step in a matter of the Earth studies in the broad sense, from it depths of up to the boundaries with the heliosphere both by the ground-based instruments and established on board scientific spacecraft. Integration of observations on the Earth and in the space within the framework of the International Geophysical Year (1957–1958) gave this push to entire science, that its development follows precisely the path of comparison and calculation of measurements in space and by measurements by ground-based tools.

In this paper we mean for environment space the region beginning from heights 50...60 km above the Earth and extending to distances of tens of Earth radii up to the interface with the heliosphere; in the heliosphere, the material that fills it is still connected to our planet, not with the Sun or any other celestial body. It is clear that in this region we deal mainly with natural plasma.

With the development of studies in Sun-Earth physics is alien understanding the fact that the basic action on environment renders Sun itself and active phenomena in its atmosphere. In turn a quantity and the power of such phenomena depend on the characteristics of the concrete cycle of solar activity, in which they occur.

1. CYCLIC RECURRENCE OF SOLAR ACTIVITY

By the solar activity (SA) it is accepted to call entire totality of the observed phenomena in the atmosphere of the Sun, which produce fluctuations of its radiation in different ranges of electromagnetic waves and particle fluxes of different energies.

State SA is characterized by observant indices; the prolonged number has the relative number of sunspots (W). This index is for the first time introduced by R. Wolf, and he is determined since 1849 (reliable series $W1$), when constant observations of sunspots began to conduct several observatories in Europe. This year is considered the beginning of the scientific observations of the Sun. Furthermore, Wolf restored the monthly values of this index since 1749 (numbered series, $W2$) and average annual since 1700 according to the partial data of individual European observers. Contemporary researchers according to published data qualitatively prolonged this number until 1610 (Figure 1).

In practice all researchers used a series $W2$, and many and entire known, without taking into account their authenticity. Therefore in [Ishkov, Shibaev, 2006] was carried out the comparison of series $W1$ and $W2$ and their agreed was checked. The validity of this emphasized the spectral estimation of the centenary intervals [1749–1849], [1799–1899], [1849–1949] and [1899–1999], the shown qualitative proximity of the spectral harmonics of three last intervals and their distinctive nature in the first interval, which is clearly characterized by position and value of fundamental harmonic and its spectral width. The nature of the behavior “instantaneous” frequencies and envelopes in restored interval of 1749–1849 and the essential distortion of the high-frequency part of the spectrum raise the question about the impossibility of using this interval for scientific studies.

One of the most remarkable special features of the Sun is regular, almost periodical changes in the solar indices — cycles SA. The basic task of solar cycle’s studies is the construction of the model of its changeability in the course of time, the development of the basic physical laws of describing SA as a whole and, being based on the obtained results, the prognostication of the subsequent cycles of solar activity. For the correct solution of these problems it is necessary to be confident in the utilized reliable observant material and to know conditions and limits of the applicability the restored series of observations. Of the aforesaid above follows the uncomfortable conclusion that for scientific studies a series of 14 cycles SA, which covers one-and-a-half centuries, is accessible to us.

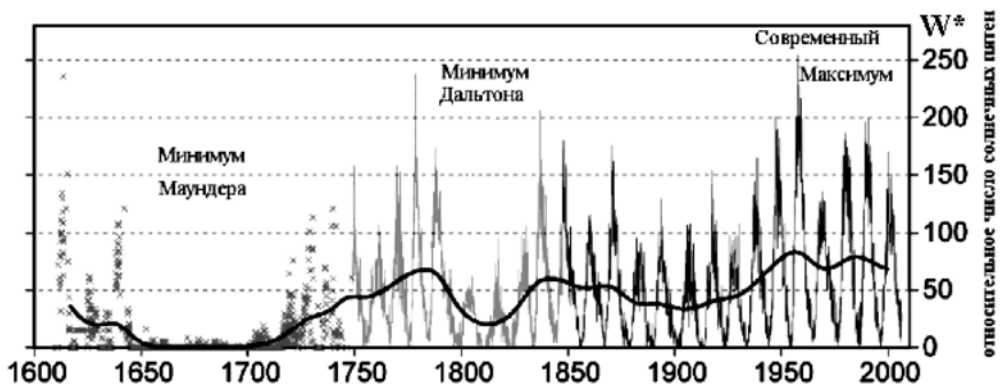


Figure. 1. Complete series of sunspots observations. Modify figure from Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png). By black solid line is represented reliable series ($W1$), by gray solid line restored until 1749. ($W2$) the series of Wolf numbers. By small crosses — scarcely reliable series, restored on the basis of the separate literary sources and using the archive materials

The insufficiency of knowledge about the properties of cyclic recurrence SA is manifested in the fact that each new cycle either changes the boundaries of already known characteristics or it manifests the new, unexpected properties.

At the present moment (August 2012) SA corresponds to the phase of solar cycle 24 maximum – possibly, the first low solar cycle after the period of 4 high cycles of SA (18, 19 – super cycle, 21 and 22), divided by the typical according to the general characteristics solar cycle of average value (20). Since the beginning of 22 solar cycle in the layers of the convective zone of the Sun, demanding for the formation of sunspots, occurred reconstruction of the regime of sunspot-formation, which brought in 23 cycle SA to the significant weakening of the maximum values of magnetic field strength in the umbra of sunspots and, possibly, to weakening of the average magnetic field of active regions (AR). The consequence of this became reduction in the threshold of the output of high-energy solar protons, which led to the significant increase in the total number of solar proton events, including of ground level event (GLE) in comparison with by the previous 4 cycles of solar activity. Is possible, this consequence of coronal mass ejection quantity increase of in current cycle both from the solar flare events (flare, the solar filament ejections) and from the smaller events of flare nature, formally not reached the level of flares. It suffices to say that into the calmest spotless days, the quantity of weak coronal mass ejections there was not less than 10 events in the week.

2. LAST MINIMUM OF SOLAR ACTIVITY

Within the framework this investigation most interesting is represented the period of the phase of minimum 23–24 cycles of SA, which was begun in May 2005 and lengthened prior to the end 2010 [Ishkov, 2009]. This first very deep and protracted minimum of SA since the beginning of the Space Age (the last deep minimum it was observed between 14 and 15 solar cycles) raised in the agenda the questions of the background characteristics of SA study and its reflection in the interplanetary space and, in particular, in environment. It is necessary to note that during this minimum the researchers obtained two periods with the very high flare activity (IX of 2005 and XII of 2006 +5.5 and +6.6 years after maximum). These two flare-active regions on the flare potential occupy 4 and 20 place among most productive AR in the last 4 solar cycles. Middle (2007–2009) of the minimum phase gives the possibility to estimate and to analyze solar active phenomena under the conditions for the minimum generation of solar magnetic fields. Sun during 820 days (on April 2011) it was without the sunspots, although in the normal solar minimum of such spotless days in average 486. Greatest interval of the lowest values during entire history of the radio observations of the Sun (since 1947) the flux of radio emission 10.7 cm; it is noted precisely in this minimum, in July 2008 – February 2009 it remained at the level of ~68 of sfu.

According to the data of satellite VIRGO [Fröhlich, 2009] the level of solar constant with 2007 on the end of 2009 was held on the lowest value in all time of the exoatmospheric measurements of the given quantity. Value of complete radiation of the Sun (solar constant) on 1 AU it is more than on 0.2 W/s² it was lower than during the last solar minimum (1995–1997). It follows from the article [Gibson et al., 2009] that the observations of the Sun and solar wind of solar poles (Ulysses) and in the ecliptic show the significant differences between the current solar minimum and

the past. The area of polar coronal holes substantially decreased and magnetic flux on the surface of the Sun at the poles to 40 % is weaker in comparison with the past minimum SA. The average tension of magnetic field in the solar wind in environment became lower by 15 % and density (~ to 45 %). However, the speed of solar wind near the Earth grew on the average by 13 %. Furthermore, there was occurred complete reconstruction of the characteristic periods of natural oscillations both in the characteristics of solar wind and in the indices, which characterize auroral zone and radiation belts.

Existence of large equatorial coronal holes (CH) was tightened on the time for entire period of the 23 solar cycle minimum phase. The high-speed streams of solar wind from these CH's became more intensive, more prolonged, but average particle density in them significantly fell and therefore the level of their geoeffectivity, exposure to environment it became weaker. In response to this, the number of geomagnetic disturbances, which reached the level of magnetic storms sharply, fell, and the smoothed value of Ap index reached minimum only in September 2009. If in last year of solar cycle 23 from 62 solar coronal holes are noted 17 minor magnetic storms (+2 from the flare phenomena), then in the first year of the current solar cycle 24 from 38 solar coronal holes it was only 2. At the same time practically all high-speed streams of coronal holes were regularly recorded by sciences spacecraft ACE (Advanced Composition Explorer). The decrease of the average magnetic field strength of heliosphere led to the fact that the fluxes of galactic cosmic rays in the heliosphere considerably grew [Ebert et al., 2009] and on the measurements of the iron nuclei with the energies 270...450 MeV/nucleon this increase reached 20 % of the past maximum values.

All given in the article data show that the last minimum SA allows to assume that we finally were obtained the background values of the parameters which describing the state of Sun – Earth system in the absence any flare phenomena and it is necessary to continue work on study and systematizations of obtained data. Working experiments, observations and studies, carried out in this period, will make it possible to estimate the action of background solar activity on the biosphere and the health of people.

3. GEOEFFECTIVE SOLAR PHENOMENA

3.1. Solar flares

Solar flares are the reaction of solar atmosphere to the rapid process of magnetic nature energy release, which leads to the sharp local heating of all layers of solar atmosphere, generation of the electromagnetic radiation over a wide range of wavelengths from the γ -quanta ($2 \cdot 10^{-11}$ cm) to the kilometer radio waves (10^6 cm), and also to the acceleration of electrons, protons and heavy ions. Flare phenomena — this is entire totality of the dynamic phenomena in the Sun, which are been the consequence of the new emergence magnetic flux interaction with the already existing magnetic fields both in the active regions and outside them. Observations showed that an increase in the flare activity in the sunspot groups is tightly connected with the advent of the new emergence magnetic fluxes and for the realization of the solar flares of large and average importance were necessary the changes in structure itself active region [Feynman, Martin, 1995; Ishkov, 1998]. For the realization of large solar flares it is necessary that the new magnetic flux would be sufficient to large ($>10^{13}$ Wb), and the

speed of its emergence was $\geq 10^9$ Wb/s. A rapid growth of the sunspot group area, the significant increase in the number of sunspots and the rapid complication of active region magnetic and three-dimensional structure (Figure 2), the significant increase in the background of soft X-ray and radio flux — here are the basic signs of the new magnetic flux emergence [Ishkov, 1998]. The flares of large and average importance in active regions always (without the exceptions) are grouped in a series, corteges and are realized into the limited, sufficiently short time interval. Depending on the degree of active region development, characteristics of its magnetic field and power of the new emerging magnetic flux this time interval can occupy from 16 to 80 hours, on the average of 55 ± 30^h or 16 % of transit time of the active region on the solar visible disk. It is very important to note: in this time interval all solar flares of large and average class occurs. The period of the realization of large solar flares comes 1...2 days after the detection of the new emerging magnetic flux in the active region boundaries. So that in this active region would occur another series of large flares, the emergence of new magnetic flux is necessary.

The most flare-productive active regions (Table 1) are more frequently appear at the phase of the decrease SA and the series of powerful flare events in them exerts extreme influence on the environment space. Below in Table 1 are given characteristics of August 1972 flare active region; in which were occurred two undoubtedly extreme solar flares. It is here necessary to note that in the X-ray photometer of the geostationary satellites of the series GOES, according to data of which since

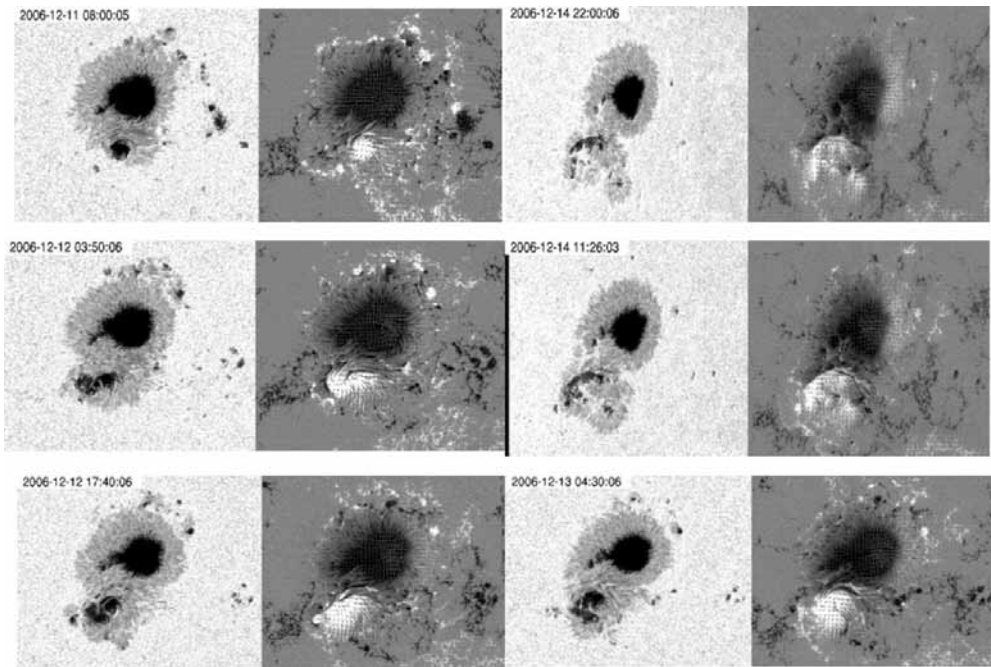


Figure 2. The example of the new magnetic flux on December 11 to 14, 2006 emerges at the level of photosphere and in the magnetic field. Time in the left pair of figures goes from top to bottom, and in the right — from bottom to top. The configuration for 14.12.2006 was restored after the realization of flares. From the observations of space solar observatory HINODE (<http://www.nesl.ucar.edu/LAR/2007/strategic-priorities/sp6/index.php>)

1970 is determined the X-ray class of solar flares, repeatedly changed the threshold of the maximum measured intensity of the soft X-ray in the range of energies (1...12.5 keV = 1...8 Å). Until 1976 the threshold of the photometer saturation corresponded to the X-ray class X5.4 and therefore famous solar flares August 4 and 7, 1972 had formal class X > 5.4. Prior to the beginning of geostationary satellite GOES 9 work threshold corresponded to the X-ray class X12.5, and afterward, in solar cycle 23, threshold grew to X17.5. Accordingly, for most powerful flares, whose rate of occurrence exceeded the threshold indicated, X-ray class was determined conditionally: it is proportional to the time of the instrument cutoff. Therefore more objectively to characterize the X-ray class of such flares with saturation not only threshold value of the instrument saturation, but also duration of the time interval of the instrument cutoff (τ). By this it is explained, that the flare index, which is calculated from the X-ray class X (flux of the soft X-ray radiation $> 10^{-4}$ W/m²) and M ($\geq 10^{-5}$... $< 10^{-4}$ W/m²) for most highly productive flare active regions shows lower limit. Under point 4 in Table 1 is given the complex of active regions, whose flare activity can be examined only together, were too closely located the active regions, entering it. Therefore practically all larger flares occurred immediately in both components.

Table 1. The most powerful flare-active regions 1986–2007

N.	CMP	AR	Φ°	L°	Sp_{max}	R, S, G	XRI	$M \pm y$
1	09.09.1991	6659	N31	248	2300	R5/S4/G4	>86.5	+2
2	2.10.2003	10486	S17	354	2610	R5/S5/G5	>62.56	+3.5
3	12.03.1989	5395	N34	257	3600	R5/S4/G5	57.0	-0.5
4*	16.12.1982	4025+26	S06–S09	L089–L77	640	R5/S/G2	>36.56	+3.3
5	13.03.1991	6555	S23	188	2530	R4/S5/G5	32.6	+1.5
6	14.07.1982	3804	N14	L322	500	R5/S/G5	>28.73	
7	10.04.2001	9415	S22	359	880	R4/S3/G5	28.73	+1
8	15.07.1978	1203	N18	L169	470	R5/S/G1	>27.09	
9	08.08.1989	5629	S17	076	1320	R5/S4/G3	≥ 26.8	-0.5
10	28.03.2001	9393	N20	152	2440	R5/S2/G5	>25.74	+1
11	17.05.1990	6063	N34	321	940	R4/S3/G2	23.1	+1
12	12.01.1989	5312	S31	308	1800	R3/S1/G2	22.4	-0.5
13	15.01.2005	10720	N09	177	1630	R4/S3/G4	21.5	+4.7
14	11.12.2006	10930	S06	009	680	R4/S2/G4	20.8	+6.6
XX	04.08.1972	0331	N12	010	1330	R5/S5/G5	>26.0	+3.5

An illustration said above it is Figure 2, which presents the emergence of new magnetic flux in December 2006 active region. New magnetic flux appeared at the end of day on December 11 directly near the small sunspot of positive magnetic polarity.

In the magnetic field (2 and 4 columns) rapid changes are visible and small sunspot first doubles, changes its form and further it is decomposed into several fragments. Entire process engaged the approximately 48 hours, for which in the sunspot

group, between the large and small sunspots were occurred by two large proton solar flares X3.2 at December 13, and X1.4 at December 14, 2006.

CMP — transit time of the central meridian; AR — number of active region in the system NOAA; Φ° — AR's average latitude; L° — AR's average Carrington longitude; XRI — index of flare productivity of AR; R, S, G — degree of this AR solar flares action on environment (see it is below); $M \pm y$ — the time (in the years) of this AR appearance from the point of corresponding solar cycle maximum (accuracy 0.5 year). Italics noted ARs of solar cycle 23.

3.2. Solar filament ejections

Still one solar active phenomenon, disturbance from which exerts direct influence on environment, is the solar filament ejections. Solar filaments are clouds of dense and cooler (than the surrounding corona) plasma, which take in the magnetic field of the solar atmosphere the form of structures extended along the polarity reversal line. Typical sizes are 60...600 thousand km into the length, 15...100 thousand km into the height even 4...15 thousand km into the width. The basic share of filament or channels of filament (initial and, possibly, final of the filament evolution stage) they designate magnetic field neutral line along the entire solar surface. Since active regions are always bipolar structures, they either are formed in the regions on both sides from the magnetic neutral line or their formation entails reconstruction of large-scale magnetic field, and the dividing line of polarities nevertheless occurs inside active regions. Accordingly filaments in effect always are present in all active regions, when directly in the form of the filament, when in the form of the filament channel depending on complexity and magnetic field strengths in active regions. The ejections of solar filament on the observations with a good resolution, beginning from the lift of filament rapidly are formed two ribbons, which are drawn out along the dividing line of the polarities, that by previously designated by filament, on which through tens of minutes are formed flare arched structures — typical picture of two-ribbon flare. I.e., the ejections of filaments out of active regions can be represented as flares with slow increase of the intensity to maximum ($>1^h$) and significant decay time in the intensity ($>3^h$). The large flares in active region are very frequently accompanied by the ejections of the filaments, which or precede flare itself (very rarely), but, if there is a complete series of the flare process observations, filament is ejected in the process of flare.

3.3. Coronal holes

The extensive regions in the solar corona with the lowered density and the temperature, the emissions in the extreme UV, the soft X-ray and microwave radiation bands characterized by scarcity call the coronal holes. A large coronal hole usually exists during 4—8 solar rotations virtually without changing its position. However, its visible boundaries may displace by up to 20 degree/day, changing its sizes or moving it as a whole. Coronal holes are regions in the solar atmosphere with a magnetic field open to the interplanetary space; from them, solar plasma freely outflows to the heliosphere, forming high-speed streams of the solar wind with typical speeds 500...700 km/s with those increased by magnetic field, by density and by temperature. In transit through this high-speed stream the magnetosphere of the Earth interacts

with it, respond by geomagnetic disturbance. Coronal holes the most long-life geoeffective phenomena in the sun are the sources of recurrent magnetic storms.

4. SPACE WEATHER

By term “SPACE WEATHER” at present is understood the state of the magnetosphere, ionosphere, troposphere, thermosphere of all layers of environment space in any assigned interval of time, which is determined by active phenomena in the Sun. The electromagnetic disturbances from flare events appear virtually at the instant of the process development; corpuscular and plasma disturbances from solar geoeffective phenomena (flare events, coronal holes) propagating in the heliosphere, through the solar wind, affect the magnetospheres of planets, their satellites, and comets, causing considerable deviations from the background quiet state in nearly all layers of the considered objects.

The full chain of disturbances from the separate large flare event it is possible to present in the form three separate stages actions (http://sec.noaa.gov/NOAA_scales), which consistently are implemented in environment. First, at the moment of geoeffective solar flare development, environment irradiates by the fluxes of electromagnetic radiation (**R** — electromagnetic impact). Then, through the temporary space from several minutes to 10 hours in environment come the fluxes of the solar charged particles (**S** — corpuscular impact — solar proton event) and finally in 17...96 hours in environment come the streams of plasma, increased speed, density and temperature (**G** — plasma impact), causing disturbances in the terrestrial magnetic field — the magnetic storms. Let us note that the solar filament ejections and coronal holes cause in environment only magnetic disturbances.

According to this classification is introduced the five levels or categories of the intensity estimation each actions, which is given in Table 2.

Table 2. The scale of space weather NOAA

Level	R X-ray class of solar flare	S Proton fluxes, E > 10 MeV	G Magnetic storm, Kp
5 — extreme	>X20 ($2 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^{-2}$)	>100 000 pfu	9
4 — severe	>X10 (10^{-3} W/m^{-2})	>10 000 pfu	8 and 9–
3 — strong	>X1 (10^{-4} W/m^{-2})	>1000 pfu	7
2 — moderate	>M5 ($5 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^{-2}$)	>100 pfu	6
1 — minor	>M1 (10^{-5} W/m^{-2})	>10 pfu	5

The scale of event (**R**) is the flux of soft X-radiation in range 1...12.5 keV; the scale of event (**S**) is the flux of protons with the energy >10 MeV; the scale of event (**G**) is the value Kp index of geomagnetic disturbances.

Electromagnetic impact reaches environment at the speed of light, i.e., at the instant of the development of a solar flare. During its effect in short-wave ranges of electromagnetic radiation the flux increases by several orders of magnitude relative to the background values. For instance, in soft X-rays (1...8 Å, 12.5...1 keV) the flux

increase can reach four orders. As a consequence, immediately at the instant of a flare development (timescale of the disturbance development is a few minutes after the beginning of the flare) sudden ionospheric disturbances develop in environment space, causing a complete radio silence in the range of high frequencies at the day-side of the Earth (Figure 3); its duration reaches several hours, upsetting the radio communication with ships and airplanes. In the range of low frequencies at the day-side of the planet, errors in positioning systems of ground-based objects and satellites sharply increase and are accumulated during many hours. A quantity of events changes from R1 for the flares of the X-ray class M1 (to 2000 events to the cycle), to R5 for the most powerful flares, whose X-ray class $X \geq 17.5$ (1–2 events in the cycle of solar activity). Table 5 is given solar extreme flare events in 3 solar cycles, which caused the most powerful sudden ionospheric disturbances on the day side of the Earth.

Table 3 is given solar extreme flare events in 4 solar cycles, which caused the most powerful sudden ionospheric disturbances on the day side of the Earth.

By simple type are given extreme events 20 and 21, semi-fat — 22 and italics of 23 cycles of solar activity.

Corpuscular impact. Ejection of energetic solar particles (protons, electrons, neutrons), which, reaching environment, are cause solar proton events (SPE) (Figure 4). Invasions of high-energy solar particles ($E_{pr} > 10$ MeV) sharply raise the level of radiation hazard to astronauts, crews and passengers of high-altitude airplanes at high latitudes, result in losses of satellites and in failures of scientific and navigation instruments on space objects, interrupt short-wave communication in subauroral regions, and provoke a sharp increase in positioning system errors. This results in serious problems in positioning of ground-based and space objects. The timescale of the SPE onset with respect to the beginning of a proton flare is a few hours, though particles with GeV energies arrive to the Earth at the speed of light.

To describe SPE in environment space, a five-grade scale of the protons flux assessment with energies $E > 10$ MeV has also been introduced: from S1 for a proton flux of $10 \text{ particles s}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ (up to 50 events per cycle) to S5 for a proton flux by four orders of magnitude greater (less than one event per cycle).

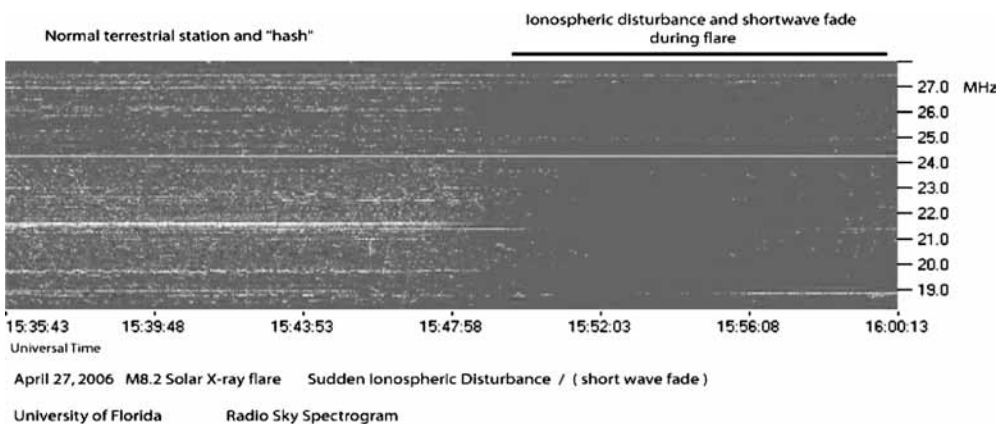


Figure 3. Practically complete wireless silence during the realization of large solar flare on April 27, 2006 because of the sudden ionospheric disturbance ([http://: www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com))

Table 3. Extreme solar flare events, which caused in environment the disturbance R5 for 20–23 cycles of solar activity

Rank	Y/M/D	X-ray class	τ	Localization	AR
1	1991/06/01	X>12.5	26 ^m	N25E90L248	6659
1	1991/06/06	X>12.5	26 ^m	N33E44L248	6659
1	2003/11/04	X>17.5	11 ^m (X28)	S19W83L286	10486
2	1991/06/15	X>12.5	22 ^m	N33W66L248	6659
3	1991/06/04	X>12.5	19 ^m	N30E70L248	6659
4	1991/06/11	X>12.5	17 ^m	N32W15L248	6659
4	1972/08/07	X>5.4	>30 ^m ?	N14E40L010	0331
4	2001/04/02	X>17.5	?(X20)	N19W90L152	9393
4	1989/08/16	X>12.5	?	S15W85L	5629
5?	1972/08/04	X>5.4	?	N15E09L010	0331
5	2003/10/28	X17.2		S16E08L286	10486
6	2005/09/07	X17.1		S06E89L229	10808
6	1989/03/06	X>12.5	?(X15)	N33E71L	5395
6	1978/07/11	X>12.5	?(X15)	N18E45L170	1203
6	2001/04/15	X14.4		S20W85L001	9415
7	1984/04/24	X>12.5	?(X13)	S11E45L334	4474
7	1989/10/19	X>12.5	?(X13)	S25E09L	5747
7	1982/12/15	X>12.5	?(X12.9)	S09E24L077	4026
8	1982/06/06	X12.0		S10E25L086	3763
9	1991/01/25	X10.7		S12E90L	6471
10	1982/12/17	X10.1		S08W20L089	4025
10	1984/05/20	X10.1		S07E53L357	4492
11	2003/10/29	X10.0		S15W02L286	10486
12	1991/06/09	X10.0		N32E13L248	6659

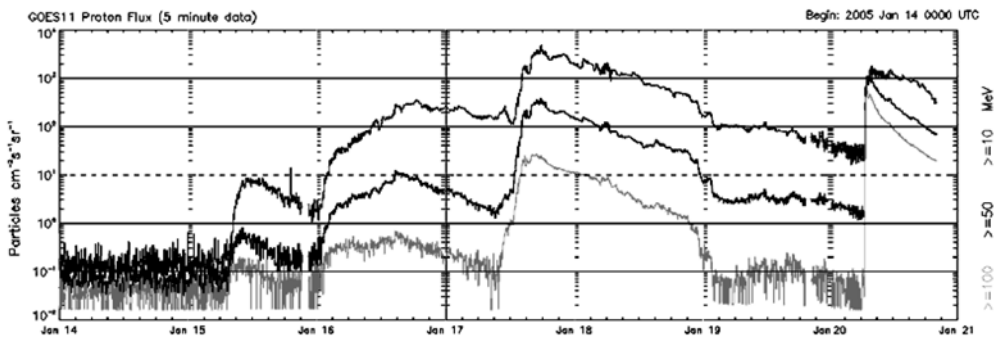


Figure 4. Flux of solar high-energy protons in January 2005 from the large solar flares in one active region according to the data of geostationary space observatory GOES-11. (<http://www.swpc.noaa.gov>)

Table 4 gives the list of extreme and large ($>2 \cdot 10^3$ particles \cdot s $^{-1}\cdot$ ster $^{-1}\cdot$ cm $^{-2}$) proton events in all time of observation and their sources in the Sun. The first three events, possibly, had a mark S5, but they were observed not by standard instruments. By the intensity S5 thus far it is not registered after the beginning of the Space Age.

Table 4. The most intensive solar proton events in 20–23 cycles (modification of table from Miroshnichenko, 2003)

N.	Y/M/D	Energy MeV	Flu, I_m , cm $^{-2}\cdot$ s $^{-1}$ ster $^{-1}$	Observations	Flare importances	Localiza-tion	AR	NOAA SW level
1	1949/11/19	>435	$4.1 \cdot 10^1$	IC	3+	S02W70		?S5
2	1956/02/23	>435	$2.5 \cdot 10^2$	IC, NM	3	N23W80		?S5
3	1959/07/15	>88	$2.4 \cdot 10^2$	BALLOON	3+	N17E07		?S4
4	1972/08/04	>10	$8.6 \cdot 10^4$	MET	X>5/3B	N14E09	0331*	S4
5	1991/03/22	>10	$5.0 \cdot 10^4$	MET, GOES	X9.4/2B	S26E28	6555*	S4
6	1989/10/19	>10	$3.9 \cdot 10^4$	MET, GOES	X>12,5/3B	S25W09	5747	S4
7	2001/11/04	>10	$3.17 \cdot 10^4$	GOES	X1/3B	N06W18	9684	S4
8	2003/10/28	>10	$2.95 \cdot 10^4$	GOES	X17.2/4B	S16E08	10486*	S4
9	1961/07/12	>10	$2.5 \cdot 10^4$	PCA	3+	S07E22		S4
10	2000/07/14	>10	$2.4 \cdot 10^4$	GOES	X5/3B	N22W07	9077	S4
11	1960/11/12	>10	$2.1 \cdot 10^4$	PCA	3+	N26W05		S4
12	1960/11/15	>10	$2.1 \cdot 10^4$	PCA	3+	N26W33		S4
13	2001/11/22	>10	$1.89 \cdot 10^4$	GOES	M9/2N	S15W34	9704	S4
14	2000/11/8	>10	$1.48 \cdot 10^4$	GOES	M7.4/3F	N10W77	9213	S4
15	1992/10/30	>10	$1.37 \cdot 10^4$	MET, GOES	X1/2B	S22W61	7321	S4
16	2001/09/24	>10	$1.3 \cdot 10^4$	GOES	X2/2B	S16E23	9632	S4
17	1989/08/12	>10	$9.20 \cdot 10^3$	GOES	X2.6/2B	S16W38	5629*	S3
18	1994/02/20	>10	$6.98 \cdot 10^3$	MET, GOES	M4/3B	N09W02	7671	S3
19	2012/03/07	>10	$6.53 \cdot 10^3$	GOES	X5.4/3B	N17E27	11429	S3
20	2012/01/23	>10	$6.31 \cdot 10^3$	GOES	M8.7/2B	N28W21	10402	S3
21	2005/01/17	>10	$5.04 \cdot 10^3$	GOES	X2.6/3B	N15W05	10720*	S3
22	1992/05/08	>10	$4.55 \cdot 10^3$	MET, GOES	M7.4/2N	S25E07	7154	S3
23	1989/09/29	>10	$4.50 \cdot 10^3$	MET, GOES	X9.8/2N	S32W90	5698	S3
24	1989/11/30	>10	$4.34 \cdot 10^3$	MET, GOES	X2.6/2N	N25W52	5800	S3
25	1989/03/08	>10	$3.50 \cdot 10^3$	MET, GOES	X>12.5/3B	N33E71	5395*	S3
26	2005/05/14	>10	$3.14 \cdot 10^3$	GOES	M8.0/2B	N12E11	10759	S3
27	1991/06/11	>10	$3.00 \cdot 10^3$	MET, GOES	X>12.5/2B	N32W15	6659*	S3
28	1982/07/13	>10	$2.90 \cdot 10^3$	GOES	X7.1/3B	N11E36	3804*	S3

IC — ionization chambers; BALLOON — balloon measurements; NM — neutron monitors; PCA — fluxes are converted on the radio wave absorption in the polar cap; MET — geostationary satellites of a series METEOR; GOES — geostationary satellites of a series GOES.

Plasma impact: interplanetary shocks and flows of solar plasma with enhanced density and/or speed (interplanetary coronal mass ejection, high-speed solar wind streams) cause magnetic and ionospheric disturbances in environment space. For disturbances of the geomagnetic field (Figure 5) with the intensity exceeding the threshold of magnetic storms, a five grade system of their estimation has also been introduced: from G1 for disturbances in which at least one three-hour Kp index has reached 5 (≥ 900 days per solar cycle) to G5 with Kp=9 (1...5 days per cycle).

It should be kept in mind that this scale estimates the intensity of a geomagnetic disturbance; it is quite possible to imagine a situation when the disturbance has an importance G1 or G2, but in fact there is no magnetic storm and the diurnal geomagnetic index Ap is much lower than the magnetic storm threshold. Certainly, it is a problem of definition of “MAGNETIC STORM”— magnetic disturbance with a duration not shorter than 12 hours and with a mean Ap index not lower than 27 (in western countries the threshold value is Ap=30).

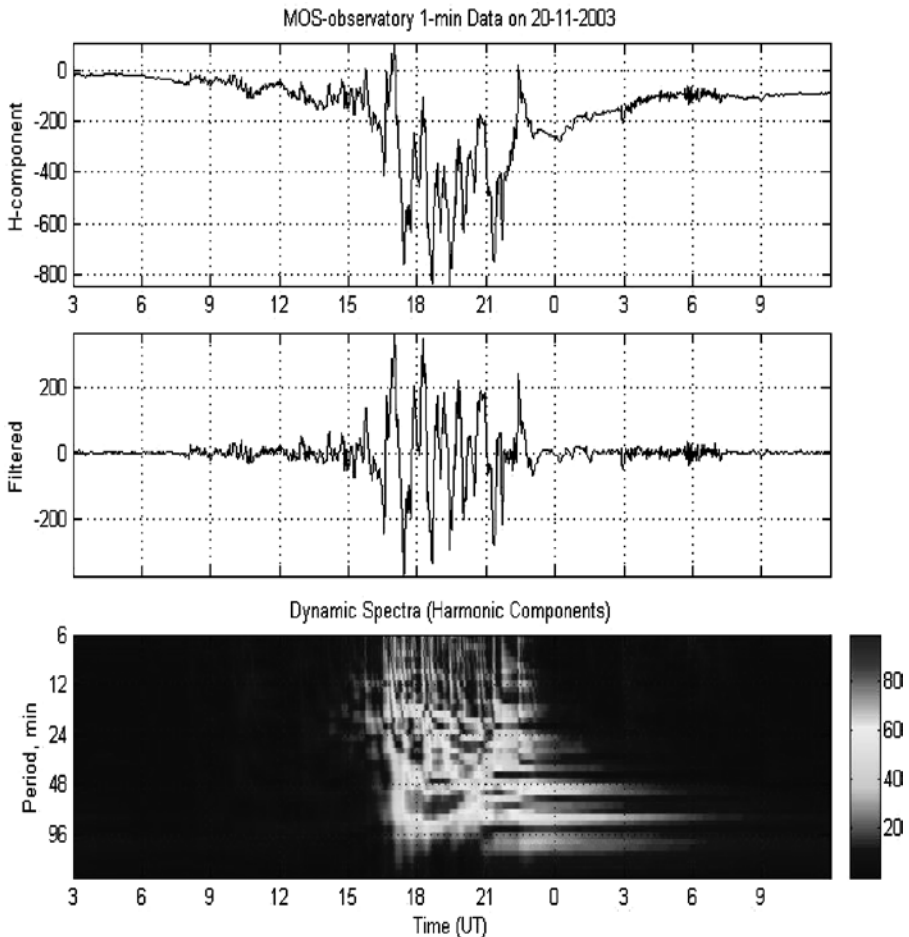


Figure 5. Several geomagnetic storm 20.11.2003 according data of geomagnetic observatory IZMIRAN. There is given the record of geomagnetic horizontal component (upper figure), the processed record and the dynamic spectrum of signal [Ermolaev et al., 2005]

Table 5. Extreme geomagnetic storms on the Ap index and their sources

N	Ap*	Aa*	Dst	Y/M/D to	Day Ap _{max}	M/D te	Δt hrs	Fl to D/UT	Importance, X-ray class	Location	AO
1	312	429		1941/09/17/09	18/09	09/20/18	60	17/0735	3+	N08W08	
2	293	372	-339	1960/11/11/21	11/21	11/15/00	54	10/1009	3+	N29E20	
3	285	441	-599	1989/03/12/06	13/03	03/16/00	69	10/1837	X4	N32E22	5395
4	277	377		1940/03/23/00	24/12	03/27/03	78	23/1130	3	N27E37	
5	258	253	-287	1960/10/05/06	06/09	10/08/18	63	DSF			
6	252	357	-429	1959/07/14/09	15/06	07/17/00	42	14/0342	3+	N17E07	
7	252		-388	2003/10/28/09	29/06	11/01/12	78	28/0951	X17	S16E08	10486
8	251	312	-327	1960/03/30/12	31/21	04/04/06	93	29/0650	2+	N12E31	
9	241	279	-387	1967/05/24/15	25/12	05/27/09	45	23/1835	3B	N28E25	
10	229	268	-325	1982/07/11/18	13/15	07/15/21	78	09/0720	X9	N18E76	3776
11	228	287	-307	1986/02/06/18	08/06	02/10/06	63	06/0608	X1	S08W02	4711
12	226	210		1940/03/28/18	29/15	04/02/06	87	27/1710	3	N12W17	
13	223	290	-125	1972/08/03/06	04/21	08/07/12	81	04/0617	X>5	N14E08	331
14	222	302		1941/07/04/06	05/00	07/08/00	69	03/1509	3+	N12E03	
15	221	211	-324	1957/09/01/15	04/12	09/06/21	105	31/1321	3	N25W02	
16	216	314	-330	1958/07/07/12	08/06	07/10/09	48	07/0020	3+	N28W07	
17	215	329		1946/03/27/09	28/03	03/29/21	39	27/0410	3	N19E05	
18	214	295		1946/09/21/06	22/03	09/24/18	63	19/0315	3	N21E08	
19	212	254		1941/02/28/09	01/03	03/02/21	39	DSF			
20	212	200		1946/07/25/21	26/18	07/28/06	36	25/1610	3+	N21E16	
21	206		-373	2004/11/07/00	09/15	11/11/15	90	07/1542	X2.0	N09W16	10696
22	203	161		1950/08/18/12	19/12	08/21/06	45				
23	201	207		1982/09/05/03	05/21	09/08/12	60	04/0025	M6.4	N12E38	3886
24*	170		-422	2003/11/19/15	20/06	11/22/00	36	18/0723	2N/M3.2+M3.9	N00E18	10501

Ap* and Aa* indices are undertaken from ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/geomagnetic_data/apstar.

Table 5 is given the information about the extreme magnetic storms on the Ap index, which corresponds to these storms the geomagnetic indices Aa and Dst and the flare events — sources of these storm on the Sun. In two cases the solar filaments ejections were the most probable reason for extreme magnetic storms. By the latter is given large magnetic storm 19.11.2003 by one of the intensive in 23 cycles of solar activity on the Dst index, which on the consequences in any way cannot be carried to the extreme. This example shows that the geomagnetic Dst index for middle latitudes must be used with the caution.

5. FORECAST OF SOLAR GEOEFFECTIVE PHENOMENA

By forecast of geoeffective solar phenomena here we mean a combination of all kinds of forecasts aiming to the calculation of the development of processes and phenomena taking place in the solar atmosphere and directly influencing the magnetic and radiation conditions in environment space in the given time intervals. Time intervals for which the forecast is possible are determined [Ishkov, 1999] by the characteristics of physical processes of magnetic fluxes emergence in the solar atmosphere, the character of their interaction with the already present magnetic field as well as regularities in the appearance and evolution of solar structures, such as solar flare events and coronal holes.

The forecast of disturbances in environment space directly depends on a successful, reliable forecast of solar active phenomena, such as large flare events and coronal holes. The agents causing this disturbance are:

- transient structures, coronal mass ejections, which are a consequence of active processes in flares and filament eruptions; their direct observations and characteristics enable us to specify the direction of a disturbance motion in the interplanetary space and the possibility of its incoming to environment space;
- high-velocity streams of solar plasma following a shock wave from powerful flare events or escaping from regions with an opened magnetic configuration (coronal holes).

The observational data for the determination of the evolutionary and flare state of the Sun are stored at <http://www.swpc.noaa.gov/Data/>.

1. Daily characteristics of solar activity: solar activity indices W, $F_{10\text{cm}}$, X_{bcg} (soft X-ray background); these data allow us to determine the phase of the current solar cycle and to estimate indirectly the flare activity level.
2. Heliographic coordinates of all sunspot groups; the shape, area, extension, and their evolutionary characteristics. These data yield the localization, dynamics of development, and information on the appearance of new magnetic flux in individual active regions; together with the data about the previous revolution, this enables us to predict their flare activity for the subsequent period.
3. Daily data about solar flare events: heliographic coordinates of all significant flares, their localization and time characteristics, optical and X-ray importance, total flux of the burst in soft X-rays, parameters of the radio bursts, and the presence of an ejection in the flare, coordinates, time, and sizes of solar filament eruptions. The localization and basic parameters of flare events

allow us to implement diagnostics of the geoefficiency of a flare and to estimate the possibility of arrival of a disturbance and of solar particles to the Earth.

4. Information on coronal mass ejections accompanying flare events allows us to specify the possibility of arrival of a disturbance and of solar particles to the Earth.
5. Information about low-latitude coronal holes: their localization, area, signs of the magnetic field in which it was formed, dynamics and position of the IMF sector. This information enables us to trace the phenomena determining the successful prediction of the recurrent geomagnetic activity.

Large flare events are the most significant geoeffective solar phenomena that cause in environment all three forms of disturbances and their forecasts — urgent task of physics of sun-earth connections. For the appearance of such flares it is necessary that new emerging magnetic flux] would be sufficient to large ($\geq 10^{13}$ Wb) and the speed of its emersion was $\geq 10^9$ Wb/s. Large flares appear 1...2 days after the appearance of new magnetic flux within the boundaries of active region and according to the characteristics of flares themselves and their coronal mass ejections possible the forecast of disturbances in environment.

The prediction of solar flare events on the basis of the analysis of the new emerging magnetic fluxes in active regions is implemented only in the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, since 1990. It is accessible to public within the framework of the weekly review of the state of environment, which appears on Mondays since 1997 at <http://www.izmiran.rssi.ru/space/solar/forecast> (russian and english version). In the case of appearance in an active region of a new magnetic flux with a magnitude and ascent rate sufficient for the implementation of large flares, the Web page gives an appendix, in which the probable flare potential of the given active region is estimated.

The prediction of solar filament eruptions is more difficult: only direct observations of new magnetic fluxes emergence in weak magnetic fields can give a possibility to predict them. New magnetic flux interacts with the background magnetic field and can emerge only to regions of the neutral line of the longitudinal magnetic field component, where is located filament. Value and speed of new magnetic flux cannot exceed the threshold value of the sunspot formation, which would contradict observations. Estimations show that in this case the total value of magnetic flux must lie at the interval of the flux values which those corresponding to the appearance of an ephemeral region and to the appearance of a time, i.e. there cannot be less than $3 \cdot 10^{11}$ Wb are more than $3 \cdot 10^{12}$ Wb, and the speed of emergence must exceed 10^9 Wb/s. Hence it follows that in the nearest environment of filament necessary to follow sufficiently small changes in the magnetic field, connected with new magnetic fluxes. From [Filippov, 2007] it follows that the ejection of solar filaments occurs, when filament in the process of evolution reaches the heights, critical for its equilibrium. Then it is actually sufficient rapid not great magnetic flux appearance so that the process of the filament ejection would be occurrence. For the special search for such phenomena, it succeeds to reveal them [Gopalswamy, 2004] however for the real forecast such methods do not befit, since they are beyond the scope of usual service daily observations. By the fact of the filament eruption realization and caused by

it coronal mass ejection parameters is determined geoefficiency of the solar filament ejections. The magnetic storms from the solar filament ejections, outside of active regions, in 80 % of cases are observed 4...5 days after the realization of event.

The forecast of appearance solar coronal holes is thus far impossible because of the reliable data about the conditions of their appearance absence. However, the forecast of recurrent magnetic storms and growths of high-energy electrons fluxes is produced on the fact of appearance coronal holes, passage by them the central meridian of the Sun and satisfying on given below requirements. Geoeffective coronal holes are those found in a heliolatitude interval of N25–S25, having an extension of $\geq 10^\circ$, area of ≥ 5000 m.v.h [Joselyn, 1984], and localized in enhanced background magnetic fields. The effect on the environment space appears when the western boundary of the coronal hole reaches a heliolongitude of $\sim W40$, ~ 3 days after the transit of the western boundary of the coronal hole across the central meridian of the Sun [Watari, 1990; Solodyna et al., 1977]. We should especially emphasize the role of a coronal hole as an enhancer of the geoefficiency of solar flare phenomena. The presence of a coronal hole near active regions where a solar flare event takes place sharply increases their geoefficiency and expands the range of their localization. An example is the event of April 14, 1994, when an eruption of a high-latitude (S50) filament located beneath a large coronal hole resulted in a complete modification of magnetic structures in the southern hemisphere of the Sun [McAlister et al., 1995] and in a major magnetic storm of 17 April 1994.

CONCLUSION

Thus, of the aforesaid above follows the conclusion that the solar activity at present is found in the maximal phase of one of the lowest solar cycle. In spite of this, entire spectrum of geoeffective solar phenomena is achieved. Disturbances from the large solar flare events act on space environment. In 2012 were occurrence two strong (S3) of solar proton events. In also the time only two large magnetic storms are registered in the current cycle of solar activity. However, the largest solar flare events usually are observed on the branch of the decrease of the solar cycles and still are the possibility to be prepared for them. The Sun presented to us the sufficiently rare period of the prolonged minimum of solar activity and made possible to obtain the background characteristics of the entire heliosphere in the absence significant flare activity. Accordingly processing data of biological and medical observations for the years 2007–2009 gives the possibility to obtain the characteristics of the background solar activity influence, and it means in the absence the disturbances, such as the actions of sudden ionospheric disturbances, solar proton events and significant magnetic storms. I.e. it is possible to attempt to determine the influence of changes in the large-scale magnetic fields, variations in number and area of the coronal holes, which in these years continued to be present on the solar visible disk. It is necessary to say that practically all high-speed streams from the solar coronal holes were recorded by ACE spacecraft, but in the magnetosphere of the Earth they as a rule did not find significant response. The sufficiency of solar filament ejections, disturbances from which also introduced changes in state of environment, was observed in the Sun, but within entire period of their power it was sufficient only for not the significant disturbances of the geomagnetic field.

At present prediction of the state of environment space is now possible and is sufficiently exact. At the first stage, one-two days beforehand, using observations of emerging new magnetic fluxes, can predict the time interval in which, with a probability not less than 70 %, large flare events will take place; their probable geoefficiency in all three space weather positions is estimated. At the second stage, during or immediately after a flare event, the prediction is updated using electromagnetic radiation as well as CME and (1) the probability of solar high-energy particles (solar proton event) arrival to environment space, their probable maximum fluxes and duration are given (prognostic interval from 1 to 6 hours, prediction probability is about 60 %); (2) the probability of a geomagnetic disturbance, it's probable intensity, and duration as well as parameters of a probable ionospheric disturbance and aurora are assessed (prognostic interval from 17 hours to 5 days, probability of the forecast is not lower than 70 %). The third stage consists in refinement of the geomagnetic disturbance intensity and duration prediction involving the parameters of structures in the perturbed solar wind using ACE data (stationary orbit at 1.5 million kilometers from the Earth). Approximately 40 min before its beginning, it is concluded whether the geomagnetic disturbance will reach the level of a magnetic storm; its magnitude, intensity, and duration are predicted (prediction probability is not lower than 80 %).

REFERENCE

- [Ebert et al., 2009] *Ebert R. W., McComas D. J., Elliott H. A., Forsyth R. J., Gosling J. T.* Bulk properties of the slow and fast solar wind and interplanetary coronal mass ejections measured by Ulysses: Three polar orbits of observations // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. Iss. A1. CiteID A01109. 17 p.
- [Ermolaev et al., 2004] *Ermolaev et al.* Year away: Solar, heliospheric and magnetospheric disturbances at November, 2004 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005. V. 45. N. 6. P. 723–763 (= *Ермолаев Ю. И.* и др. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2004. Т. 45. № 6. С. 723–763).
- [Feynman, Martin, 1995] *Feynman J., Martin S. F.* The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux // *J. Geophysical Research*. 1995. V. 100. P. 3355–3367.
- [Filippov, 2007] *Filippov B. P.* Eruption processes on the Sun. М.: Phismatlit, 2007. 216 p. (*Филиппов Б. П.* Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит. 2007. 216 с.).
- [Fröhlich, 2009] *Fröhlich C.* Evidence of a long-term trend in total solar irradiance // *Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 501. Iss. 3. P. L27–L30.
- [Gibson et al., 2009] *Gibson S. E., Kozyra J. U., Toma G. de et al.* // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. A09105. 7 p. doi:10.1029/2009JA014342.
- [Gopalswamy, 2004] *Gopalswamy N., Lu W., Yashiro S., Shimoyu M., Shibasaki K.* Prominence eruptions and coronal mass ejection: a statistical study using microwave observations // *Annu. Report of the National Optical Astronomy Observatory of Japan / Ed. Kiyotaka Tanikawa*. Fiscal 2002. Tokyo, Japan. 2004. V. 5. P. 18–19.
- [Ishkov, 1998] *Ishkov V. N.* Emerging magnetic fluxes: a key to prediction of large solar flares // *Izv. RAN. Ser. Fiz.* 1998. V. 62. N. 9. P. 1835–1839 (= *Ишков В. Н.* Всплывающие магнитные потоки — ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1998. Т. 62. № 9. С. 1835–1839).
- [Ishkov, 1999] *Ishkov V. N.* The forecast of solar large flares: abilities and restrictions // *Izv. RAN. Ser. Fiz.* 1999. V. 63. N. 11. P. 2148–2151 (= *Ишков В. Н.* Прогноз геоэффективных солнечных вспышек: возможности и ограничения // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1999. Т. 63. № 11. С. 2148–2151).

- [Ishkov, 2009] *Ishkov V. N.* The characteristics of solar activity protracted phase of the minimum 23–24 solar cycles // Cycles of activity on Sun and stars / Ed. V. N. Obridko, U. A. Nagovitsyn. Astron. Soc. VVM. St. Petersburg, 2009. P. 57–62 (= *Ишков В. Н.* Характеристики солнечной активности затяжной фазы минимума 23–24-го солнечных циклов // Сб. ст. «Циклы активности на Солнце и звёздах / *Астрономич. об-во СПб.*: Изд. ВВМ. 2009. С. 57–62).
- [Ishkov, Shibaev, 2006] *Ishkov V. N., Shibaev I. G.* Cycles of solar activity: General characteristic and modern border of prognostic // *Izv. RAN. Ser. Fiz.* 2006. V. 70. N. 10. P. 1439–1442 (*Ишков В. Н., Шубаев И. Г.* Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2006. Т. 70. № 10. С. 1439–1442).
- [Joselyn, 1984] *Joselyn J. A.* SESC methods for short-term geomagnetic prediction // *Solar Terrestrial Prediction Proc.* 1984. P. 404.
- [McAlister et al., 1995] *McAlister A. H., McAllister A. H., Dryer M., McIntosh P., Singer H., Weiss L.* A quiet CME and a severe geomagnetic storm: April 14–17, 1994 // *Proc. 2nd SOLTIP Symp.* / Ed. Watanabe. GBRSC News, 1995. V. 5. P. 191.
- [Miroshnichenko, 2003] *Miroshnichenko L. I.* Radiation Hazard in Space. KAP, 2003. P. 5.
- [Solodyna et al., 1977] *Solodyna C. V., Krieger A. S., Nolte J. T.* Observations of the birth of a small coronal hole // *Solar Physics.* 1977. V. 54. N. 1. P. 123. doi:10.1007/BF00146428.
- [Watari, 1990] *Watari S.-I.* The latitudinal distribution of CHs and geomagnetic storms due to CHs // *Solar Terrestrial Prediction Proc.* 1990. P. 627.

СОЛНЕЧНЫЕ ГЕОЭФФЕКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО

В. Н. Ишков

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, e-mail: ishkov@izmiran.ru

Солнечные исследования последнего десятилетия не оставили сомнения, что геоэффективными явлениями на Солнце, динамически влияющими на состояние околоземного космического пространства (ОКП), являются исключительно большие вспышечные события и корональные дыры. К классу вспышечных явлений мы относим солнечные вспышки со всем спектром динамических проявлений движения вещества и излучения во всех диапазонах электромагнитного спектра и выбросы солнечных волокон со всеми сопутствующими им явлениями.

Возможность прогноза геоэффективных солнечных явлений и их воздействий на околоземное космическое пространство основана на исследованиях связей осуществления вспышечных событий с всплывающими новыми магнитными потоками в солнечной атмосфере, физических характеристик этих потоков и характером их взаимодействия с уже существующими магнитными полями, временным распределением больших солнечных вспышек в пределах активных областей, временным и пространственным распределением выбросов солнечных волокон, законами зарождения, эволюции и распределения корональных дыр. Агентами, вызывающими возмущения ОКП, являются: выбросы коронального вещества как следствие активных процессов во вспышках и выбросах волокон; высокоскоростные потоки солнечной плазмы, следующие за ударной волной от больших солнечных вспышечных событий или истекающих из областей с открытой конфигурацией магнитного поля (КД).

Полную цепочку возмущений в ОКП от отдельного большого вспышечного события можно представить в виде трёх отдельных этапов воздействия:

- *электромагнитный удар нарушает радиосвязь* в ионосфере из-за роста потока излучения в диапазонах УФ и мягкого рентгена, R1–R5;
- *солнечные протонные события* повышают уровень радиационной опасности, когда происходит вторжение значительных потоков солнечных заряженных частиц, S1–S5;
- *магнитные бури*: возмущения в геомагнитном поле, которые вызываются приходом в ОКП возмущённых структур солнечного ветра, G1–G5.

Прогноз начал возмущений в ОКП и их длительности возможен на период от 1 до 5 сут, а корональных дыр — на период одного оборота Солнца (27,3 сут). Это даёт возможность планировать различного рода технологические, биологические и медицинские эксперименты и защитные мероприятия для команды и приборов космических лабораторий.

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ СВОЙСТВА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, НАЙДЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Г. Н. Застенкер

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),
Москва, Россия, e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru

В статье описываются некоторые результаты анализа измерений солнечного ветра на спутнике «Спектр-Р» с помощью прибора «Быстрый монитор солнечного ветра» (БМСВ) с очень высоким временным разрешением, что позволило получить новые, ранее неизвестные сведения о свойствах солнечного ветра.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, солнечный ветер является одним из важнейших агентов, переносящих возмущения от Солнца к Земле. Поэтому его исследования помимо чисто научного имеют и большое практическое значение. В данной статье мы хотим обратить внимание на ряд новых особенностей солнечного ветра (СВ), открывшихся при его исследовании с очень высоким временным разрешением. Если большинство прежних экспериментов использовало измерения с разрешением от нескольких минут до десятков секунд (см., например, разд. «Гелиосфера», в сборнике [Плазменная..., 2008]), то нами была рассмотрена задача — перейти к измерениям СВ в диапазоне от единиц секунд до сотых долей секунды.

Для этой цели коллективом специалистов ИКИ РАН и Карлова университета (Прага, Чешская Республика) был совместно разработан специальный прибор — «Быстрый монитор солнечного ветра» (БМСВ). Этот прибор был введён в состав научной аппаратуры российского спутника «Спектр-Р», где он вполне успешно функционирует (см. [Застенкер и др., 2011]).

Ниже будут кратко описаны методические особенности этих измерений и некоторые новые результаты, полученные на их основе.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Высокоапогейный спутник Земли «Спектр-Р» был предназначен для проведения наблюдений с большим космическим радиотелескопом (проект РАДИОАСТРОН, см. [Авдеев и др., 2012]), однако на его борту в качестве «попутного груза» нашлось место и для небольшого эксперимента ПЛАЗМА-Ф (плазма и энергичные частицы, см. [Зелёный и др., 2012]).

Спутник «Спектр-Р» был запущен 18.07.2011 г. и в тот же день был выведен на рабочую орбиту с апогеем около 350 тыс. км, перигеем в несколько тысяч километров и периодом обращения 8,5 сут. На этой орбите в течение марта — октября каждого года спутник 6...7 сут подряд находится в межпланетной среде или в магнитослое, что позволяет проводить длительные непрерывные наблюдения. Пример движения этой орбиты относительно магнитосферы Земли представлен на рис. 1, здесь красным цветом отмечены участки траектории, находящиеся в СВ, красной и чёрной линиями показаны средние положения околосолнечной ударной волны и магнитопаузы.

Плазменный энергоспектрометр БМСВ (рис. 2) использует в качестве датчиков набор из шести разнонаправленных интегральных цилиндров Фарадея (см. статью [Застенкер и др., 2012]). При этом три «угловых» датчика, отвёрнутых в разных направлениях относительно оси прибора, позволяют измерять полный вектор потока ионов (величину и направление), а три «осевых» датчика позволяют с помощью изменения тормозящего ионы высоковольтного управляющего напряжения измерять энергетическое распределение пучка ионов, из которого вычисляются все основные параметры СВ.

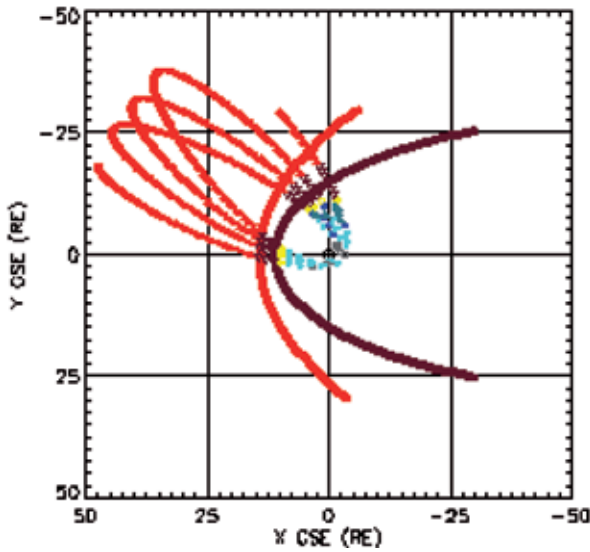


Рис. 1



Рис. 2

Прибор имеет несколько режимов работы:

- «угловые» датчики всегда работают в режиме измерения полных коллекторных токов ионов с периодичностью 30 измерений в секунду;
- «осевые» датчики работают либо в режиме свипирования управляющих напряжений с периодом 6 с, либо в специальном адаптивном режиме с автоподстройкой управляющих напряжений под изменения коллекторных токов в двух датчиках относительно некоторого опорного сигнала.

В результате обработки этих измерений мы получаем следующие данные:

- а) значения величины полного потока ионов СВ и двух его углов — полярного и азимутального относительно оси прибора (или, с учётом ориентации прибора, — от направления на Солнце) с разрешением в 31 мс;
- б) значения переносной скорости, изотропной температуры и плотности ионов СВ с разрешением 3 с (в режиме свипирования) или с разрешением 31 мс (в адаптивном режиме);
- в) энергетическое распределение потока ионов с разрешением 3 с (в режиме свипирования) и с разрешением по энергии на заряд иона около 1 %.

Ниже будут приведены некоторые примеры полученных результатов.

2. СТРУЙНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На рис. 3 показан типичный пример измерений полного потока ионов в СВ — его величины (на верхней панели), полярного угла (средняя панель) и азимутального угла (нижняя панель) на интервале 20 с. Отдельные точки на графиках поставлены через 31 мс. Подчеркнём, что такое высокое временное разрешение в прямых измерениях солнечного ветра достигнуто впервые — ни в каких прежних экспериментах таких наблюдений не было.

Отметим очевидную особенность — величина потока испытывает быстрые вариации с амплитудой до 10 % и периодичностью около 0,2...0,5 с. В отличие от этого изменения углов происходят заметно медленнее — полярного угла на 0,5...1° за 1...3 с и азимутального на 5...10° также за несколько секунд. В результате мы видим, что поток СВ разбивается на отдельные струйки, несколько отличающиеся своим направлением. Аналогией этому может служить поток воды, льющийся из садовой лейки с узкими отверстиями.

3. СПЕКТРАЛЬНАЯ ГРАНИЦА РЕЖИМОВ ПЛАЗМЫ

Представляет интерес рассмотрение спектральных свойств наблюдаемых вариаций полного потока ионов. Типичный пример такого частотного спектра в двойном логарифмическом масштабе в диапазоне частот 0,01...15 Гц представлен на рис. 4. Опять-таки отметим, что до частоты в 15 Гц в предыдущих исследованиях колебаний в плазме СВ никто ещё не добирался.

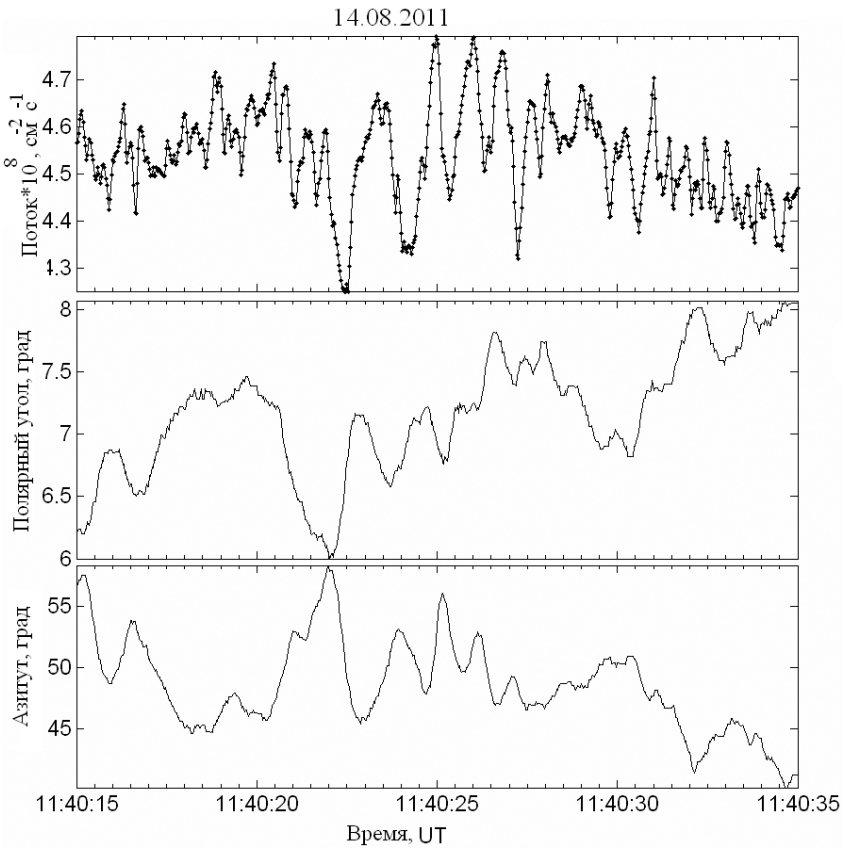


Рис. 3

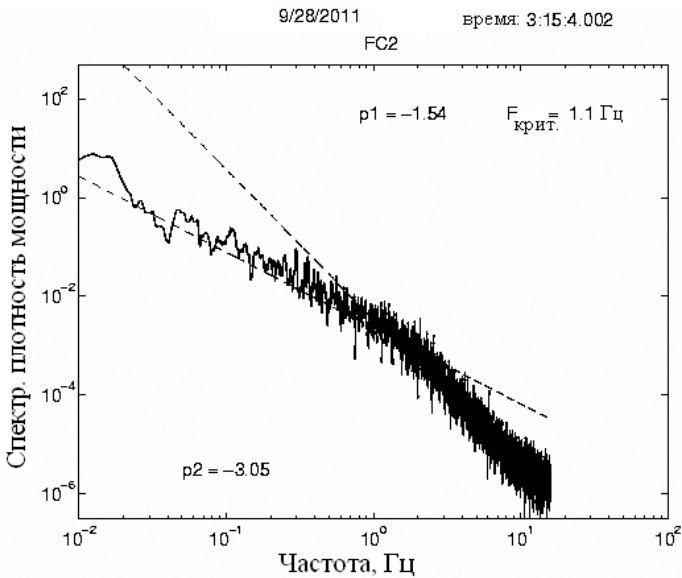


Рис. 4

На показанном спектре вариаций сразу обращает на себя внимание чёткое разделение на две ветви — низкочастотную (НЧ — от 0,01 до примерно 1 Гц) и высокочастотную (ВЧ — примерно от 1 до 15 Гц). При этом спектральные индексы этих ветвей (при аппроксимации их наклонов прямыми линиями) весьма сильно отличаются: $-1,54$ для НЧ-части и $-3,05$ для ВЧ-части, т.е. в области высоких частот спектральная плотность мощности с ростом частоты спадает гораздо быстрее, чем в НЧ-области. Граница между этими ветвями для данного примера составляет 1,1 Гц. Расчёт показывает, что эта граничная частота оказывается примерно на порядок выше, чем гирочастота протонов СВ для этого события. Как следует из теоретических соображений, эта частота является границей между диссипативным и инерциальным режимами колебаний плазмы. В нашем эксперименте эта граница по прямым измерениям в плазме СВ была найдена впервые.

4. ОСЦИЛЛЯЦИИ НА ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Ещё одним важным моментом является наблюдение с высоким временным разрешением тонкой структуры ударных волн в солнечном ветре. На рис. 5 показан для примера фронт межпланетной ударной волны, пришедший к Земле 24.10.2011 г. после сильной солнечной вспышки. На измерениях с разрешением 31 мс чётко видно, что нарастание потока ионов во фронте (синяя кривая) происходит не монотонно, а через несколько (около десятка) больших (до 30...50 % величины) колебаний типа затухающей синусоиды с периодом около 0,4 с.

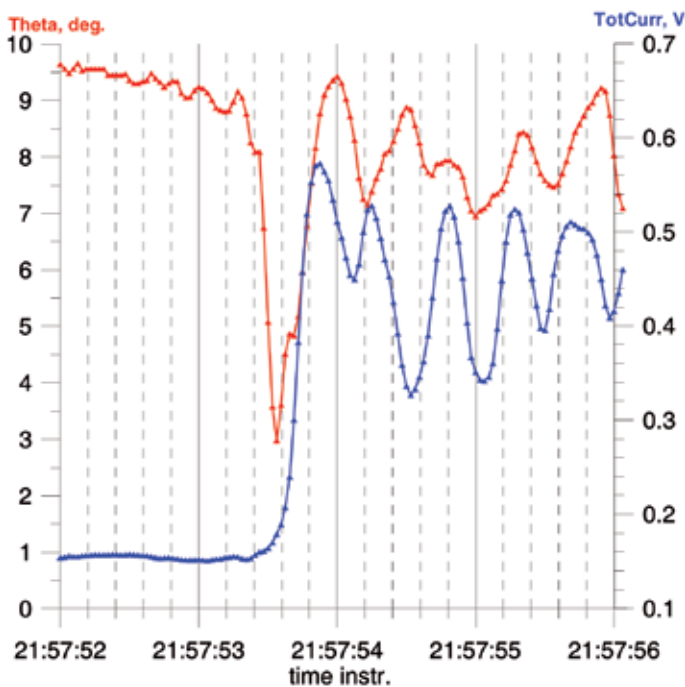


Рис. 5

При этом имеют место и повороты потока (красная кривая) — если начальное и конечное (т. е. после прохождения фронта) направления потока ионов примерно совпадают, то на самом фронте имеются синхронно с изменением величины потока и вариации его полярного угла на $1...2^\circ$, а в самом начале фронта — очень резкий (за 0,2 с) поворот потока на 6° и его возвращение назад. Вся наблюдаемая структура имеет длительность около 4...5 с. Конечно, при измерениях с разрешением в несколько секунд такая тонкая структура фронта не могла быть обнаружена.

Представленный на рис. 5 случай не является уникальным — подобная структура фронта ударной волны не принадлежит только межпланетным событиям и похожие осцилляторные структуры наблюдались неоднократно при прохождении спутником околоземной ударной волны. В настоящее время ещё нет удовлетворительного объяснения этому явлению, можно лишь предположить, что оно связано с возникновением неустойчивостей плазмы при набегании резкого фронта. В наблюдениях часто встречаются и случаи ламинарного прохождения фронта ударной волны — в этом случае обычная длительность такого фронта равна 0,3...0,5 с.

5. БЫСТРЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕЛИЯ

Хотя в приборе БМСВ отсутствует масс-анализ ионов, тем не менее, имеется возможность быстрой регистрации этим прибором ионов He^{++} в солнечном ветре на основе анализа потока ионов по величине энергии на единицу заряда. Конечно, такая возможность осуществляется только при достаточно низкой температуре и не очень высокой скорости потока протонов.

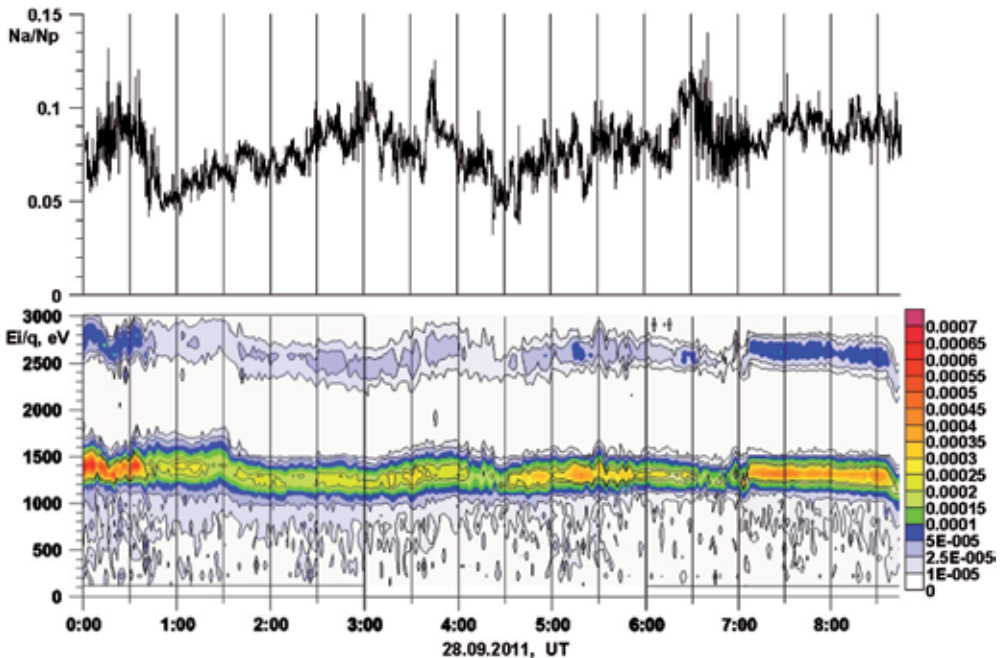


Рис. 6

Пример такого наблюдения приведён на рис. 6. На нижней панели показана энергоспектрограмма потока ионов для события 28.09.2011 г., построенная для 9-часового интервала с разрешением 3 с на основе энергетических спектров. На этой спектрограмме очень наглядно видно разделение потока ионов по энергии на заряд на две компоненты — протонную (желто-зеленая полоска), имеющую среднюю энергию на заряд около 1300 эВ, и гелиевую (серо-голубая полоска), имеющую энергию на заряд в два раза больше — около 2600 эВ. Это означает, что переносные скорости этих компонент с весьма хорошей точностью совпадают и составляют около 490 км/с. На верхней панели показан вычисленный из данных этой энерго-спектрограммы временной ход относительного содержания ионов He^{++} для всего рассматриваемого интервала. На этом интервале содержание гелия варьирует примерно от 4 до 12 %.

Видно, что в отличие от общепринятой точки зрения содержание гелия может испытывать быстрые и большие вариации даже в секундном диапазоне, например, при возрастании в два раза за десяток секунд. На наш взгляд, это свидетельствует о мелкомасштабной сильной неоднородной слоистости (или зернистости) солнечной короны. Такие данные о быстрых вариациях содержания гелия в солнечном ветре получены впервые.

6. ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ ПЛОТНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

В дополнение к показанным выше примерам очень быстрых вариаций плазмы СВ приведём ещё наши наблюдательные данные об экстремально большом повышении плотности солнечного ветра. После сравнительно умеренной солнечной вспышки балла М к Земле в 20–23 ч UT 16.06.2012 г. пришёл импульс гигантского повышения потока плазмы солнечного ветра (рис. 7). Длительность этого импульса была около одного часа с пологим передним фронтом и крутым задним фронтом.

При этом плотность плазмы достигала величины около 180 см^{-3} , т.е. примерно в 20...40 раз больше средних значений плотности СВ. Такой большой поток ионов был обнаружен, по-видимому, впервые за несколько десятилетий прямых измерений в межпланетной среде. Кстати, скорость потока ионов была в этом импульсе не очень высока — около 500 км/с.

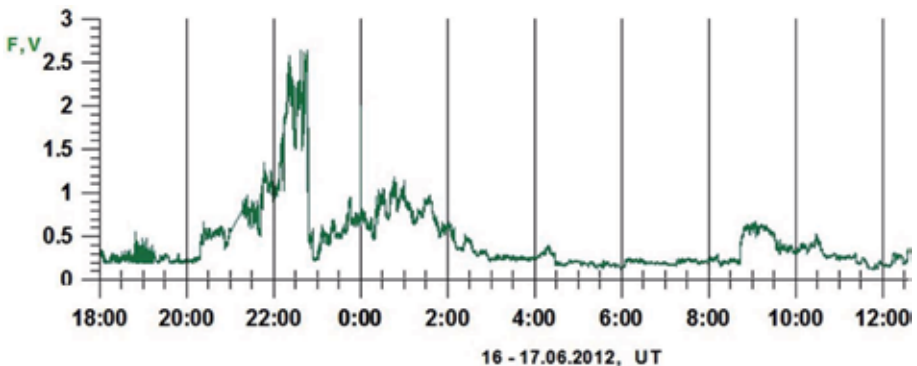


Рис. 7

Представляется, что всем работающим с данными о солнечном ветре полезно представлять, в каких широких пределах могут меняться параметры межпланетной среды вблизи орбиты Земли — возможности нашего Солнца очень широки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что проведение измерений параметров солнечного ветра с рекордно высоким временным разрешением — секундным и даже субсекундным — оказалось весьма плодотворным и позволило получить новые и важные результаты.

Автор благодарит всех своих многочисленных коллег в ИКИ РАН, Карловом университете, ИФА ЧАН (Прага, Чешская Республика), а также в НПО им. С. А. Лавочкина за неоценимую помощь в разработке и калибровке прибора БМСВ, в испытаниях прибора в ИКИ и НПОЛ, и в проведении эксперимента в полёте спутника «Спектр-Р».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-02-00063).

ЛИТЕРАТУРА

- [Авдеев и др., 2012] *Авдеев В. Ю., Алакоз А. В.* и др. Космическая миссия «Радио-астрон». Первые результаты // Вестник-журнал НПО им. С. А. Лавочкина. 2012. № 3. С. 4–27.
- [Плазменная..., 2008] // *Плазменная гелиогеофизика. М.: Физматлит, 2008. Гл. 3. Гелиосфера. С. 269–377.*
- [Застенкер и др., 2011] *Застенкер Г. Н., Зелёный Л. М.* и др. Загадки солнечного ветра // Российский космос. 2011. № 10. С. 26–31.
- [Застенкер и др., 2012] *Застенкер Г. Н., Шафранкова Я.* и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ// Космич. исслед.. 2012. (В печати.)
- [Зелёный и др., 2012] *Зелёный Л. М., Застенкер Г. Н.* Эксперимент ПЛАЗМА-Ф на спутнике «Спектр-Р» // Космич. исслед.. 2012. (В печати.)

SOME NEW PROPERTIES OF THE SOLAR WIND, FOUND ON THE BASIS OF MEASUREMENTS WITH HIGH TEMPORAL RESOLUTION

G. N. Zastenker

Space Research Institute, Moscow, Russia (IKI RAN), e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru

This article describes some of the results of the analysis of Solar Wind on the satellite Spectrum-P with an instrument BMSV which has a very high temporal resolution, thus providing a new, previously unknown information about the properties of the Solar Wind.

AN ANALYSIS OF THE HIGH-SPEED SOLAR WIND STREAMS ACTIVITY DURING SOLAR CYCLE 23: SOURCES OF RADIATION HAZARDS IN GEOSPACE

G. Xystouris, E. Sigala, H. Mavromichalaki

Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, National and Kapodistrian University of Athens, Zografos 15784 Athens Greece,
e-mail: emavromi@phys.uoa.gr; xystouris_geo@hotmail.com; e.s.asteraki@hotmail.com

The High Speed Solar Wind Streams (HSSWSs) are ejected from the Sun and travel into the interplanetary space. Due to their high speed, they carry out energetic particles, such as protons and heavy ions that result to the increment of the mean interplanetary magnetic field. While the Earth is in the path of those HSSWSs, Earth's magnetosphere interacts with the disturbed magnetic field, leading to significant radiation-induced degradation of technological systems, provide an enhanced energy transfer from the solar wind/IMF system into the Earth magnetosphere and initiate geomagnetic disturbances having a possible impact on human health. The 23rd solar cycle was particularly unusual, with many energetic phenomena occurred during its descending phase and the existence of an extended minimum. In this study, we have identified and catalogued the HSSWSs for the 23rd solar cycle. We determined many characteristics of the streams, such as their maximum velocity, their beginning and ending time, their duration, their possible sources etc. Also, we studied the distributions through the solar cycle for many of their parameters. We regard that this catalogue would be helpful for the monitoring of Space Weather and possible predictions for it, the study of possible influence of Space Weather on human health, the planning of future space missions etc.

INTRODUCTION

One of the most important solar terrestrial phenomena is undeniable the near-Earth solar wind flow. It is known that the flow of solar wind is connected with a wide range of phenomena and effects, that become perceptible not only in space, but also on Earth, e.g. the space weather, the reduction of the distance of magnetopause, the geomagnetic storms, the aurora, the solar radiation storms, the radio blackouts. The solar wind flow is a continuous flow, with an average speed of 250...400 km·s⁻¹ [Parker, 1959] and it tends to be organized on stream structure [Iucci et al., 1979]. When a stream is generated with a flow speed over 400 km·s⁻¹, its velocity is greater than the local velocity of solar wind. Hence, a tangential discontinuity to the solar wind flow is created and a shock wave occurs. In that way high-speed solar-wind streams (HSSWSs) are created.

Through the years there have been many definitions for the High Speed Solar Wind Stream (HSSWS). According to [Bame et al., 1976; Gosling et al., 1976], a HSSWS is an observed variation of solar wind speed, with an increase of at least 150 km·s⁻¹ within a 5-day interval [Intrilligator, 1977] described it as a rapidly increase of the solar wind stream with a peak speed equal or greater than 450 km·s⁻¹. Also, [Broussard et al., 1978] described it as a period in which the solar wind speed is equal or greater than 500 km·s⁻¹, averaged over a day. Later, [Lindblad, Lundstedt, 1981] defined it as a period in which the velocity difference between the smallest 3-hour velocity value and the largest 3-hour value of the following day is equal or greater than 100 km·s⁻¹ and it lasts for at least two days. Finally, according to [Mavromichalaki et al., 1988, 1997] a HSSWS is defined as the difference between the maximum speed and the mean plasma speed between the mean speed immediately preceding and following the stream is equal or greater than 100 km·s⁻¹, in a period lasting for at least two days.

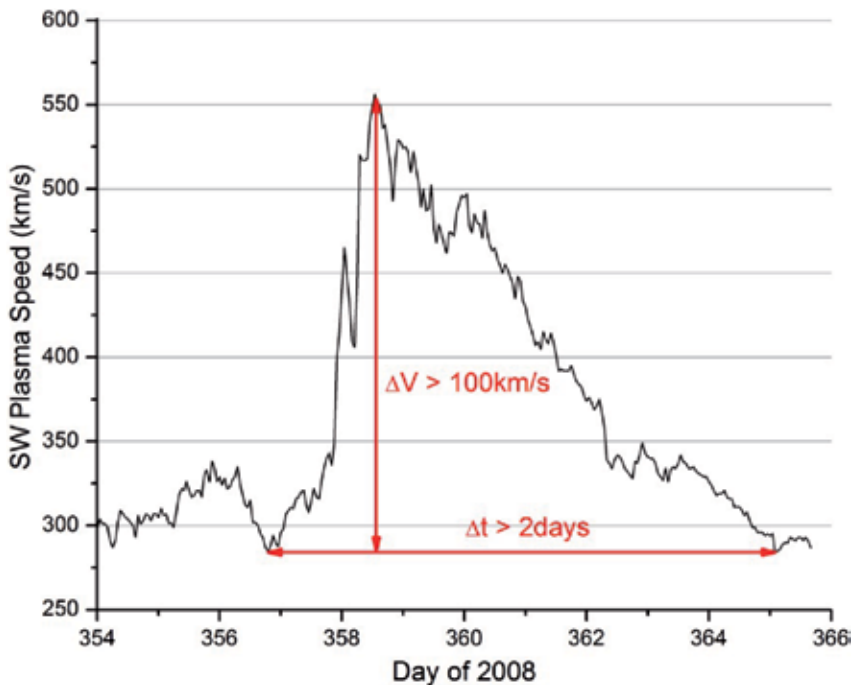


Figure 1. A typical example of a HSSWS. The speed difference is over 100 km s^{-1} , while the period of the solar wind coming back to its initial speed is over two days

This definition is used in this work because it is more adequate for solar-terrestrial studies and it is in agreement with our previous studies. A typical example of a HSSWS is shown in Figure 1.

The HSSWSs are produced either by corotating coronal holes or by solar flare activity. A corotating coronal hole is a low temperature and low density area on the Sun's surface. As the Sun rotates, coronal holes pass across the Sun-Earth line and as the HSSWS are emitted from the Sun, they catch up with the previously emitted solar wind. In that way, they form a compressed interface in the interplanetary medium called a corotating interaction region [Morley et al., 2009]. The physical features of the corotating streams, according to [Mavromichalaki and Vassilaki, 1998] are the following:

- the interplanetary magnetic field (B) magnitude is proportional to bulk speed and the polarity is constant throughout the speed except for some fluctuations lasting a few hours;
- the proton density (n) rises to unusually high values near the leading edges of the streams vice to bulk speed;
- the proton temperature (T) varies with the same way as the flow speed.

Until recently, the HSSWSs that come from a blast wave were connected only with the flares activity. Nowadays, due to the development of technology for the solar observations, HSSWSs can be connected not only with flares, but also with coronal mass ejections (CMEs). In that process the material ejected by the flares, because of its expansion, compresses the plasma of the slower moving solar wind ahead the stream and the field lines, causing, at the leading edge of the slower moving surrounding

plasma, a segregation surface with different thermodynamical and chemical properties in each side [Hollweg, 1974]. This structure is prevented from breaking apart due to its high electrical conductivity. At the point that the emitted solar wind plasma obtains a velocity greater than the local Alfvén velocity, the shock wave is created. Finally, as the previous situation of the coronal hole, a HSSWS is created. The behaviours of interplanetary parameters of the flare-generated streams tend to be irregular. In a general way we can admit that:

- all the interplanetary parameters show simultaneous increases. Especially, the bulk speed (V), the proton density (n) and the magnetic field magnitude (B) show large fluctuations during the period of the maximum speed value. Probably this indicates radially outcoming fast shocks;
- during the maximum speed period, the field polarity shows inversions lasting for 3...4 hours.
- the proton temperature does not vary simultaneously to the flow speed, but it tends to divert from speed behaviour, on contrary to corotating streams.

The reason for studying HSSWSs is because they are a potential hazard for the Earth. They contain very energetic particles, which are the source of the solar radiation. We can divide the dangerous areas into the Geospace and the Earth atmosphere and ground. The hazards for the Geospace regard hazards for the satellites — the technological instruments in general — and the astronauts. The hazards for Earth atmosphere and its ground contain regard for the technological instruments but also for humans. The greatest danger for humans is for the aircraft passengers, due to the thinner atmospheric layer above them (for blocking the energetic particles); but studies showed that the hazardous interaction can take place on the ground too.

In this work we compiled a complete catalogue of HSSWSs for the last solar cycle 23, from May 1996 to December 2008. The catalogue is based on previous works of [Mavromichalaki et al., 1988, 1997] with some extra features for the 23rd Solar Cycle. In this catalogue, the HSSWSs were distinguished in four different categories and an attempt was made to examine the distributions of HSSWSs with several parameters, such as the total annual number of HSSWSs, their sources and the duration of them.

1. DATA SELECTION AND ANALYSIS

For this work solar and interplanetary data obtained from the OMNI database (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>) were used. The following parameters as the Bartels Rotation Number, the Solar Wind Flow Speed, the Solar Wind Proton Temperature, the Solar Wind Magnetic Field Magnitude and the Solar Wind Proton Density for the time period from May 1996 until December 2008 were taken into account. The IMF data were gathered from the National Space Science Data Center database (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/polarity/polarity.html>).

The examined time period is from May 1996 until December 2008 and covers the solar cycle 23 according to the Mashall Space Flight Center database (<http://solarscience.msfc.nasa.gov>). This period was divided 23 into four phases based on the solar activity that are:

- 1) ascending phase, from May 1996 until April 1999,
- 2) maximum phase, from May 1999 until December 2002,

Table 1. An example of the catalogue of the HSSWSs during the year 1996 is presented. The first column shows the number of the HSSWS (the asterisk denotes an Interrupted HSSWS). The second column shows the exact hour that the HSSWS started. The third column shows the Bartel Rotation Number and Day for that date. The fourth column shows the IMF Polarity during the HSSWS. The fifth column shows the date of maximum solar wind speed. The sixth column shows the mean solar wind speed, while the seventh column shows the maximum speed of the HSSWS. The eighth column shows the HSSWS duration. The ninth column denotes the HSSWS category (S is for Simple HSSWS, M is for HSSWS with Multiple peaks and D is for HSSWS with Data Gaps) and the tenth column shows the source of the HSSWS (CH is a stream coming from a Coronal Hole, F is a Flare generated stream, CME is a HSSWS coming from a CME and the question mark denotes that a source for that HSSWS could not be found)

N	DD/MM/YYYY hh:mm	Bartel Rotation No Day	IMF Polarity	Date of maximum	V_0 [km/s]	V_{max} [km/s]	Duration [days]	Category	Source
1	12/5/1996 14:00	2223 01	+ / -	13/5/1996 21:00	326	508	2.54	S	CH
2	15/5/1996 04:00	2223 04	- / +	15/5/1996 11:00	427	511	3.42	S	CH
3	18/5/1996 14:00	2223 07	+ / -	20/5/1996 20:00	308	481	5.46	S	CH
4	24/5/1996 01:00	2223 13	+ / - / +	25/5/1996 00:00	368	469	3.96	S	?
5	28/5/1996 22:00	2223 17	+ / -	30/5/1996 00:00	344	465	4.75	S	?
6	5/6/1996 15:00	2223 25	+	6/6/1996 11:00	312	472	6.75	S	CH
7	15/6/1996 20:00	2224 08	-	16/6/1996 08:00	332	428	3.04	S	CH
8	18/6/1996 22:00	2224 11	+	19/6/1996 08:00	384	526	4	S	CH
9	2/7/1996 12:00	2224 25	+	4/7/1996 03:00	341	554	8.25	S	CH
10	11/7/1996 19:00	2225 07	+ / -	13/7/1996 09:00	310	416	4.29	D	F
11	21/7/1996 07:00	2225 17	+	22/7/1996 00:00	364	490	3.42	D	CH
12	28/7/1996 12:00	2225 24	+	1/8/1996 06:00	307	556	9.63	M	CH
*13	14/8/1996 09:00	2226 14	+	14/8/1996 21:00	361	510	1.92	S	CH
14	16/8/1996 08:00	2226 16	+	17/8/1996 08:00	406	584	6.04	S	CH
15	28/8/1996 15:00	2227 01	+	29/8/1996 23:00	385	626	6.33	M	CH
16	4/9/1996 00:00	2227 08	-	6/9/1996 15:00	315	444	5.79	S	?

- 3) descending phase, from January 2003 until December 2006,
- 4) minimum phase, from January 2007 until December 2008.

Using the criteria presented above, the HSSWSs over the solar cycle 23 were determined and a total number of 710 HSSWSs were well defined. A catalogue with all these HSSWSs and their parameters was compiled. An example of this catalogue is presented in Table 1. The first column shows the number of the HSSWS (the asterisk denotes an Interrupted HSSWS). The second column shows the exact hour that the HSSWS started. The third column shows the Bartel Rotation Number and Day for that date. The fourth column shows the IMF Polarity during the HSSWS. The fifth column shows the date of maximum solar wind speed. The sixth column shows the mean solar wind speed, while the seventh column shows the maximum speed of the HSSWS. The eighth column shows the HSSWS duration. The ninth column denotes the HSSWS category (S is for Simple HSSWS, M is for HSSWS with Multiple peaks and D is for HSSWS with Data Gaps) and the tenth column shows the source of the HSSWS (CH is a stream coming from a Coronal Hole, F is a Flare generated stream, CME is a HSSWS coming from a CME and the question mark denotes that a source for that HSSWS could not be found).

The distribution of the total number as well as of the different categories of the HSSWSs during the phases of solar cycle 23 is given in Table 2. The second column, named Simple (S), denotes the number of the Simple HSSWSs. The third, named Multiple Peaks denotes the number of the HSSWSs with Multiple peaks. The fourth, named Data Gap denotes the number of the HSSWSs with Data Gap. The fifth, named Multiple Peaks & Data Gaps denotes the number of the HSSWSs with Multiple Peaks and Data Gap. The last column, named Consecutive to Total, denotes the ratio of the consecutive cases of HSSWSs to the total number of HSSWSs.

Table 2. A consolidated list of the number of HSSWSs in each category during the phases of solar cycle 23 is presented. Also, in this table are presented the ratio of the consecutive cases to the total number of HSSWSs for each phase of solar cycle 23

Phases of solar cycle 23	Total HSSWSs (Tot.)	Simple (S)	Multiple Peaks (M)	Data Gap (D)	Multiple Peaks and Data Gaps (D and M)	Consecutive cases of HSSWSs (C)	Ratio Consecutive Cases to Total HSSWSs (C / Tot.)
Ascending Phase	153	87	53	12	1	52	0.34
Maximum Phase	214	60	150	3	1	151	0.71
Descending Phase	239	75	157	2	5	162	0.68
Minimum Phase	104	75	29	0	0	29	0.28

The greatest ratio of Consecutive Cases to the Total number of HSSWSs appears in the maximum phase of solar cycle 23 (151 out of 214 — 71 %) followed closely by the ratio of the descending phase (162 out of 239 — 68 %). This shows that in both maximum and descending phases, the HSSWSs generation rate was very high (where 7 out of 10 HSSWSs were consecutive), unlike the ascending and minimum phases, where the HSSWSs generation rate was lower (almost 3 out of 10 HSSWSs were consecutive in those phases).

2. DEFINITION AND CATEGORIZATION OF THE HSSWS

As it was mentioned above, the definition for HSSWS as it was described in [Lindblad, Lundstedt, 1981,1983] was used. The features that were taken into account in order to determine a HSSWS are the duration of the ascending and descending phase of the stream, the number of peaks that appear in the maximum phase and the existence — or not — of data gaps. We should mention that a HSSWS can have more than one characterization. The categories that the HSSWSs have been characterized are the following and they are illustrated in Figure 2:

- Simple HSSWS.
The simple HSSWS, as seen in Figure 2a, has a single peak and at least for three hours before the beginning and after the end of the HSSWS there is no other HSSWS present.
- HSSWS with Multiple Peaks:
When a HSSWS has more than one peaks and each peak is closer than one day, regarding to the following one, then we characterize that HSSWS as a HSSWSs with multiple peaks, as seen in Figure 2b.
- HSSWS with Data Gap.
When a data gap appears in any part of the HSSWS, then we describe that HSSWS as a HSSWS with data gap, as seen in Figure 2c. We accept the following approximations depending on where the data gap appears:
 - if there is a data gap in the beginning of the HSSWS and the stream begins from a velocity greater than $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, then we define the mean plasma velocity (V_0) for the pre-ascending phase as the first good velocity data point. Its duration also begins from that point; the mean plasma velocity (V_0) that follows the stream is set at $300\text{...}350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$;
 - if the data gap appears at the peak of the stream and the maximum velocity (V_{\max}) is not visible, then we define as V_{\max} the greatest velocity of the good data that appears. Therefore, according to the definition of a HSSWS, if V_{\max} is equal to or greater than $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ in a period lasting at least two days, we have a HSSWS.
 - if there is a data gap in the descending phase and the plasma velocity has not reached the pre-ascending phase velocity (V_0), we define the end of the HSSWS as the last good velocity point. Therefore, according to the definition of a HSSWS, if the V_{\max} is equal to or greater than $100\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ in a period lasting at least two days, we have a HSSWS.

In addition, we wrote down the cases of consecutive HSSWSs. A case of Consecutive HSSWSs can be determined as follows.

- If a new HSSWS appears in less than three hours of the ending of a previous one, then we have a case of Consecutive HSSWSs, as seen in Figure 2d. For groups with more than two HSSWSs, we count a case of consecutive HSSWSs for every two consecutive HSSWSs, e.g. for a group of four HSSWSs, we have a case of three Consecutive HSSWSs.

Finally, the most important feature we added in this work is that we created a special category of HSSWSs, called Interrupted HSSWSs.

- Interrupted HSSWSs.

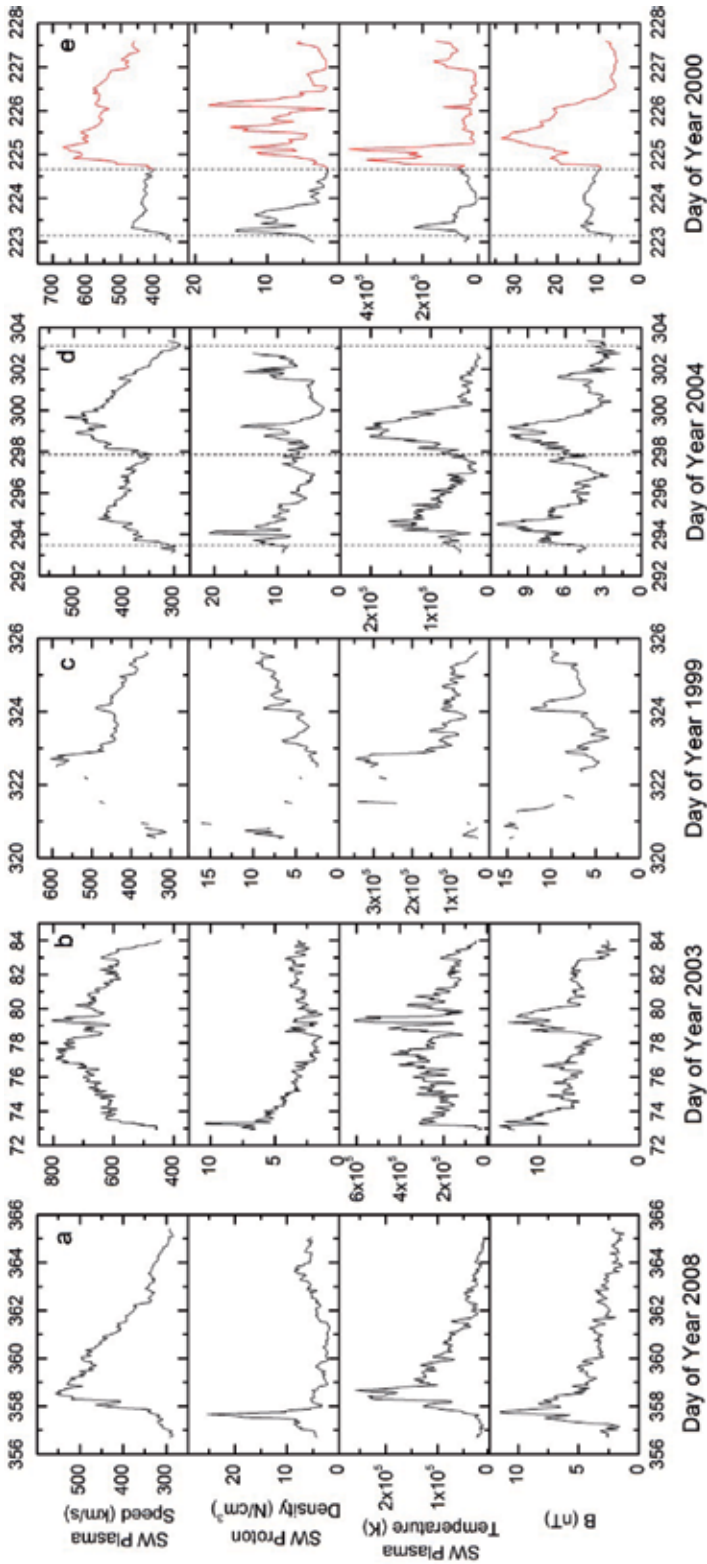


Figure 2. Categories of the HSSWS: *a* — simple HSSWS; *b* — HSSWS with Multiple Peaks; *c* — HSSWS with Data Gaps; *d* — case of Consecutive HSSWS; *e* — interrupted HSSWS (in black)

An interruption in a HSSWSs is described as the presence of a new HSSWSs in an on-going one, as seen in Figure 2e. Based on the definition of a HSSWSs, a HSSWSs has two phases: an ascending and a descending phase. The ascending phase is defined as the period from the beginning of the HSSWSs to the moment that the HSSWSs reaches its maximum velocity. The descending phase is defined as the period of the moment that the HSSWSs has reached its maximum velocity to the end of the HSSWSs. Therefore, the interruption may take place either in the ascending phase or in the descending phase. Based on that, we categorize them into two subcategories:

- interrupted HSSWSs in the ascending phase.

These HSSWSs appear at the end of the descending phase of an ongoing HSSWS. Before the velocity of the first HSSWS reaches the pre-ascending phase mean, it raises again, due to the oncoming solar wind shock. We define that point as the preceding V_0 of the interrupted stream. Also, the V_0 that follows the HSSWS is defined as the point that the plasma velocity descends to the $330 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ and its duration is defined as the duration from the V_0 preceding and following the stream. Therefore, if the V_{max} , in respect to the V_0 preceding the stream, is equal to or greater than or $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ and its duration is less than 2 days, then we define the second stream as an interrupted HSSWS:

- interrupted HSSWSs in the descending phase.

These HSSWSs begin as a simple HSSWS, but the interruption occurs in its descending phase, before the plasma velocity reaches the pre-ascending phase velocity, V_0 . So, the V_0 that follows the stream is defined as the point of the interruption and its duration is defined as the duration from the V_0 preceding and following the stream. Therefore, if the V_{max} , compared to the V_0 preceding the stream, is equal to or greater than or $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ and its duration is less than 2 days, then we define the stream as an interrupted HSSWS.

3. CHARACTERISTICS OF HSSWS

3.1. Total number of HSSWSs

The yearly distribution of the total number of the HSSWSs is given in Figure 3a. It is interesting that the year 2003 is the year that tended to have the most of the HSSWSs throughout the solar cycle 23, with approximately six HSSWSs per month. This year was characterized by a lot of extreme solar events, such as in October and November 2003. In addition, the most of the HSSWSs occurred during the descending phase with a percentage of 33.7 % of the total number of 710 HSSWSs during this cycle, as it is illustrated in Figure 3b. Then the ascending phase and the maximum phase follow with percentages of 21.5 % and 30.1 % respectively, while, during minimum phase, the number of HSSWS is the lowest with a percentage of only 14.6 % of the total number of HSSWSs. These results are in agreement with the results of the previous cycles 20, 21 and 22. [Maris, Maris, 2005] concluded that, during the solar cycles 20–22, the frequency of the streams was higher during the descending and minimum phases of cycles 20, 21 and 22, regardless of their solar sources (coronal holes/solar flares).

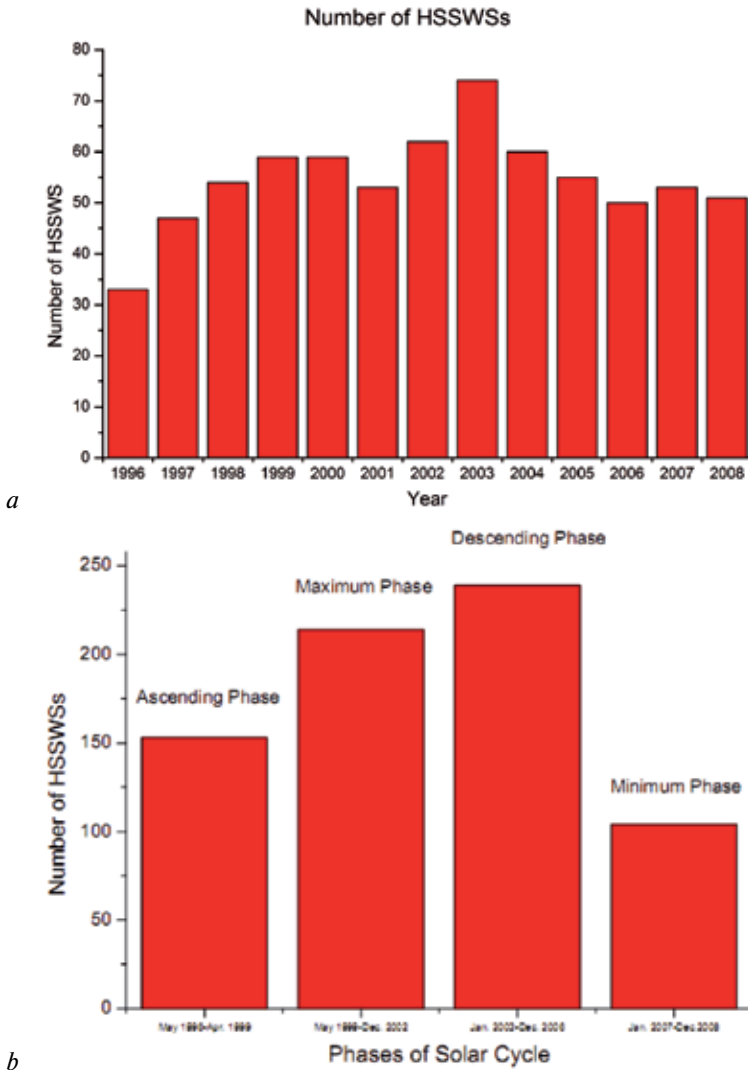


Figure 3. *a* – annually number of HSSWSs for solar cycle 23 (from May 1996 to December 2008); *b* – total number of HSSWSs in each phase of the solar cycle 23

3.2. Duration of HSSWSs

Previous studies of the solar cycles 20, 21 and 22 have shown that the distribution of the duration of the HSSWSs shows a maximum around 4–6 days for the even cycles and almost 6–8 days for the odd ones. The odd cycles appeared more active than the even cycles [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998]. Also, [Gupta, 2010] divided the streams of 23rd Solar Cycle into three categories, namely: 1) short-duration High Speed Streams (HSS), those with $\Delta t \leq 4$ days; 2) medium-duration HSS with $4 \text{ days} < \Delta t \leq 8$ days; 3) long-duration HSS, those with $\Delta t \geq 8$ days with percentages 12, 46 and 43 % out of total 465 high-speed streams observed. Additionally, they observed that the short-duration HSS are more frequent in increasing phase, the

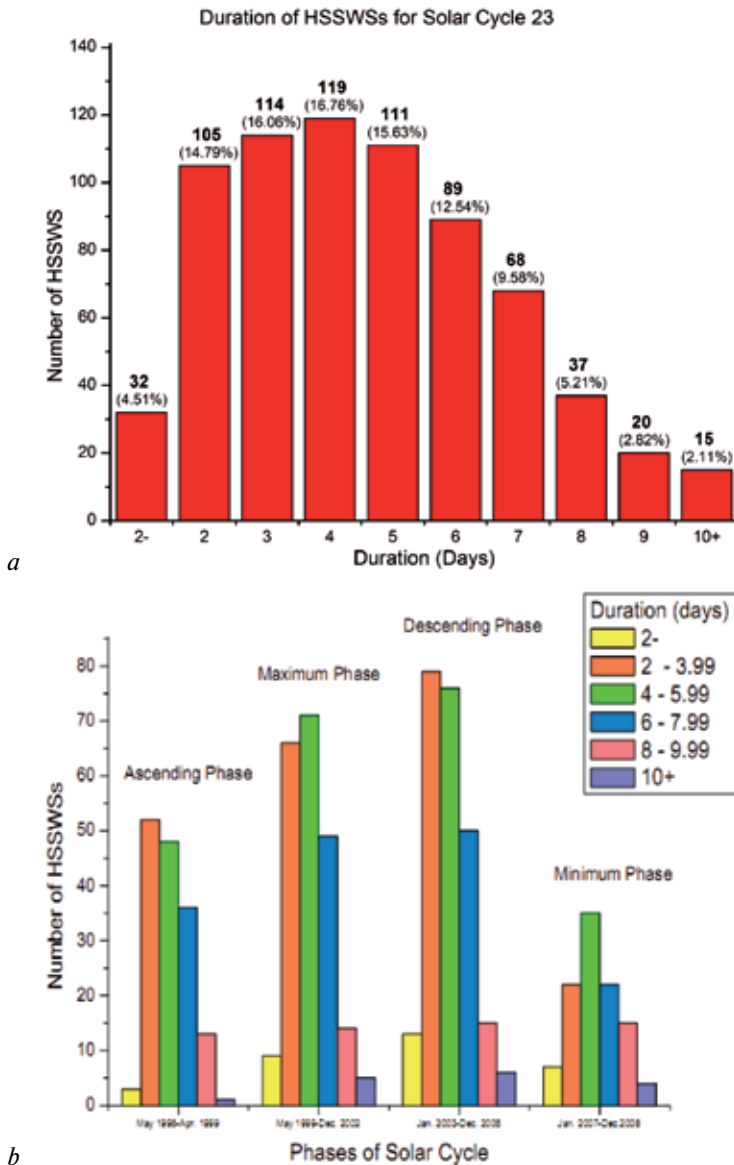


Figure 4. *a* — distribution of the HSSWSs duration during solar cycle 23; *b* — distribution of the HSSWSs duration during the different phases of the solar cycle 23

medium-duration HSS are less in declining phase and the last category of long-duration HSS prevail during maximum and decreasing phase of solar cycle 23.

In this study, the HSSWSs have been divided into the following bins, as seen in Figure 4a, regarding their duration:

- 1) HSSWSs with duration less than or equal to 1.99 days (they are symbolized as 2 days),
- 2) HSSWSs with duration between 2 and 3.99 days,
- 3) HSSWSs with duration between 4 and 5.99 days,
- 4) HSSWSs with duration between 6 and 7.99 days,

- 5) HSSWSs with duration between 8 and 9.99 days,
- 6) HSSWSs with duration equal to or greater than 10 days, symbolized as 10⁺ days.

This division revealed that the prevalent HSSWSs are those whose duration ranges between 4 and 5.99 days with a percentage of 32.4 % out of total 710 HSSWS observed. Considering a decreasing order, the HSSWSs appear duration between 2–3.99 days and 6–7.99 days with percentages of 30.9 and 22.11 % respectively. The fewer HSSWSs are those symbolized as 2– and 10+, where they constitute only the 4.51 and 2.11 % out of total 710 HSSWS respectively. Therefore, taking in mind the statistical error for each duration bin, in our study appeared that the most HSSWSs for solar cycle 23 last from 3 to 5.99 days. This conclusion is in agreement with the previous study of [Gupta, 2010], where the prevalent HSSWS are those they characterized as medium-duration high speed stream with duration 4 days $< \Delta t \leq 8$ days (46 %).

Regarding the distribution of HSSWSs duration during the phases of the solar cycle, as seen in Figure 4b, the most HSSWSs in the ascending phase last between 2 and 3.99 days (33.99 % out of the total 153 HSSWSs in the ascending phase). In the maximum phase the HSSWSs that last between 4 and 5.99 days (33.17 % of 214 HSSWS in maximum phase) are dominate. Additionally during the descending phase prevail the HSSWSs that last from 2 to 3.99 days (33.05 % of the 239 observed HSSWSs for the descending phase), followed closely by the HSSWSs that last from 4 to 5.99 days (31.80 % of the 239 observed HSSWSs). Finally, the most frequent HSSWS during the minimum phase are to be those with duration between 4 and 5.99 days (33.65 % out 104 HSSWSs during minimum). It is worth to be mentioned that the most frequent Interrupted HSSWSs (symbolized as 2-days) are observed during the descending phase with a percentage of 40.6 % of the total number of them; that's a result of the high solar activity during that phase, where HSSWSs were constantly generated, leaving no space for the interrupted HSSWSs to come up as a normal HSSWS. Also the HSSWSs characterized as 10+ days appear most frequently during the descending phase 40.0 % of the total 15 HSSWSs in the 10+ days group. Finally, it is important to be mentioned that the HSSWS with the maximum duration of 16.71 days is observed during the maximum phase.

3.3. Maximum Speed of HSSWSs

For the purposes of this distribution, the total number of 710 HSSWSs has been divided into bins of $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, from 400 to $1199 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ in each of the four phases of the solar cycle 23. Also the streams with data gaps in the V_{max} have been taken into consideration. In an overview, as seen in Figure 5, taking into account the phases of the solar cycle according to this study, in the ascending phase the most HSSWSs observed to have V_{max} between 400 and $499 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (almost 41.83 % of 153 HSSWS in ascending phase). In the maximum phase, V_{max} increases to $500\text{...}599 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (35.05 % of 214 HSSWSs in maximum phase). Then, in the descending phase V_{max} keeps rising with a 29.29 % of the 239 descending phase HSSWSs have V_{max} between 500 and $599 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, but also 32.22 % of them have V_{max} between $600\text{...}699 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Finally, in the minimum phase the most HSSWSs (41.35 % of 104 streams) have V_{max} of $600\text{...}699 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

A further analysis for the phases of solar cycle 23 shows, as already referred, in ascending phase the highest number of HSSWSs has V_{\max} of 400...499 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. In a decreasing order follow the 500...599 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin (35.95 %) and the 600...699 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin (16.99 %). The amount of 1.96 % of HSSWSs in the ascending phase belongs equally and respectively to the bins of 700...799 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ and 800...899 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Moreover, there is not any HSSWS observed with V_{\max} up to 900 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, while two HSSWSs have data gaps is their V_{\max} .

In the maximum phase the number of HSSWSs in the bin of 400...499 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ is starting to decrease (28.04 % out of 214 HSSWSs) and the predominant bin is those of 500...599 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (35.05 %). Considering the decreasing order follow the 600...699 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin (22.90 %), the 700...799 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin (8.88 %) and the 800...899 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin (2.80 %). It is worth to be mentioned that two HSSWSs are observed with V_{\max} between 900 and 999 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ and two HSSWSs with V_{\max} between 1000 and 1099 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin (0.93 % respectively). Also only one HSSWS has data gap at V_{\max} .

Subsequently, in descending phase, the number of HSSWSs belonging to the 500...599 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin is lower than the number of HSSWSs belonging to the 600...699 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin. In this phase, only 12.55 % of the HSSWSs belong to the 400...499 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin, while the 17.15, 5.86 and 1.67 % of the 239 descending phase HSSWSs constitute the 700...799 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin, 800...899 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin and 900...999 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ bin respectively. Also the HSSWSs with higher V_{\max} are observed more frequently, as four of the 239 HSSWSs have V_{\max} between 900 and 999 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ and two HSSWSs have V_{\max} between 1000 and 1099 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Finally, in that phase, it is observed the HSSWS with the highest V_{\max} of the Cycle, reaching a speed of 1189 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

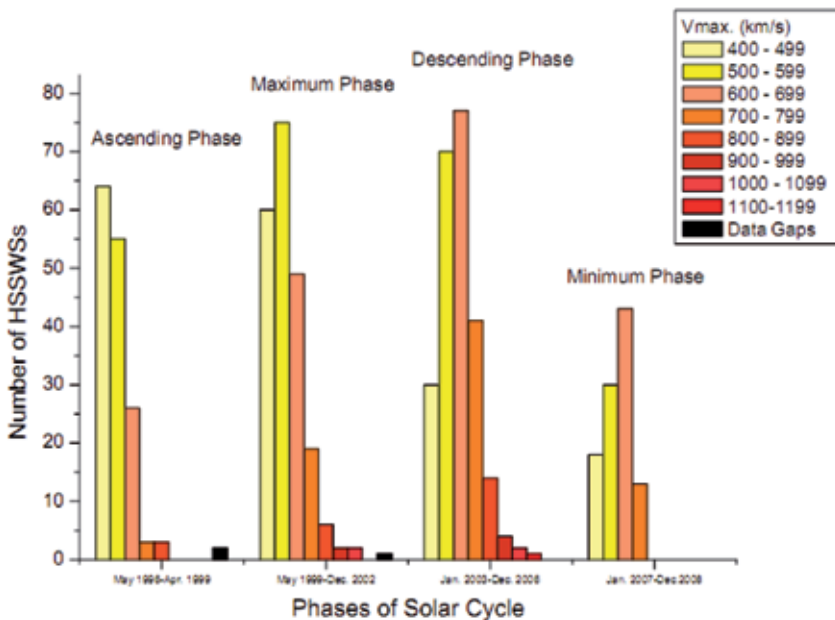


Figure 5. Distribution of the V_{\max} of each HSSWS in the phases of the solar cycle 23. It is clearly notable that the peak of the V_{\max} distribution is increasing through the solar cycle, until the Descending Phase and it stays at that level in the Minimum Phase (instead of dropping)

At last, as it is observed in minimum phase, most of the HSSWSs belong to the 600...699 km·s⁻¹ bin, and they follow in decreasing order: 500...599 km·s⁻¹ bin (28.85 %), 400...499 km·s⁻¹ bin (almost 17.30 %) and 700...799 km·s⁻¹ bin (12.50 %). It is worth to be mentioned that only one HSSWS has V_{\max} between 800 and 899 km·s⁻¹. Finally, during the descending and minimum phase there is not any data gap at V_{\max} of any HSSWS.

In conclusion, it is obvious that the V_{\max} distribution peak keeps rising until the descending phase (where it reaches the values of 600...699 km·s⁻¹) and instead of dropping in the minimum, it stays at those values. In addition, it is important to mention that the highest values of observed V_{\max} , considering an increasing order of V_{\max}^1 , are: 922 km·s⁻¹ (in 2002), 1010 km·s⁻¹ (in 2000), 1027 km·s⁻¹ (in 2004), 1040 km·s⁻¹ (in 2001), 1059 km·s⁻¹ (in 2005) and 1189 km·s⁻¹ (in 2003).

3.4. Sources of HSSWSs

As it is being mentioned, the possible sources of HSSWSs are the coronal holes and the solar flares. Therefore, the HSSWSs were classified into two categories, corotating and flare-generated streams, respectively. [Lindblad, Lundstedt, 1981, 1983; Lindblad et al., 1989] presented the HSSWSs observed by near-Earth spacecraft in the periods 1964–1975, 1975–1978 and 1978–1982 (solar cycles 20 and partly 21). [Mavromichalaki et al., 1988] presented a catalogue of HSSWSs for the period 1972–1984 and, as a continuation of the previously published catalogue, [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998] presented the HSSWSs catalogue for the period 1985–1996 (cycle 22) and they classified them into the above mentioned categories. The conclusions of the last paper indicates that the number of flare-generated streams is greater around the solar maximum (1969, 1979 and 1989 of cycles 20, 21 and 22 respectively), while corotating streams are more around the solar minimum. Also, [Maris, Maris, 2005] followed this classification of HSSWSs for the solar cycles 20–22: the ones produced by coronal holes (CH_HSPS) and the ones produced by solar flares (FG_HSPS). They revealed that the CH_HSPS prevail during the minimum phases of solar cycles, due to the large extended coronal holes towards the equator registered in the minimum phases of solar cycles, while the FG_HSPS variation follows the 11-year cycle of sunspots.

Furthermore, [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998] concluded that the activity of solar cycle 21, which is an odd cycle, was greater than the activity of 20th and 22nd solar cycles, which are even cycles. This fact shows a periodicity, due to the 22-year variation of solar magnetic field [Legrand, Simon, 1981; Simon, Legrand, 1992; Mavromichalaki et al., 1997; Mavromichalaki, Vassilaki, 1998]. Also this indicates different behaviors between odd and even cycles, such as the large number of flare-generated streams during the odd cycles and the appearance of two maxima during the even cycles. [Maris, Maris, 2005] showed that the solar cycles 20 and 22 have similar dynamics of FG_HSPS and CH_HSPS parameters during maximum, descending and reversal intervals. They revealed that the solar cycle 21 dominance of all the CH_HSPS parameters against the 20th and 22nd solar cycle, during almost all phases, could be due to the same structure of Hale cycle, though solar cycle 21 has a larger number of FG_HSPS as the even cycles.

In addition to our study, it is worth to be mentioned that the corotating streams are connected with simple decreases of cosmic rays recorded at ground based station

and the flare-generated streams produce Forbush decreases on Earth [Iucci et al., 1979; Mavromichalaki et al., 1988]. Also strong flares recorded by Neutron Monitors on Earth, reveal large level enhancements (GLE) associated with energetic solar proton events, such as those of 22nd solar cycle [Belov, Eroshenko, 1996].

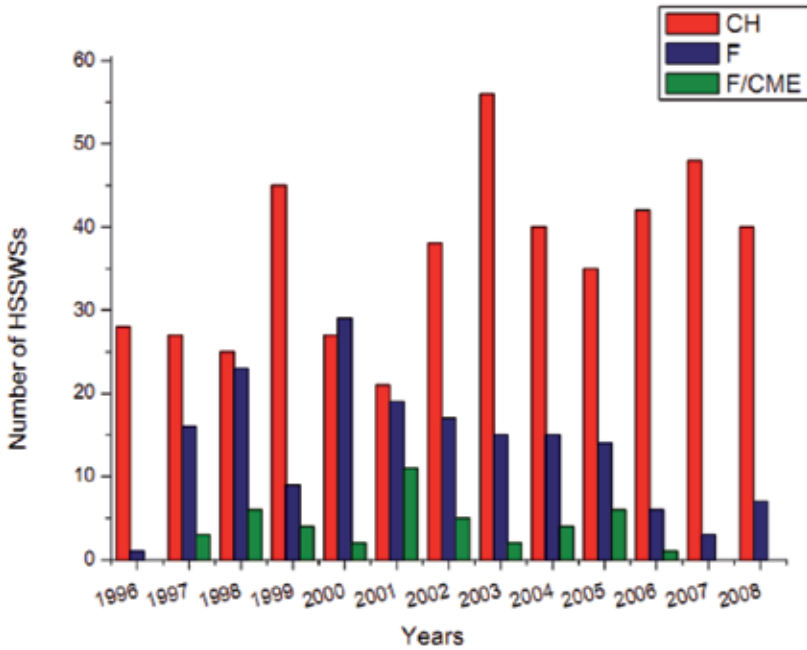
In an earlier paper [Gupta, 2010], divide the HSSWSs of solar cycle 23 into five groups, namely associated with: 1) a single coronal hole (SCH); 2) a single mass ejection (SME); 3) multiple coronal holes (MCH); 4) multiple mass ejections (MME); 5) compound streams associated with both coronal hole(s) and mass ejection(s) (CMP). They concluded that out of 465 streams the majority of them (43 %) produced by a single coronal hole, and in a descending order follow: the compound streams (26 %), the streams produced by multiple coronal holes (18 %), a single mass ejection (9 %) and the minority of them (4 %) are related to multiple mass ejections.

In this work, as a continuation of the previous works of [Mavromichalaki et al., 1988; Mavromichalaki, Vassilaki, 1998], the HSSWSs are considered as follows: corotating streams (CH) which are those that are emitted by coronal holes and flare-generated streams (F) which are those that are associated with active regions of Sun emitting solar flares. Also, for this Solar Cycle, because of the availability of good quality coronagraph data, an attempt is made to take in mind the CMEs, as a possible source of HSSWSs. Therefore, the 710 HSSWSs are divided into six groups:

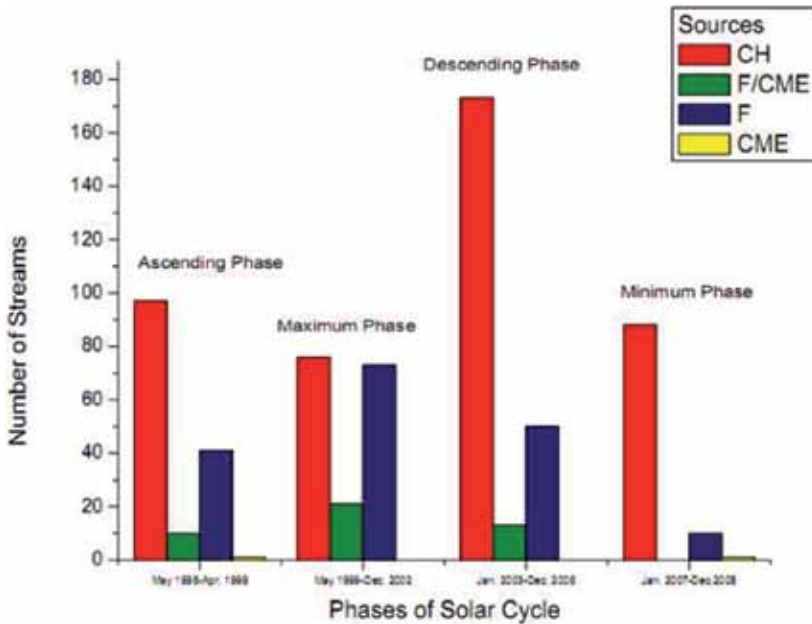
- 1) corotating streams, those that are produced by corotating coronal holes; marked with the symbol CH;
- 2) flare-generated and CME-generated streams, those that are produced by both flare and CME; marked with the symbol F/CME;
- 3) flare-generated streams, those that are produced only by a flare; marked with the symbol F;
- 4) CME-generated streams, those that are produced by only a CME; marked with the symbol CME;
- 5) flare-generated and CME-generated streams in the case that the possible active origin is not clear; marked with the symbol F/CME ?
- 6) those that their origin is not clear; marked with the symbol: ?

In these terms we have statistically studied the distribution of HSSWS per year and phase of solar cycle.

The annually distribution of HSSWSs on the basis of their origin, as shown in Figure 6a, reveals that the most streams of solar cycle 23 are corotating streams (CH). The majority of CH HSSWSs (56 CH) is produced in 2003 and the minority of them (21 CH) in 2001, while the majority of streams that are related to both flares and CMEs (11 F/CME) were observed in 2001. As shown the maximum of the distribution of flare-generated streams (29 F) is placed in the year 2000. It is worth to be mentioned that we had individual CME-generated streams (CME) that give no notable distribution to show an 11-year variation. Those individual CME HSSWS take place in years 1997 and 2008. The same fact is observed for the flare-generated and CME-generated streams in the case that the possible active origin is not clear (F/CME ?), where individual cases take place in the years 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 and 2006. Also a number of ten HSSWSs have doubtful and no clear origin (?). Their number in comparison to the total number of HSSWSs presents a negligible error.



a



b

Figure 6. a — annual distribution of the sources of the HSSWSs6; b — distribution of the sources of the HSSWSs for each phase of solar cycle 23

Regarding the source distribution via the mentioned phases of solar cycle 23, as presented in Figure 6b, it is proved that the most HSSWSs are CH and take place in the descending and the ascending phases of cycle, where 131 CH (39.9 % of total 434 CH) and 97 CH (22.4 %) are shown respectively. On the other hand the F and the F/CME HSSWSs show an 11-year variation. Most of them, in percentages

of 42 % of total 174 F and 47.7 % of 44 F/CME HSSWSs, are observed in maximum phase, but still the number of them is significantly lower than the CH HSSWSs. Finally, for consistency, the two individual CME HSSWSs are considered and they are observed in ascending and minimum phase, but this result is not significant, due to its few data.

Concluding, the majority of HSSWSs are CH HSSWSs, despite the fact that the solar cycle 23 is an odd cycle. This is shown in both Figures 6a and b, where 63.4 % out of total 153 HSSWSs in ascending phase, 35.5 % of 214 HSSWSs in maximum, 72.4 % of 239 HSSWSs in descending phase and 84.6 % of 104 HSSWSs during minimum are CH HSSWSs. [Maris, Maris, 2005] come, also, in that conclusion, where it is mentioned that “the best-established sources of the HSPSs are the coronal holes- the regions with open magnetic fields”. The majority of F HSSWSs appeared in maximum phase (34.1 % of 214 HSSWS) is in agreement with previous studies, where the same was observed in maximum phase (1969, 1979, 1989 for solar cycles 20, 21 and 22 respectively), as a result to the fact that the large coronal holes existing during the solar minimum giving a lot of corotating streams. As a total conclusion, the number of F and F/CME HSSWSs is higher around the maximum phase showing an 11-year variation; this is in agreement with what was observed by plotting the number of F HSSWSs for each year for the solar cycles 20–22 [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998] and the statistical study of flare-generated streams of the period 1964–1996 [Maris, Maris, 2005]. In contrast, the CH HSSWSs number is high throughout the solar cycle, but according to [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998] it was expected to be high only in the ascending phase and in the minimum.

CONCLUSIONS

A detailed analysis of the HSSWSs registered in the time interval 1966–2008 covering the solar cycle 23, was carried out and a great number of 710 HSSWSs were well defined. It is noted that 434 of them were generated by corotating coronal holes (CH), 261 were generated by flares, CMEs or both (F, CME or F/CME) and the origin of 15 was not clear. It means that more than half of them are generated by coronal holes, fact that it was not appeared in previous cycles.

It is known that the last solar cycle 23 was one of the most active cycles characterized by many extreme solar events. In this study it was observed that the maximum appearance of HSSWSs (73 HSSWSs) took place in the year 2003 that is in the descending phase of this cycle, right after the secondary maximum of the solar activity. In addition, the greatest ratio of consecutive HSSWSs appears in both the maximum and descending phases of solar cycle 23, where 7 out of 10 HSSWSs were consecutive.

The average duration of the HSSWSs of the solar cycle 23 through our work is 3 to 5 days. Compared to our previous works [Mavromichalaki et al., 1988; Mavromichalaki, Vassilaki, 1998], we observed that the duration of the HSSWSs tends to drop with every solar cycle: the average duration of the 21st solar cycle HSSWSs was 6...7 days, the one of the 22nd solar cycle was 4–5 days and as we mentioned before, the one of the 23rd solar cycle was 3–5 days. This might be a hint of a more active Sun as the cycles go by, because the continuous generation of HSSWSs prevents the Sun of generating long HSSWSs. Also, for this cycle, we can accept the

fact that we had more advanced equipment and more spaceships for the detection of the solar wind characteristics. In addition, we had the opportunity of analyzing a complete data base with data from all the spaceships and that makes the work for the 23rd solar cycle more reliable than the work of previous cycles.

As concerns the maximum velocity of the HSSWSs we concluded that in the ascending solar phase most of the HSSWSs observed to have V_{\max} between 400 and 499 km·s⁻¹, in the maximum phase the peak of V_{\max} distribution increases to 500...599 km·s⁻¹, in the descending phase the V_{\max} peak keeps rising as most of the HSSWSs occurred have a V_{\max} of 500...599 km·s⁻¹ and 600...699 km·s⁻¹ and in the minimum phase dominates a V_{\max} of 600...699 km·s⁻¹. It is notable that the HSSWSs with the highest values of V_{\max} (900...999, 1000...1099 and 1100...1199 km·s⁻¹ bins) are observed more frequently in the maximum and the descending phases. In time evolution it is clear that V_{\max} peak increases until descending phase, where it stays stable to the minimum phase; though in the minimum phase V_{\max} higher than 800 km·s⁻¹ vanished.

Finally, the annually HSSWSs source distribution showed that the most HSSWSs that occurred in solar cycle 23 are CH HSSWSs, with the maximum of their distribution shown in the year 2003 and the minimum in the year 2001. The majority of F/CME and F HSSWSs combined occurred in 2001, 2000 and 1998 respectively. The CME and F/CME ? HSSWSs give no notable distribution due to their few data points, while 10 HSSWSs are found with doubtful origin. Although that solar cycle 23 is an odd one, the distributions of HSSWSs according to their sources during the considered phases, reveal that most of the CH HSSWSs occurred during the descending and ascending phases, but in general there were many CH HSSWSs through the whole cycle. Also, most of the F and F/CME HSSWSs are observed in the maximum phase, showing an 11-year variation. The conclusions of this work are in good agreement with the studies of the solar cycles 20, 21 and 22.

In summary, we can say that one of the most dynamical interplanetary phenomena of Solar-Terrestrial Physics is definitely the passage of solar wind streams near the Earth environment. Studies of various aspects of the solar wind velocity variability with time in the ecliptic plane revealed a solar wind tendency to be organised as stream structures e.g. [Iucci et al., 1979; Lindblad, Ludstedt, 1981]. In particular, the characteristics and the long-term variations in the occurrence rate of high-speed streams for solar cycles 20, 21 and 22 have been studied in [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998; Maris, Maris, 2005]. Reference catalogues of high-speed solar wind streams observed near the Earth have been produced, considering two possible solar sources, coronal holes and active regions emitting solar flares. In this work a new high speed streams source concerning the CMEs is added, as CMEs data are now available. In the future an extended study concerning the sources of this great number of these events during the solar cycle 23 will be very useful for Space Weather studies.

Acknowledgments. Thanks are due to all colleagues that are working and provide kindly all this amount of solar and interplanetary data used in this work. Acknowledgment is also held to the Special Research Account of the National and Kapodistrian University of Athens, for supporting G. Xystouris to present this work in the Space Weather Effects on Humans Conference held in Moscow (3–7 June 2012).

REFERENCES

- [Bame et al., 1976] *Bame S. J., Asbridge J. R., Feldman W. C., Gosling J. T.* Solar cycle evolution of high-speed solar wind streams // *Astrophysics J.* 1976. V. 207. P. 977–980.
- [Belov et al., 1996] *Belov A. V., Eroshenko E. A.* Proton spectra of the four remarkable GLE in the 22nd solar cycle // *Radiation Measurements.* 1996. V. 26. N. 3. P. 461–466.
- [Broussard et al., 1978] *Broussard R. M., Tousey R., Underwood J. H., Sheeley N. R. Jr.* A survey of coronal holes and their solar wind associations throughout sunspot cycle 20 // *Solar Physics.* 1978. V. 56. P. 161–183.
- [Gosling et al., 1976] *Gosling J. T., Asbridge J. R., Bame S. J., Feldman W. C.* Solar wind speed variations — 1962–1974 // *J. Geophysical Research.* 1976. V. 81. P. 5061–5070.
- [Gupta, 2010] *Gupta V., Badruddin.* High-Speed Solar Wind Streams during 1996–2007: Sources, Statistical Distribution, and Plasma/Field Properties // *Solar Physics.* 2010. V. 264. P. 165–188.
- [Hollweg, 1974] *Hollweg J. V.* Hydromagnetic waves in interplanetary space // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* 1974. V. 86. P. 561–594.
- [Intriligator, 1977] *Intriligator D. S.* Evidence for a constant speed of shock propagation between 0.8 AU and 2.2 AU // *Proc. 15th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC).* 1977. V. 11. P. 225–229.
- [Iucci et al., 1979] *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* High-speed solar-wind streams and galactic cosmic-ray modulation // *Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics.* 1979. V. 2. P. 421–438.
- [Legrand, Simon, 1981] *Legrand J. P., Simon P. A.* Ten cycles of solar and geomagnetic activity // *Solar Physics.* 1981. V. 70. P. 173–195.
- [Lindblad, Lundstedt, 1981] *Lindblad A., Lundstedt H.* A catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind // *Solar Physics.* 1981. V. 74. P. 197–206.
- [Lindblad, Lundstedt, 1983] *Lindblad B. A., Lundstedt H.* A catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind 1975–1978 // *Solar Physics.* 1983. V. 88. P. 377–382.
- [Lindblad et al., 1989] *Lindblad B. A., Lundstedt H., Larsson B.* A third catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind — Data for 1978–1982 // *Solar Physics.* 1989. V. 120. N. 1. P. 145–152.
- [Maris, Maris, 2005] *Maris O., Maris G.* Specific features of the high-speed plasma stream cycles // *Advances in Space Research.* 2005. V. 35. P. 2129–2140.
- [Mavromichalaki, Vassilaki, 1998] *Mavromichalaki H., Vassilaki A.* Fast Plasma Streams Recorded Near the Earth During 1985–1996 // *Solar Physics.* 1998. V. 183. P. 181–200.
- [Mavromichalaki et al., 1988] *Mavromichalaki H., Vassilaki A., Marmatsouri E.* A catalogue of high-speed solar-wind streams — Further evidence of their relationship to Ap index // *Solar Physics.* 1988. V. 115. P. 345–365.
- [Mavromichalaki et al., 1997] *Mavromichalaki H., Vassilaki A., Tsagouri I.* Features of the high-speed plasma streams during the last solar cycle // *Joint European and National Astronomy Meeting (JENAM-97): Abstr.* 1997. P. 83.
- [Morley, 2009] *Morley S. K., Rouillard A. P., Freeman M. P.* Recurrent substorm activity during the passage of a corotating interaction region // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2009. V. 71 P. 1073–1081.
- [Parker, 1959] *Parker E.* Extension of the Solar Corona into Interplanetary Space // *J. Geophysical Research.* 1959. V. 64. P. 1675–1681.
- [Simon, Legrand, 1992] *Simon P. A., Legrand J. P.* Toward a model of a two-component solar cycle // *Solar Physics.* 1992. V. 141. N. 2. P. 391–410.

АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА № 23: ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Г. Хистурис, Е. Сигала, Х. Мавромичалаки

Отделение ядерной физики, Физический факультет,
Национальный и Каподистрийский университет, Афины, Греция

Высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSSWSs) выбрасываются из Солнца и путешествуют в межпланетном пространстве. Благодаря своей высокой скорости они несут потоки энергичных частиц, таких как протоны и тяжёлые ионы, что приводит к возрастанию среднего межпланетного магнитного поля (ММП).

Поскольку Земля находится на их пути, магнитосфера Земли взаимодействует с возмущениями магнитного поля, что приводит к значительной индуцированной этими эффектами деградации технологических систем, обеспечивает возрастание передачи энергии от солнечного ветра/ММП в магнитосферу Земли и начало геомагнитных возмущений, имеющих возможное воздействие на здоровье человека.

23-й солнечный цикл был особенно необычным, сопровождался многими энергичными явлениями во время фазы убывания цикла и наличием продолжительного минимума. В нашем исследовании мы выявили и каталогизировали HSSWSs для 23-го солнечного цикла.

Мы определили ряд характеристик потоков, таких как их максимальная скорость, времена их начал и окончаний, их продолжительность, их возможные источники и т. д. Кроме того, мы изучили распределение многих из этих параметров в солнечном цикле.

Мы считаем, что этот каталог будет полезен для мониторинга космической погоды и её прогнозов, изучения возможного влияния космической погоды на здоровье человека, планирования будущих космических полётов.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ КАК ФАКТОР И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА БИОСФЕРУ

Л. И. Дорман^{1,2}

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Россия, e-mail: lid010529@gmail.com

² Университет Тель-Авива и Израильское космическое агентство, Центр космических лучей и космической погоды, Израиль

Работа состоит из трёх частей.

В первой части даётся введение в проблему.

Во второй части приводятся результаты анализа длительных рядов ежедневных показателей инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных инцидентов с тяжёлым исходом в спокойное время и в периоды сильных форбуш-понижений интенсивности космических лучей. Обнаружено существенное возрастание ежедневного числа инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных катастроф в периоды мощных магнитных бурь, сопровождаемых сильными форбуш-понижениями интенсивности космических лучей. Показано, что в данном случае космические лучи практически не воздействуют на здоровье людей, но являются индикатором воздействия космической погоды (корональных выбросов плазмы и межпланетных ударных волн) на здоровье людей (через процессы в магнитосфере Земли). Показано также, как непрерывные наблюдения космических лучей могут быть использованы для предсказания ситуаций космической погоды, опасных для здоровья людей, и тем самым резко снизить риск получения инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных инцидентов с тяжёлым исходом.

В третьей части мы рассматриваем прямое воздействие космических лучей на биосферу (так называемые радиационные эффекты). Дело в том, что под огромной толщей атмосферы (около 1000 г/см^2) поток космических лучей уменьшается почти в сто раз. Тем не менее, поток мюонов и релятивистских электронов у земной поверхности составляет около миллиона на квадратный метр за один час, причём каждая космическая частица на сантиметре пути в теле человека создаёт около 50 000 ионов и разрушений молекул. Кроме того, в результате каскадных процессов возникает поток нейтронов, свободно проникающих вглубь объектов биосферы и производящих различные ядерные реакции. За многие миллионы лет биосфера практически адаптировалась к этим потокам космических лучей (более того, космические лучи сыграли решающую роль в существенном ускорении эволюции биосферы и довольно быстром появлении человека). Однако, когда потоки космических лучей возрастают в несколько раз (как во время очень мощных солнечных вспышек или при полётах на современных самолётах на высоте около 10 км), или даже во многие десятки и сотни раз (как при полётах на спутниках в магнитосфере Земли или на космических кораблях в межпланетном пространстве, или даже на земной поверхности в случае вспышек Сверхновых на расстояниях от Солнца не далее 10...15 парсек), получаемая радиационная доза становится существенной или даже чрезвычайно опасной. Мы описываем разработанный нами метод предсказания ожидаемой радиационной опасности от мощных солнечных вспышек в атмосфере, в зависимости от высоты и жёсткости геомагнитного обрезания, а также для спутников и космических кораблей на основе минутных данных наблюдений космических лучей на нейтронных мониторах и спутниках.

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) — непрерывный, почти изотропный поток высокоэнергичных протонов (почти 90 %), α -частиц (около 9 %) и более тяжёлых ядер, а также электронов, позитронов и γ -лучей (всего около 1 %) с энергией

от $\sim 10^6$ до $\sim 10^{21}$ эВ — один из важнейших факторов космической погоды, определяющий радиационную опасность для биосферы (и, в частности, для человека), а также для электроники на космических аппаратах в магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве, и на самолётах, а иногда даже на земной поверхности. С другой стороны, КЛ могут использоваться как инструмент для предсказания опасных эффектов космической погоды и тем самым уменьшить риск негативного воздействия космической погоды на здоровье человека и работу высоких технологий.

Влияния КЛ и других факторов космической погоды на биосферу можно рассматривать в трёх аспектах. **В первом аспекте** исследуется влияние КЛ и других факторов космической погоды (в первую очередь, воздействие космической пыли и КЛ на образование планетарного облачного покрова, движение Солнечной системы вокруг центра Галактики и её столкновения с молекулярно-пылевыми облаками, локальные вспышки Сверхновых и т. п.) на глобальное изменение земного климата и через это — на эволюцию биосферы. Этот аспект здесь только упоминается, поскольку он детально рассматривается в работе [Дорман, 2012].

Во втором аспекте анализируются длительные ряды ежедневных показателей инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных инцидентов с тяжёлым исходом в спокойное время и в периоды сильных форбуш-понижений интенсивности КЛ. **Обнаружено существенное (на уровне 7...9σ) возрастание** ежедневного числа инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных катастроф в периоды мощных магнитных бурь, сопровождаемых сильными форбуш-понижениями интенсивности КЛ. Показано, что в данном случае КЛ практически не воздействуют на здоровье людей, но являются индикатором воздействия космической погоды (корональных выбросов плазмы и межпланетных ударных волн) на магнитосферу Земли и через это воздействие — на здоровье людей. Показано также, как непрерывные наблюдения космических лучей могут быть использованы для предсказания ситуаций космической погоды, опасных для здоровья людей, и тем самым резко снизить риск получения инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных инцидентов с тяжёлым исходом.

В третьем аспекте мы рассматриваем прямое воздействие КЛ на биосферу (так называемые радиационные эффекты). Дело в том, что под огромной толщей атмосферы (около 1000 г/см^2) поток космических лучей уменьшается почти в 100 раз. Тем не менее, поток мюонов и релятивистских электронов у земной поверхности составляет около миллиона на квадратный метр за один час, причём каждая космическая частица в теле человека создаёт около 50 000 ионов и разрушений молекул на сантиметре пути. Кроме того, в результате каскадных процессов в атмосфере и внутри биологического объекта возникает поток нейтронов, свободно проникающих во внутренние части объектов биосферы и вызывающих различные ядерные реакции. Всё это приводит не только к сильному радиационному воздействию на биосферу, но и к ускорению мутации генов и к соответствующему ускорению эволюции биосферы. Следует подчеркнуть, что за многие миллионы лет биосфера на земной поверхности практически адаптировалась к этим потокам космических лучей. Более того, космические лучи с увеличением частоты мутаций генов могли сыграть решающую роль в существенном ускорении эволюции биосферы и довольно быстром появлении человека. Однако, когда потоки космических

лучей возрастают в несколько раз (как во время очень мощных солнечных вспышек или при полётах на современных самолётах на высоте около 10 км), или даже во многие десятки и сотни раз (как при полётах на спутниках в магнитосфере Земли или на космических кораблях в межпланетном пространстве), радиационная опасность становится существенной. Мы описываем разработанный нами метод предсказания ожидаемой радиационной опасности от мощных солнечных вспышек в атмосфере в зависимости от высоты и жёсткости геомагнитного обрезания, а также для спутников и космических кораблей на основе начальных минутных данных наблюдений космических лучей на нейтронных мониторах и спутниках.

1. О НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ЗДОРОВЬЕ ЛЮДЕЙ И ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ИХ ПРЕДСКАЗАНИЯ

1.1. Возрастание частоты инфарктов миокарда, инсультов, а также автомобильных инцидентов с тяжёлым исходом в периоды захвата Земли ударными волнами и мощными выбросами корональной плазмы

Захват Земли межпланетными ударными волнами и мощными выбросами корональной плазмы вызывает пертурбации в земной магнитосфере и приводит к изменениям магнитного поля (**Dst-вариации во время магнитных бурь**). Особенно большие магнитные бури сопровождаются, как правило, форбуш-понижениями интенсивности галактических КЛ. Около 20 лет назад мы начали в группе российских и итальянских учёных детальные исследования возможного воздействия сильных магнитных бурь, сопровождающихся форбуш-понижениями КЛ, на здоровье людей. Эта большая работа была, по существу, инициирована Т. Бреус ровно 20 лет назад. Ей удалось собрать и переправить в Рим, где я в это время работал в Римском университете с профессором Н. Ючи и доктором Дж. Вилоресси, данные о семи миллионах вызовов скорой медицинской помощи по Москве за три полных года (1979–1981) (включая ежедневные данные об инфарктах миокарда и инсультах). В дальнейшем были использованы также аналогичные данные по Санкт-Петербургу за 1981 г. и 1987–1989 гг. **об автомобильных катастрофах с тяжёлым исходом**, требующие вызовов скорой медицинской помощи. Было обнаружено, что в дни форбуш-понижений интенсивности КЛ, ежедневное количество инфарктов миокарда, инсультов и автомобильных катастроф с тяжёлым исходом возрастает на $13 \pm 1,4 \%$, $7 \pm 1,6 \%$ и $17 \pm 3 \%$, соответственно [Птицына и др., 1998; Dorman et al., 1999; Villaresi et al., 1994, 1995]. Рисунки 1 и 2 иллюстрируют эти результаты, на них видно, что наиболее чётко проявляется воздействие космических магнитных бурь на здоровье людей для бурь, сопровождаемых форбуш-понижениями интенсивности КЛ. Однако причина этого не совсем ясна. Возможно, это обусловлено тем, что сопровождаемые форбуш-понижениями интенсивности КЛ магнитные бури характеризуются возрастанием амплитуды колебаний магнитного поля, в том числе, в окрестности частоты ~ 1 Гц, близкой к собственной частоте колебаний сердца.

В результате возникает резонансное усиление воздействия индуцированных во время магнитной бури токов с собственными токами в теле человека. Для достаточно здоровых, молодых людей это, по-видимому, не критично,

а для ослабленного какой-либо болезнью или очень пожилого человека это воздействие с большей вероятностью может приводить к инфарктам миокарда и инсультам. Наш совет: для людей с отмеченным выше повышенным риском в течение одного-двух дней форбуш-понижения интенсивности КЛ (информацию о таких событиях регулярно выдаёт через Интернет, например, ИЗМИРАН) резко уменьшить физическую нагрузку, а ещё лучше, провести это время в специальном помещении, защищённом от вариаций магнитного поля.

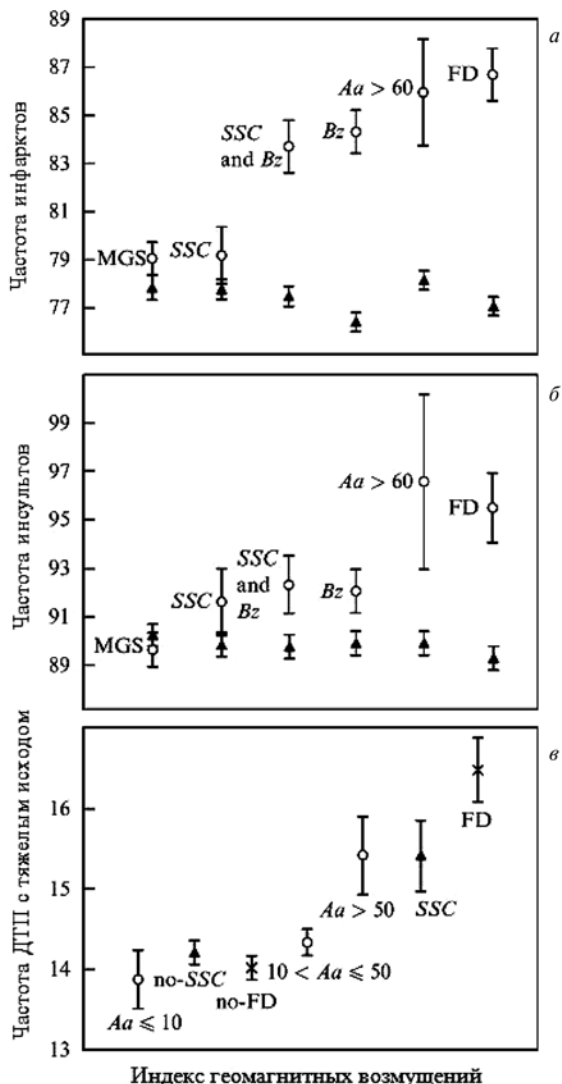


Рис. 1. Среднесуточные числа инфарктов миокарда (а), инсультов (б) по данным скорой медицинской помощи в Москве за 1979–1981 гг., и автомобильных ДТП с тяжелым исходом (в) по данным скорой медицинской помощи в Санкт-Петербурге за 1987–1989 гг. в спокойные и магнитно-возмущенные дни (отобранные по различным индексам: MGS, aa, SSC, Bz межпланетного магнитного поля и FD — форбуш-понижения интенсивности КЛ)

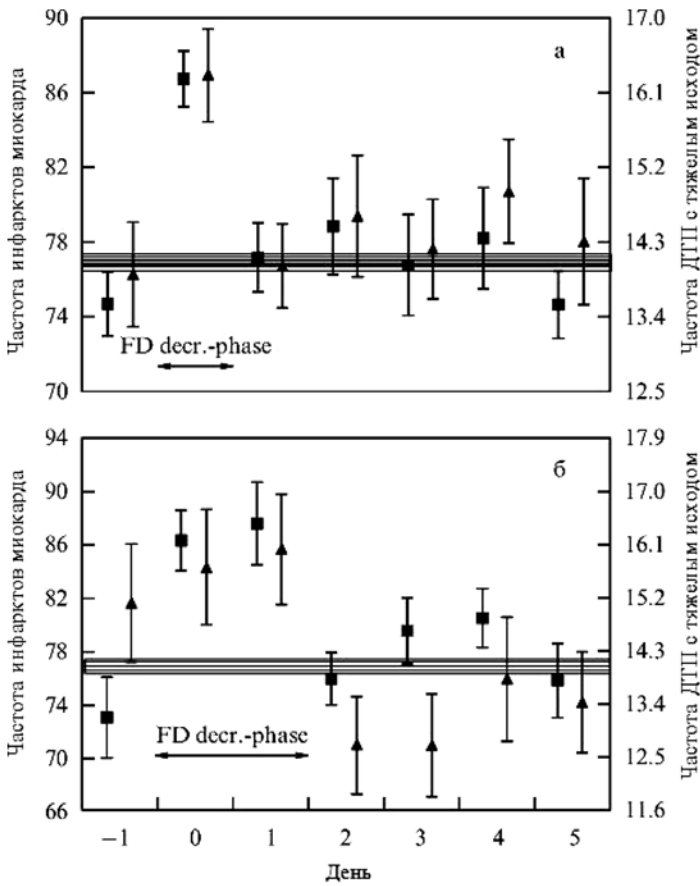


Рис. 2. Среднесуточные числа инфарктов миокарда в Москве по данным скорой медицинской помощи за 1979–1981 гг. (черные квадраты) и среднесуточные числа автомобильных ДТП с тяжелым исходом в Санкт Петербурге по данным скорой медицинской помощи за 1987–1989 гг. до, в период и после форбуш-понижения интенсивности КЛ. Нулевой день — день начала форбуш-понижения. Верхняя панель — для форбуш-понижений продолжительностью $T < 1$ сут (25 форбуш-понижений для инфарктов миокарда и 55 — для автомобильных ДТП). Нижняя панель — для форбуш-понижений продолжительностью $1 < T < 2$ сут (30 форбуш-понижений для инфарктов миокарда и 30 — для автомобильных ДТП). Заштрихованные горизонтальные полосы на обеих панелях показывают частоту инфарктов миокарда и автомобильных ДТП с тяжелым исходом в спокойные дни (т. е. в дни без форбуш-эффектов в КЛ)

Соответствующее устройство можно изготовить самому в домашних условиях (в ближайшие годы должно быть налажено промышленное производство таких простейших недорогих устройств для больниц и для домашних условий). Все эти исследования очень важно продолжить с учётом возможной зависимости этих эффектов от возраста, пола и общего состояния здоровья людей, а также от расположения пункта исследований.

Что касается возрастания числа автомобильных ДТП с тяжёлым исходом во время форбуш-понижений интенсивности КЛ, то причины этого также не совсем ясны. Возможно, что оно обусловлено увеличением времени реакции водителя в эти периоды, приводящее к возрастанию вероятности

автомобильного ДТП. Было бы целесообразно провести соответствующие специальные исследования времени реакции людей в спокойное время и в периоды форбуш-понижений интенсивности КЛ с учётом возможной зависимости от возраста и состояния здоровья. Это позволит выяснить не только механизм этого эффекта, но также определить, для какой категории людей наиболее опасно садиться за руль в периоды форбуш-понижений интенсивности КЛ.

1.2. Использование одночасовых данных наблюдений космических лучей в реальном масштабе времени для предсказания ожидаемых форбуш-понижений

На рис. 3 дана иллюстрация физики сложного явления воздействия огромного количества горячей намагниченной корональной массы, выброшенной со скоростью около 1000 км/с, на галактические КЛ [Belov et al., 1995; Dorman, 2002, 2005a; Dorman et al., 1995a, b, 1997].

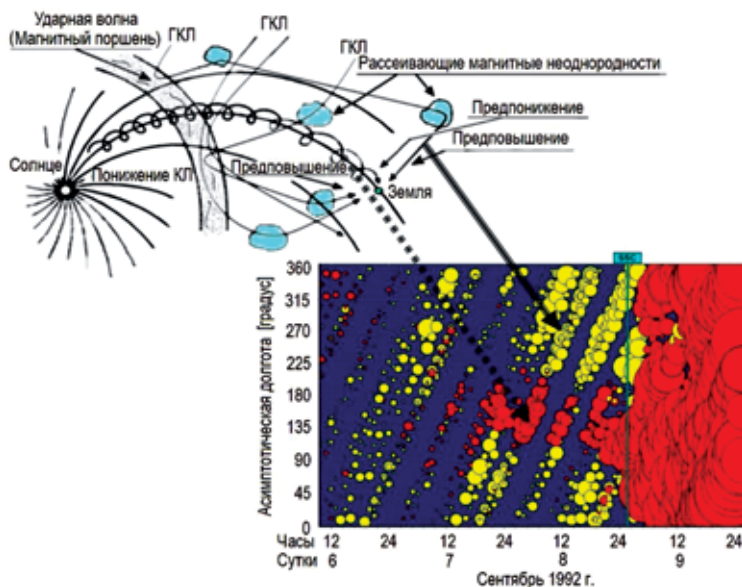


Рис. 3. Иллюстрация физики сложного явления воздействия огромного количества горячей намагниченной корональной массы, выброшенной со скоростью около 1000 км/с, на галактические КЛ (слева наверху) и наблюдения на мировой сети нейтронных мониторов за 2,5 сут до внезапного начала большой магнитной бури (вертикальная линия SSC) в сентябре 1992 г. и почти сутки после начала бури (справа внизу). Желтые кружочки — это возрастания интенсивности галактических КЛ, обусловленные ускорением при отражении от фронта движущейся от Солнца ударной волны (со скоростью около 1000 км/с). Красные кружочки — это понижения интенсивности галактических КЛ, обусловленные: 1) просачиванием частиц КЛ из выброшенной намагниченной корональной массы с расширяющейся оболочкой (внутри которой интенсивность КЛ понижена), что приводит к наблюдаемому эффекту предпонижения интенсивности галактических КЛ; 2) **основное форбуш-понижение**, происходящее после захвата Земли ударной волной и попадания Земли внутрь магнитной оболочки — после внезапного начала магнитной бури

Рисунок 3 показывает, что в рамках мировой службы КЛ с автоматическим обменом данными наблюдений на нейтронных мониторах и мюонных телескопах мировой сети в реальном масштабе времени через Интернет можно будет использовать эффекты предвышшения и предпонижения интенсивности галактических КЛ для предсказания подхода к Земле ударных волн, вызывающих большие магнитные бури.

2. ПРЯМОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА БИОСФЕРУ И ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, А ТАКЖЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ ОПАСНОСТИ ВОЗРАСТАНИЙ ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ОДНОМИНУТНЫМ ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ БОЛЕЕ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. Резкое усиление влияния космической радиации на больших высотах и в космосе на людей и технологии

Выше было отмечено, что на земной поверхности биосфера за многие миллионы лет фактически адаптировалась к потокам галактических КЛ. Другое дело — большие высоты в атмосфере, в магнитосфере или в космосе, где потоки опасной космической радиации из Галактики в десятки и сотни раз выше, чем на земной поверхности. Важно отметить, что созданы специальные службы, следящие за ростом радиационного облучения не только космонавтов, но и членов экипажей самолётов регулярных линий [Beck et al., 2007; Dorman, 2007b]. **Весьма опасными являются также огромные потоки солнечных КЛ в периоды мощных хромосферно-корональных вспышек, которые опасны для людей не только на больших высотах (например, для пассажиров и экипажей на самолётах регулярных линий на высоте около 10 км) и для космонавтов, но и, правда, в довольно редких случаях, для людей на высотах гор и даже на уровне моря. Особенно опасны эти потоки для спутников в магнитосфере Земли. На современном этапе бурной научно-технической революции в нашей цивилизации спутники играют огромную роль как в научных исследованиях, так и в повседневной жизни, для систем коммуникаций, телевидения, Интернета, навигационных систем обслуживания туристов, автомобилей, кораблей, самолётов. С другой стороны, спутники движутся в магнитосфере на различных высотах — от нескольких сотен до многих тысяч километров над уровнем моря — с плоскостями орбиты, имеющими различный наклон к экваториальной плоскости. Спутники подвергаются усиленному во много раз облучению энергичными частицами из радиационных поясов, а также потоками солнечных и галактических космических лучей, что приводит к аномалиям в их работе вплоть до полной потери некоторых из них [Belov et al., 2003, 2004; Dorman et al., 2005a, b; Iucci et al., 2005]. На рис. 4 в качестве примера показан период особенно высокой частоты аномалий в работе спутников. На рис. 5 приведены статистические результаты возрастания вероятности аномалии работы спутников на различных орбитах в зависимости от потока солнечных КЛ с энергией ≥ 10 МэВ. На рис. 6 показан рост вероятности аномалии работы спутников на больших высотах и с большим наклоном к плоскости экватора с ростом потока солнечных КЛ с энергией >10 и >60 МэВ.**

Из приведённых на рис. 4–6 данных видно, что потоки высокоэнергичных протонов от Солнца и большие магнитные бури (приводящие к возмущениям радиационных поясов и высыпанию из них энергичных электронов, так называемых электронов-убийц) являются основными причинами аномалий спутников (особенно находящихся на больших высотах, на орбитах с большим наклоном к экваториальной плоскости). Что касается больших магнитных бурь, то возможность использования одночасовых данных наблюдений интенсивности КЛ с помощью нейтронных мониторов и мюонных телескопов мировой сети станций уже обсуждалось выше, в разд. 1.2 (см. рис. 3).

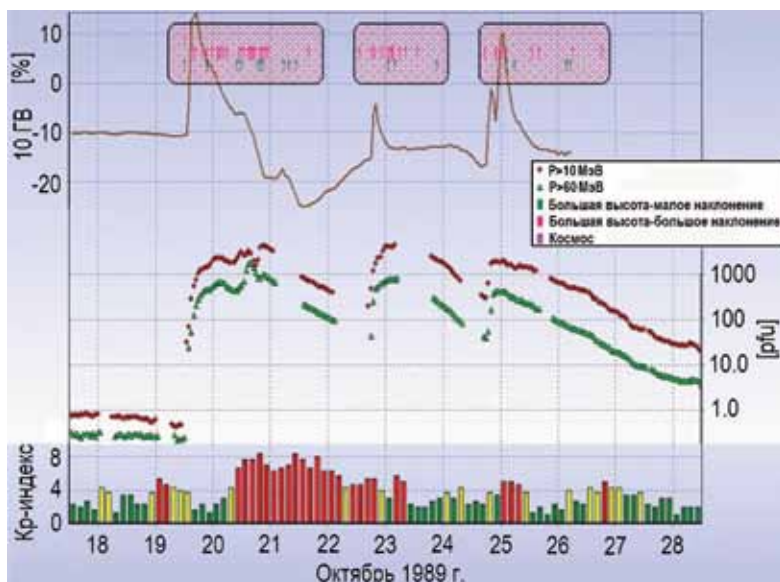


Рис. 4. Аномалии в работе спутников (показаны вертикальными стрелками в верхней части рисунка) во второй половине октября 1989 г.

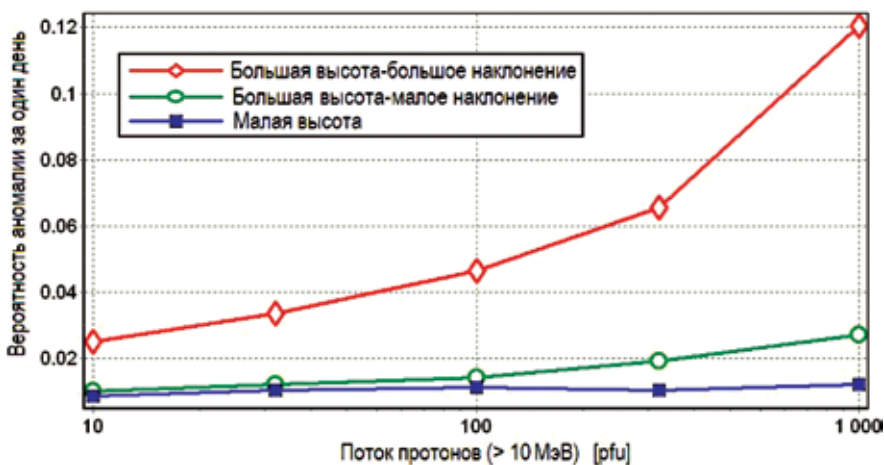


Рис. 5. Средняя вероятность возникновения аномалии в работе спутника на различных орбитах в зависимости от потока солнечных КЛ с энергией >10 МэВ

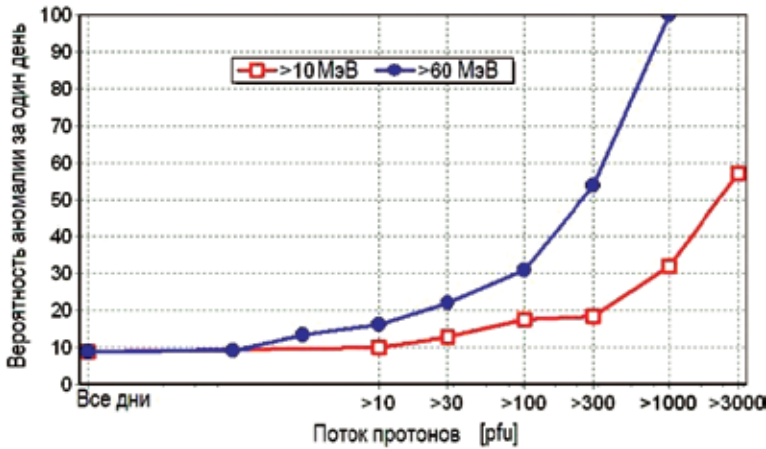


Рис. 6. Средняя вероятность возникновения аномалии в работе спутника в течение одного дня (в %) на высоких орбитах (>1000 км) с большим наклоном в зависимости от потока солнечных КЛ с энергией >10 и >60 МэВ

Как можно использовать одномоментные данные КЛ для оценки ожидаемой радиационной опасности, т.е. как сделать, чтобы КЛ как бы сами себя прогнозировали о своём будущем состоянии? Такой метод был разработан и апробирован на основе реальных наблюдений КЛ (см. [Dorman, 2002; 2006, гл. 2]. Рассмотрим кратко идею и физические основы метода.

2.2. Основные этапы предсказания опасных потоков энергичных солнечных протонов

Соответствующие этапы Программы следующие [Dorman, 2002, 2005b, с, 2006; Dorman et al., 2006a, b].

А. Автоматическое определение начала возрастания потоков энергичных солнечных протонов по одномоментным данным наблюдений на нейтронных мониторах. Например, для двух независимых секций *A* и *B* нейтронного монитора на горе Хермон на севере Израиля это реализуется для любого момента *Z*-й минуты в соответствии с алгоритмом:

$$D_{AIZ} = \frac{\ln(I_{AZ}) - \sum_{k=Z-120}^{k=Z-60} \frac{\ln(I_{Ak})}{60}}{\sigma_1}, \quad D_{BIZ} = \frac{\ln(I_{BZ}) - \sum_{k=Z-120}^{k=Z-60} \frac{\ln(I_{Bk})}{60}}{\sigma_1}, \quad (1)$$

где σ_1 — статистическая ошибка измерения интенсивности космических лучей за одну минуту. Если одновременно

$$D_{AIZ} \geq 2,5 \text{ и } D_{BIZ} \geq 2,5, \quad (2)$$

то это означает начало возрастания потоков энергичных солнечных протонов. В этом случае посылается алерт и включается в работу следующий этап Программы **Б**. Аналогичный анализ проводится для двухминутных и трехминутных данных. Если (2) не выполняется, то продолжается работа этапа **А** для

следующей минуты $Z+1$. На рис. 7 показан сайт израильско-итальянской Обсерватории им. Эмилио Сегрэ на горе Хермон, где в реальном масштабе времени каждую минуту (через 26 с после окончания минуты) сообщается, есть ли возрастание потоков энергичных солнечных протонов в данную минуту или нет. Поскольку для одной минуты вероятность ложного алерта довольно велика, а при малой амплитуде возрастания интенсивности КЛ велика также вероятность пропуска алерта (из-за статистических флуктуаций потока КЛ), то Программа автоматической посылки алерта составлена так, что реально сначала посылается **Предварительный алерт** только после 2-й минуты возрастания. Если в течение нескольких минут возрастание прекращается, то автоматически посылается **Отмена алерта** (как правило, это означает довольно редкое событие **солнечных нейтронов**, которое не представляет собой радиационной опасности). Событие солнечных нейтронов, как правило, сопровождается вспышкой солнечных гамма-лучей, регистрируемых на спутниках, и эта информация может быть использована для определения функции источника генерации энергичных протонов в хромосферно-корональной вспышке (см. детали в монографии [Dorman, 2010]). **Функция источника генерации энергичных протонов**, найденная по данным о солнечных нейтронах и гамма-лучах, может быть сравнена с функцией источника, определяемой решением обратной задачи, описываемой ниже.

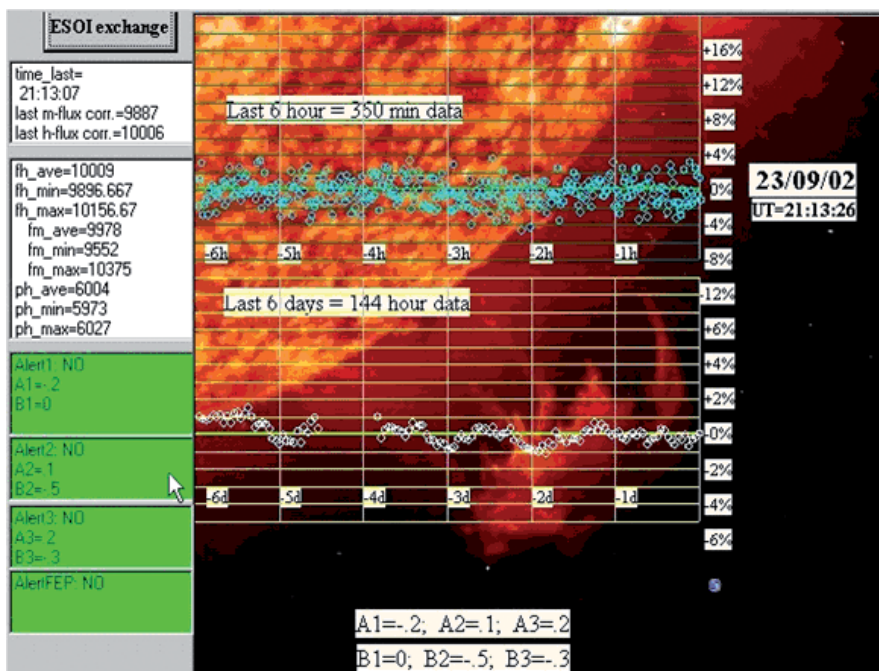


Рис. 7. Скриншот сайта в Интернете для нейтронного монитора на горе Хермон в Израиле. A1, A2, A3, B1, B2 и B3 — наблюдаемые амплитуды вариаций космических лучей высокой энергии по 1-, 2- и 3-минутным данным в единицах соответствующих статистических ошибок данных σ_1 , σ_2 , σ_3 . Видно, что для момента времени 21:13 UT 23 сентября 2002 г. не было возрастания солнечных космических лучей. Это означает, что в ближайшие 30...40 мин не будет опасного возрастания потока солнечных космических лучей с малыми энергиями (≤ 100 МэВ)

Следует отметить, что для удобства пользователей наших данных, они приводятся не только в графическом виде (как это показано на рис. 7), но также в виде цифровых таблиц за последние 6 ч (300 одномоментных данных интенсивности КЛ) и за последние 6 сут (144 одночасовых данных интенсивности КЛ).

Часовые данные на сайте важны для анализа ситуации до и в периоды форбуш-эффектов космических лучей (они используются в реальном масштабе времени вместе с данными наблюдений на других станциях для предсказания опасных больших магнитных бурь, см. выше, разд. 1.2).

Б. Определение изменения жёсткости геомагнитного обрезания и энергетического спектра солнечных космических лучей за пределами атмосферы Земли. После начала возрастания, определённого на этапе А, по данным наблюдений нескольких нейтронных кратностей (как минимум трёх) или данным различных вторичных компонент КЛ (тоже как минимум трёх) с помощью метода функций связи для каждой минуты определяем спектрографическим методом следующие три параметра: изменение жёсткости геомагнитного обрезания $\Delta R_c(t)$ и первичный спектр в двухпараметрической форме

$$\frac{\Delta D(R, t)}{D_0(R)} = b(t)R^{-\gamma(t)}, \quad (3)$$

где $D_0(R)$ есть спектр галактических КЛ перед событием (см. детальное описание метода и используемых при этом функций связи в гл. 3 в монографии [Dorman, 2004]). После определения для каждого момента времени параметров $\Delta R_c(t)$, $b(t)$ и $\gamma(t)$ можем перейти к более сложной задаче — решению обратных проблем.

В. Решение обратной проблемы для магнитосферы. Найденный параметр $\Delta R_c(t)$ и данные по магнитному полю используются для определения изменений во времени параметров экваториального токового кольца: эффективного радиуса (в радиусах Земли) и величины тока в кольце — в миллионах ампер (см. детали в гл. 7 монографии [Dorman, 2009]).

Г. Решение обратной проблемы для спектра генерированных солнечных КЛ и параметров их распространения в межпланетном пространстве. С помощью данных наблюдений космических лучей на Земле не менее чем за четыре минуты (пересчитанных с помощью функций связи к границе атмосферы, т. е. параметров $b(t)$ и $\gamma(t)$, см. этап Б) определяем путём решения обратной задачи: 1) время инжекции T_e , 2) функцию генерации солнечных космических лучей на Солнце $N_o(R)$, а также 3) $K_1(R)$ и β — параметры коэффициента диффузии

$$K(R, r) = K_1(R) \left(\frac{r}{r_1} \right)^\beta \quad (4)$$

в межпланетном пространстве, где $r_1 = 1,5 \cdot 10^{13}$ см — расстояние от Земли до Солнца; $K_1(R)$ — коэффициент диффузии у орбиты Земли (детальное описание решения этой обратной проблемы для различных моделей распространения см. в гл. 2 монографии [Dorman, 2006]).

Д. По определённым на этапе Г времени инъекции и функции генерации солнечных космических лучей на Солнце, а также коэффициенту диффузии в межпланетном пространстве, приступаем к экспериментальной проверке полученного решения и предсказания временного хода интенсивности солнечных КЛ в течение всего события. По определённым на этапе Г параметрам T_e , $N_o(R)$, $K_1(R)$ и β (для каждой четвёрки одноминутных данных наблюдений интенсивности КЛ) мы можем предсказать с помощью функций связи ожидаемый временной ход интенсивности солнечных КЛ для нейтронного монитора и сравнить с наблюдениями. В первом приближении, предсказание осуществляется по решению уравнения диффузии, полученного Е. Паркером (1965) для плотности солнечных КЛ $n(R, r, t)$ с жёсткостью R на расстоянии r от Солнца в момент времени t (отсчитываемого от момента инъекции солнечных КЛ из солнечной короны в межпланетное пространство, т.е. $t = T - T_e$, где T_e было определено на этапе Г; T — мировое время):

$$n(R, r, t) = \frac{N_o(R) r_1^{3\beta/(2-\beta)} (K_1(R)t)^{-3/(2-\beta)}}{(2-\beta)^{(4+\beta)/(2-\beta)} \Gamma(3/(2-\beta))} \exp\left[-\frac{r_1^\beta r^{2-\beta}}{(2-\beta)^2 K_1(R)t}\right], \quad (5)$$

где $N_o(R)$ — спектр испущенных солнечных КЛ (т.е. функция источника, определённая на этапе Г); r_1 — расстояние от Земли до Солнца; $K_1(R)$ и β — параметры коэффициента диффузии в формуле (4) солнечных КЛ в межпланетном пространстве (тоже определены на этапе Г). Пример такого сравнения для события 28 сентября 1989 г. показан на рис. 8. При этом были использованы одноминутные данные наблюдений на нейтронном мониторе вспышки 28 сентября 1989 г. на горе Гран-Сассо в Италии с той же самой аппаратурой, которая впоследствии, с эффективной площадью вдвое большей, стала работать на горе Хермон в Израиле. Важно, что здесь была регистрация не только полной интенсивности нейтронной компоненты (как на всех нейтронных мониторах мировой сети), но и кратностей $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ и ≥ 8 . Кратности имеют отличающиеся функции связи, так что в этапе Б может быть применён спектрографический метод для определения спектра первичных солнечных КЛ за пределами земной атмосферы (детали метода описаны в гл. 3 монографии [Dorman, 2004]).

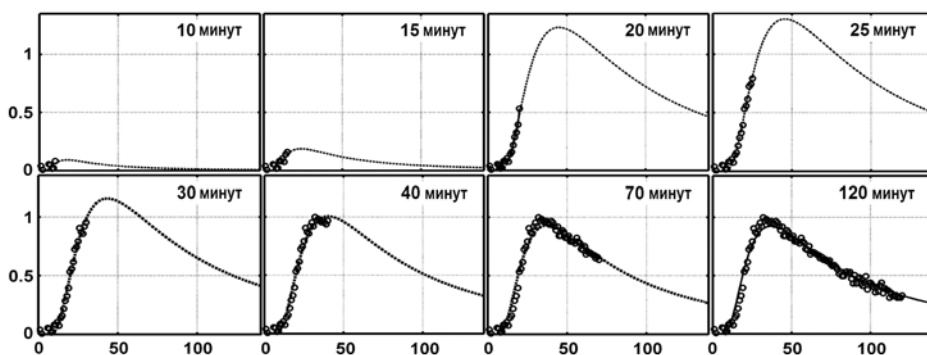


Рис. 8. Предсказание временного хода интенсивности солнечных космических лучей для нейтронного монитора за различное время наблюдений после начала возрастания (сплошные кривые) и сравнение с наблюдениями (кружочки). Случай вспышки 28 сентября 1989 г. и наблюдения на горе Гран-Сассо в Италии

На рис. 8 видно, что 10 и 15 мин наблюдений недостаточно для правильного решения задачи. Это связано не только с тем, что в начале события амплитуда возрастания мала и, соответственно, мала относительная точность наблюдений, но и с тем, что в начале события возрастание интенсивности солнечных КЛ определяется, в основном, анизотропным распространением. Описание решений прямой и обратной задач в этом случае имеется в гл. 2 монографии Л.И. Дормана (2006) и более детально в работе Л.И. Дормана (2008). Однако для практического использования этих решений необходимы одномоментные данные синхронизированных наблюдений на многих нейтронных мониторах мировой сети станций в реальном масштабе времени, т.е. это можно будет практически реализовать только в результате создания мировой службы космических лучей. С другой стороны, на рис. 8 видно, что уже за 20 мин наблюдений предсказание становится близким с наблюдениями, лишь давая несколько завышенную амплитуду. Но уже при использовании данных за 30 мин наблюдений предсказание практически совпадает с наблюдениями. Это обусловлено не только тем, что с повышением амплитуды возрастания солнечных КЛ увеличивается относительная точность данных наблюдений, но и с тем, что с увеличением времени наблюдений приходящие частицы солнечных КЛ успевают испытать несколько рассеяний на магнитных неоднородностях и распространение солнечных КЛ становится практически изотропно-диффузионным, описываемым решением (5). Что особенно важно, полученное решение, основанное на первых 20...30 мин наблюдений, правильно описывает временной ход возрастания солнечных КЛ в течение многих часов.

Е. Предсказание радиационной опасности от солнечных космических лучей по комбинированным наблюдениям на нейтронных мониторах и спутниках. Полученные на этапе Г данные о временном ходе интенсивности солнечных КЛ, а также о параметрах генерации (время инжекции и спектр генерации на Солнце) и распространения в межпланетном пространстве (коэффициент диффузии и его зависимость от расстояния до Солнца, т.е. параметры $K_1(R)$ и β) были определены по данным нейтронных мониторов. Эти детекторы чувствительны к частицам первичных КЛ с энергией больше 1...2 ГэВ. С другой стороны, мы видели в разд. 2.1, что основную радиационную опасность для спутников в магнитосфере Земли и космических аппаратов в межпланетном пространстве оказывают солнечные КЛ существенно меньшей энергии (~10...100 МэВ), поток которых во много раз выше, чем поток высокоэнергичных солнечных КЛ (из-за спектра, круто падающего с ростом энергии). Чтобы получить информацию о солнечных КЛ такой энергии, мы можем воспользоваться одномоментными данными измерений потоков КЛ в области малых энергий на спутниках, доступных в настоящее время в реальном масштабе времени через Интернет. При решении обратной задачи мы, во-первых, используем T_e — время инжекции солнечных КЛ из хромосферно-корональной области вспышки в межпланетное пространство, определённое по данным нейтронных мониторов, также и для частиц малых энергий, измеряемых на спутниках (т.е. считаем, что ускорение и инжекция высокоэнергичных и малоэнергичных частиц происходили практически одновременно, что соответствует современным представлениям, см. монографии [Дорман, 1978; Дорман, Мирошниченко, 1968; Miroshnichenko, 2001]).

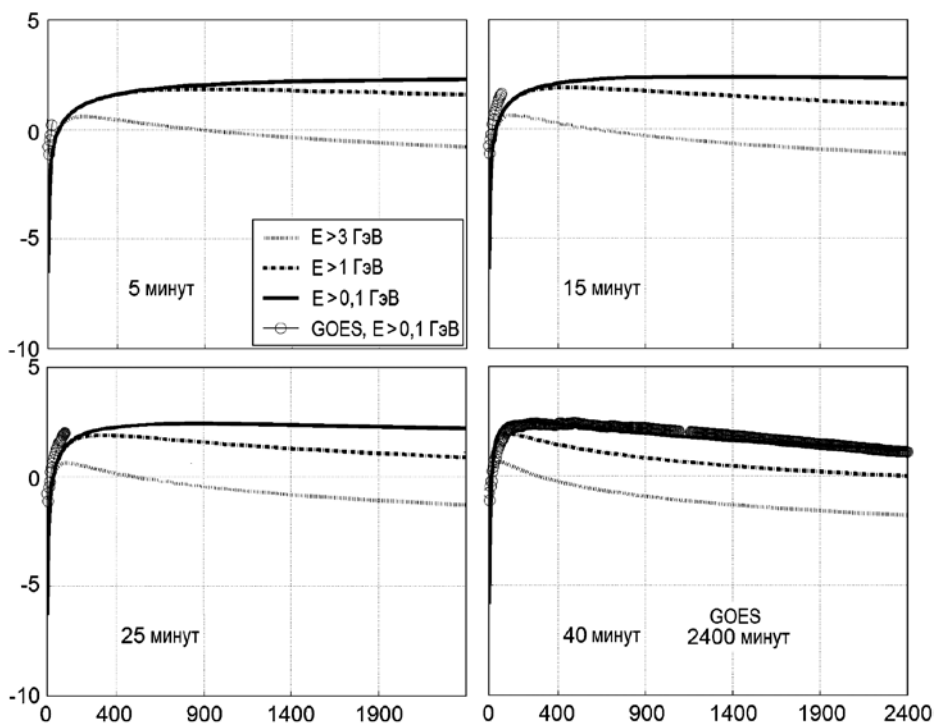


Рис. 9. Результаты решения обратной задачи по данным одномоментных наблюдений на нейтронном мониторе вспышки 28 сентября 1989 г. на горе Гран-Сассо в Италии и на спутнике GOES. Показаны кружочками данные наблюдений на GOES потока частиц солнечных КЛ с энергией $>0,1$ ГэВ. Показаны также три кривые ожидаемого временного хода интенсивности частиц солнечных КЛ с энергией >3 , >1 и $>0,1$ ГэВ, вычисленные по данным наблюдений за первые 5 мин после начала возрастания (верхняя левая панель), за первые 15 мин (верхняя правая панель), за первые 25 мин (нижняя левая панель) и за первые 40 мин (нижняя правая панель). На нижней правой панели показаны также данные наблюдений на GOES за 2400 мин. Видно, что теоретическое предсказание согласно решению (5), основанное на 40 мин наблюдений, полностью совпадает с наблюдениями за 2400 мин

Во-вторых, считаем, что длительность инжекции мала по сравнению с временем распространения, т. е. функция источника может быть представлена в виде δ -функции. На рис. 9 представлены результаты решения обратной задачи по данным одномоментных наблюдений на нейтронном мониторе вспышки 28 сентября 1989 г. на горе Гран-Сассо в Италии и на спутнике GOES.

Ж. Предсказание ожидаемой радиационной дозы от всего солнечного события для космических аппаратов в межпланетном пространстве на различных расстояниях от Солнца, спутников в магнитосфере Земли на различных орбитах, самолётов, а также различных технологий и людей на земной поверхности. После определения параметров генерации и распространения солнечных КЛ можно оценить ожидаемую полную радиационную дозу для различных объектов: космических аппаратов в межпланетном пространстве на различных расстояниях от Солнца, спутников в магнитосфере Земли на различных орбитах,

самолётов на различных высотах и жёсткостях обрезания, а также различных технологий и людей на земной поверхности:

$$I_{rd}^s(X, h, R_c, t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{R_c(t)}^{\infty} D_s(R, t) M_{rd}(R, X, h(t)) dR, \quad (6)$$

где $D_s(R, t)$ — ожидаемое временное изменение спектра солнечных КЛ; $M_{rd}(R, X, h(t))$ — доза радиации в расчёте на одну частицу КЛ под экраном X (в г/см²) на высоте с давлением h (для спутников и космических аппаратов в межпланетном пространстве $h=0$); t_1, t_2 — времена начала и окончания события; $R_c(t)$ — жёсткость геомагнитного обрезания (для космических аппаратов в межпланетном пространстве $R_c(t)=0$). Из рис 9 видно, что уже через 40 мин после начала события, по формуле (6) может быть вычислена ожидаемая доза радиации для всего солнечного события (около двух суток с учётом малоэнергичных частиц) для любого из указанных выше объектов в космосе, в земной магнитосфере и атмосфере, а также на земной поверхности. Если ожидаемая доза радиации оказывается опасной для людей или электроники, то посылается соответствующий алерт для принятия соответствующих мер с целью уменьшения негативных последствий.

Благодарности. Приношу благодарность Ицику Бен Израелю, Ури Даю и Марисе Сторини, поддерживающих работу Израильского Центра космических лучей и космической погоды и израильско-итальянской Обсерватории КЛ им. Эмилио Сегрэ на горе Хермон; Тамаре Бреус за ценную инициативу 20 лет назад, положившую начало многолетнему успешному сотрудничеству, а также моим коллегам Льву Пустильнику и Игорю Цукерману за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

- [Дорман, 1978] Дорман Л. И. Космические лучи солнечного происхождения. М.: ВИНТИ, 1978.
- [Дорман, 2012] Влияние космических лучей и других факторов космической погоды на глобальные изменения земного климата: публичная лекция // Конф. «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле». Москва, 4–8 июня 2012.
- [Дорман, Мирошниченко, 1968] Дорман Л. И., Мирошниченко Л. И. Солнечные космические лучи. М.: Физматгиз, 1968.
- [Паркер, 1965] Паркер Е. Динамические процессы в межпланетном пространстве / Пер. с англ. Л. И. Мирошниченко; Ред. и предисловие Л. И. Дормана. М.: Изд-во иностр. лит., 1965.
- [Птицына и др., 1998] Птицына Н. Г., Виллорези Дж., Дорман Л. И., Ючки Н., Тясто М. И. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // Успехи физ. наук. 1998. Т. 168. № 7. С. 767–791.
- [Beck et al., 2007] Beck P., Latocha M., Dorman L., Pelliccioni M., Rollet S. Measurements and simulations of the radiation exposure to aircraft crew workplaces due to cosmic radiation in the atmosphere // Radiation Protection Dosimetry. 2007. V. 126. N. 1–4. P. 564–567.

- [Belov et al., 1995] *Belov A. V., Dorman L. I., Eroshenko E. A., Iucci N., Villaresi G., Yanke V. G.* Search for predictors of Forbush-decreases // Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf. Rome, 1995. V. 4. P. 888–891.
- [Belov et al., 2003] *Belov A., Dorman L., Eroshenko E., Gromova L., Iucci N., Ivanus D., Parisi M., Ptitsyna N., Tyasto M., Vernova E., Villaresi G., Yanke V.* The relation between malfunctions of satellites at different orbits and cosmic ray variations // Proc. 28th Intern. Cosmic Ray Conf. Tsukuba, Japan, 2003. V. 7. P. 4213–4216.
- [Belov et al., 2004] *Belov A., Dorman L., Iucci N., Kryakunova O., Ptitsyna N.* Chapter 8. The relation of high- and low-orbit satellite anomalies to different geophysical parameters // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure / Ed. I. A. Daglis. Kluwer Acad. Publ., 2004. P. 147–163.
- [Dorman, 2002] *Dorman L. I.* Solar Energetic Particle Events and Geomagnetic Storms Influence on People's Health and Technology; Principles of Monitoring and Forecasting of Space Dangerous Phenomena by Using On-Line Cosmic Ray Data // Proc. 22nd ISTC Japan Workshop on Space Weather Forecast in Russia/CIS / Ed. Y. Muraki. Nagoya University, June 5–6, 2002. 2002. V. 2. P. 133–151.
- [Dorman, 2004] *Dorman L. I.* Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground. Dordrecht; Boston; L.: Kluwer Acad. Publ., 2004.
- [Dorman, 2005a] *Dorman L. I.* Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by using of online cosmic ray data // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. N. 9. P. 2997–3002.
- [Dorman, 2005b] *Dorman L. I.* Monitoring and forecasting of great radiation hazards for spacecrafts and aircrafts by online cosmic ray data // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. N. 9. P. 3019–3026.
- [Dorman, 2005c] *Dorman L. I.* Combined ground-based and satellite cosmic ray measurements for forecasting of great radiation hazards // Proc. 17th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research. Sandefjord, Norway, 30 May – 2 June 2005. (ESA SP-590. 2005. P. 219–224.
- [Dorman, 2006] *Dorman L.* Cosmic Ray Interactions, Propagation, and Acceleration in Space Plasmas. Springer, Dordrecht. 2006.
- [Dorman, 2007a] *Dorman L. I.* Monitoring and forecasting of radiation hazard from great solar energetic particle events by using on-line one-min neutron monitor and satellite data // Radiation Protection Dosimetry. 2007. V. 126. N. 1–4. P. 572–576.
- [Dorman, 2007b] *Dorman L. I.* Long-term galactic cosmic ray variations and their forecasting for determining expected radiation doses for aircrafts and balloon's experiments // Proc. 18th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research. Visby, Sweden, 3–7 June 2007. (ESA SP-647). 2007. P. 443–448.
- [Dorman, 2008] *Dorman L. I.* Forecasting of radiation hazard and the inverse problem for SEP propagation and generation in the frame of anisotropic diffusion and in kinetic approach // Proc. 30th Intern. Cosmic Ray Conf. Merida, Mexico. 2008. V. 1. P. 175–178.
- [Dorman, 2009] *Dorman L.* Cosmic Rays in the Magnetospheres of the Earth and other Planets. Springer, Heidelberg. 2009.
- [Dorman, 2010] *Dorman L.* Solar Neutrons and Related Phenomena. Springer, Heidelberg. 2010.
- [Dorman et al., 1995a] *Dorman L. I., Villaresi G., Belov A. V., Eroshenko E. A., Iucci N., Yanke V. G., Yudakhin K. F., Bavassano B., Ptitsyna N. G., Tyasto M. I.* Cosmic ray forecasting features for big Forbush-decreases // Nuclear Physics B. 1995. V. 49A. P. 136–144.
- [Dorman et al., 1995b] *Dorman L. I., Iucci N., Villaresi G.* The nature of cosmic ray Forbush-decrease and precursory effects // Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf. Rome. 1995. V. 4. P. 892–895.

- [Dorman et al., 1997] *Dorman L. I., Iucci N., Villaresi G.* Auto-model solution for nonstationary problem described the cosmic ray preincrease effect and Forbush-decrease // Proc. 25th Intern. Cosmic Ray Conf. Durban, South Africa. 1997. V. 1. P. 413–416.
- [Dorman et al., 1999] *Dorman L. I., Iucci N., Ptitsyna N. G., Villaresi G.* Cosmic ray Forbush-decreases as indicators of space dangerous phenomenon and possible use of cosmic ray data for their prediction // Proc. 26th Intern. Cosmic Ray Conf. Salt Lake City. 1999. V. 6. P. 476–479.
- [Dorman et al., 2005a] *Dorman L. I., Iucci N., Belov A. V., Levitin A. E., Eroshenko E. A., Ptitsyna N. G., Villaresi G., Chizhenkov G. V., Gromova L. I., Parisi M., Tyasto M. I., Yanke V. G.* Space weather and spacecrafts anomalies // *Annales Geophysicae*. 2005. V. 23. N. 9. P. 3009–3018.
- [Dorman et al., 2005b] *Dorman L. I., Belov A. V., Eroshenko E. A., Gromova L. I., Iucci N., Levitin A. E., Parisi M., Ptitsyna N. G., Pustil'nik L. A., Tyasto M. I., Vernova E. S., Villaresi G., Yanke V. G., Zukerman I. G.* Different space weather effects in anomalies of the high and low orbital satellites // *Advances in Space Research*. 2005. V. 36. P. 2530–2536.
- [Dorman et al., 2006a] *Dorman L. I., Pustil'nik L. A., Sternlieb A., Zukerman I. G.* Forecasting of radiation hazard: 1. Alerts on great FEP events beginning; probabilities of false and missed alerts; on-line determination of solar energetic particle spectrum by using spectrographic method // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. P. 1124–1133.
- [Dorman et al., 2006b] *Dorman L. I., Iucci N., Murat M., Parisi M., Pustil'nik L. A., Sternlieb A., Villaresi G., Zukerman I. G.* Forecasting of radiation hazard: 2. On-line determination of diffusion coefficient in the interplanetary space, time of ejection and energy spectrum at the source; on-line using of neutron monitor and satellite data // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. P. 1134–1140.
- [Iucci et al., 2005] *Iucci N., Levitin A. E., Belov A. V., Eroshenko E. A., Ptitsyna N. G., Villaresi G., Chizhenkov G. V., Dorman L. I., Gromova L. I., Parisi M., Tyasto M. I., Yanke V. G.* Space Weather Conditions and Spacecraft Anomalies in Different Orbits // *Space Weather*. 2005. V. 3. N. 1. S01001. doi: 10.1029/2003SW000056.
- [Miroshnichenko, 2001] *Miroshnichenko L. I.* *Solar Cosmic Rays*. Dordrecht; Boston; L.: Kluwer Acad. Publ., 2001.
- [Villaresi et al., 1994] *Villaresi G., Breus T. K., Dorman L. I., Iucci N., Rapoport S. I.* The influence of geophysical and social effects on the incidences of clinically important pathologies (Moscow 1979–1981) // *Physica Medica*. 1994. V. 10. N. 3. P. 79–91.
- [Villaresi et al., 1995] *Villaresi G., Dorman L. I., Ptitsyna N. G., Iucci N., Tyasto M. I.* Forbush-decreases as indicators of health-hazardous geomagnetic storms // Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf. Rome, 1995. V. 4. P. 1106–1109.

COSMIC RAYS AS A FACTOR AND AS A TOOL FOR FORECASTING OF SPACE WEATHER EFFECTS ON THE BIOSPHERE

L. I. Dorman^{1,2}

¹ N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia, e-mail: lid010529@gmail.com

² Centre for cosmic rays and space weather, Tel Aviv University and Israel Space Agency

The work consists of three parts. **The first part** is Introduction to the problem. **The second part** presents the results of a series of analyses of long series of daily rates of myocardial infarction, stroke, and car accidents with severe outcome in quiet times and during periods of strong

Forbush decreases in cosmic ray intensity. A considerable increase in the daily number of heart attacks, strokes and car accidents during strong magnetic storms accompanied by strong Forbush decreases in cosmic ray intensity. It is shown that in this case, cosmic rays are virtually no impact on human health, but are an indicator of the impact of space weather (coronal mass ejections of plasma and interplanetary shock waves) on human health. It is also shown as continuous monitoring of cosmic rays can be used to predict space weather situations that are dangerous to human health and thus dramatically reduce the risk of heart attacks, strokes and automobile accidents with severe consequences. In **the third part** we consider the direct effect of cosmic rays on the biosphere (the so-called radiation effects). The fact that a great thickness of the atmosphere (about 1,000 grams per cm^2), the flux of cosmic rays is reduced by almost a hundred times. However, the flow of relativistic electrons and muons at the earth's surface is about one million per square meter per hour, each centimetre of space on the particle path in the human body creates about 50 000 ions, and the destruction of molecules. In addition, as a result of cascade processes occur neutron flux, freely penetrating deep into the biosphere objects and produce a variety of nuclear reactions. Over millions of years the biosphere has adapted to these little streams of cosmic rays (in fact, cosmic rays have played a decisive role in the significant acceleration of the evolution of the biosphere and the fairly rapid appearance of a person). However, when the fluxes of cosmic rays increases by several times (like during a powerful solar flares, or when flying in modern aircraft at an altitude of approximately 10 km), or even dozens of times (like when you fly on satellites in the magnetosphere of the Earth or the spacecraft in interplanetary space), the radiation risk becomes significant. We describe our method of predicting the expected radiation hazards from powerful solar flares in the atmosphere, depending on altitude and geomagnetic cutoff rigidity, as well as satellites and space vehicles on one-minute observations of cosmic rays at neutron monitors and satellites.

COSMIC RAYS AND EVOLUTION OF THE BIOSPHERE: SEARCH FOR NEW APPROACHES

L. I. Miroshnichenko^{1,2}

¹ N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia, e-mail: leonty@izmiran.ru

² D.V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics (SINP), M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The cosmic environment of Earth directly or indirectly influences conditions for terrestrial life. Cosmic influences include increased fluxes of gas, dust, comets and asteroids, as well as cosmic rays (energetic particles of galactic and solar origin), interplanetary plasma (solar wind) and electromagnetic emission of various energies. The main emphasis of this paper is on the radiation conditions and their variations, especially in the remote past (at geological scale of time). The Sun, the most important pre-condition for terrestrial life, is also discussed as a potential source of dangerous emissions. We briefly review and update recent observational data and research works concerning the frontier between Astrobiology and Space Weather. Our attention is mainly paid to cosmic rays of galactic and solar origin (GCR and SCR, respectively). Regular GCR variations in the deep past of the Solar system, as well as the occurrence rates of sporadic events, namely, the Supernova bursts and giant solar flares, are considered in detail. In this field, there are still many astrophysical and biological problems to be investigated from the modern positions, taking into account new models of galactic evolution and experimental evidences of important contribution of cosmic rays into the evolution of the biosphere. The present robust programs of space research reinforce our hope for a better understanding of the bases of Astrobiology. In particular, a contribution of the nearest dwarf stars into cosmic rays flux at the Earth's orbit seems to be revised in the light of latest observational data. Eventually, with a more realistic model of the Sun, more reliable discussions of all the factors influencing the origin of life on Earth will be also possible.

INTRODUCTION: OUTLINES OF THE PROBLEM

The Earth's biosphere was born and has developed with **permanent ecological factor**, namely, with an ever present background of **ionizing radiations**. The latter are, first of all, natural radioactivity and cosmic rays of galactic and solar origin (GCR and SCR). Above the Earth's land surface at middle latitudes the radiation background for 2/3 of magnitude is provided by radioactive substances and for 1/3 — it is due to cosmic rays (CR). Above the ocean surface the radiation background is near completely formed by cosmic rays. In the light of these facts, an understanding of possible biological effects of CR has come rather soon after their discovery in 1912. As shown, for example, by Eugster (1940) and Hess and Eugster (1949), there is no doubt that cosmic radiation can produce biological effects (see also Krebs, 1950). It is not the primary radiation and the ionization alone that concern us but we permanently encounter secondary effects connected with nuclear evaporation processes and nuclear break-up events in the atmosphere, which, in turn, influence biological material. As a result of those processes, we have a permanent background of energetic secondary particles through all the thickness of terrestrial atmosphere (Figure 1).

On this reason, it may be stated that even now the biosphere still continues its evolution under **changing radiation conditions**, at least, due to variations of background CR intensity (e.g., [Miroshnichenko, 1980, 1984, 1992]). As to natural radioactivity, it may be noted that all highest animals have been formed, in practice,

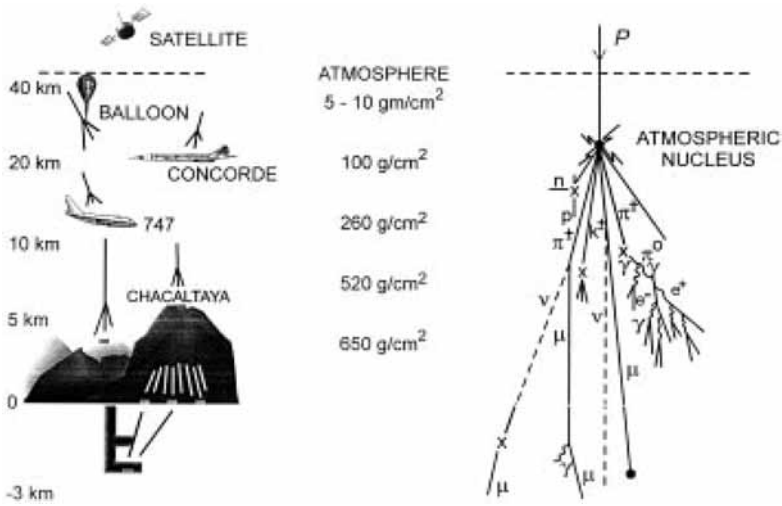


Figure 1. Primary cosmic rays in space (left part) and the secondary CR radiation propagating through the atmosphere with the “hard” component (muons) that is detectable even underground. The right part is a conceptual illustration of the nuclear interactions that occur in the atmosphere. The center of this figure lists the substantial air mass that provides a shield against the radiation in space [Shea, Smart, 2000]

at present level of radiation background, meanwhile at the moment of life origin this background seems to be about 6 times of modern level, even provided the CR intensity was constant since that time (e.g., [Stepanov, 1980]).

Primary CR flux of galactic origin consists mainly of protons and helium nuclei. In particle numbers, GCR flux contains ~90 % of protons, about 7 % of helium nuclei, ~1 % are the nuclei of more heavy elements, and about 1 % falls on electrons. Galactic cosmic rays have rather low intensity, and their flux at the Earth’s orbit is mostly isotropic. As to GCR energy spectrum, it covers very wide range — from $\sim 10^7$ to $10^{19} \dots 10^{20}$ eV, and they are bombarding the terrestrial atmosphere permanently, with some intensity variations in time and space (see Figure 1). There seem to exist also cosmic rays of ultra-high energies (up to 10^{21} eV), supposedly of extra-galactic origin. At the energies of $\geq 10^{14}$ eV primary cosmic rays produce so-called extensive air showers (EAS) of secondary particles (see right side of Figure 1). Secondary particle fluxes include, in particular, neutrons that are registered regularly by surface worldwide net of neutron monitors, as well as muons that are detectable even deeply underground (see left side of Figure 1). At the boundary of terrestrial atmosphere a density of energy flux of background GCR is estimated to be of ≥ 0.01 erg/s·cm² (with an accuracy of the factor ≥ 2).

In fact, CR fluxes coming to the Earth from the vicinities of the Solar system are undergone to considerable spatial and temporal changes. The causes of such changes may be the Supernova bursts, especially in the periods of the Sun’s passages through galactic arms. Interesting information about CR intensity in such periods, at the time scales of order of 1 million (Myr) — 1 billion years (Gyr), is provided by meteorite studies (e.g., [Lavrukhina, 1969; Lavrukhina, Ustinova, 1990; Shaviv, 2002; Voshage, Feldmann, 1979]). In turn, the SCR fluxes nearby the Earth depend on the occurrence rate and power of giant solar flares (e.g., [Goswami, Marhas, 2005; Lal, Ligenfelter, 1991]). Cosmic ray fluxes of solar origin (SCR) cover energy range from

$\sim 10^6$ to $\sim 10^{10}$... 10^{11} eV, but their intensity often exceed that of GCR for several orders of magnitude [Miroshnichenko, 2001]. Combined impacts of GCR and SCR on the near-terrestrial space, finally, are strongly determined by the level of solar activity (SA) at present. Moreover, those effects might considerably depend on the SA level in the remote past of the Earth, during the epoch of the so-called “young Sun” (see, e.g., [Messerotti, Chela-Flores, 2007; Obridko et al., 2012] and references therein).

Today, due to the advent of a significant fleet of space missions and the possibility of performing experiments at the International Space Station (*ISS*), a meaningful study begins to be possible concerning factors that led to an early onset of life on the Earth. As it is widely thought, solar climate during the first Gyr of the Earth was radically different (e.g., [Ribas et al., 2005]). One of the earliest relevant factors seems to be excessive solar-flare energetic particle emission, a phenomenon that has been recorded in meteorites (e.g., [Goswami, 1991]). These extraterrestrial samples provide information on events that seemed to take place during this early period after the collapse of the solar nebula disk. Gas-rich meteorites have yielded evidence for a more active Sun. A considerable number of young stars with remnants of accretion disks show energetic winds that emerge from the stars themselves. Similar ejections (solar wind) are still currently observed from our Sun. For this reason we believe that some of the early Solar system material must keep the record of such emissions.

On the other hand, by present time it was found that GCR and SCR have played an important role in different processes in the Earth’s atmosphere. The latter are: ionization and excitation of the atmospheric atoms, depletion of the ozone layer, generation of cosmogenic isotopes (e.g., ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al), production of the nitrogen oxides (nitrates), operation of the global electric circuit, formation of cloudiness and precipitation falls (e.g., [Miroshnichenko, 2008]), as well as formation of electric charge in the clouds and generation of lightning discharges (e.g., [Ermakov, Stozhkov, 2003; Gurevich, 2009; Stozhkov, 2003]). In geological past of the Earth the **CR effects on the atmosphere** might be also closely tied with the variations of geomagnetic field, especially at geomagnetic reversals (see, e.g., [Black, 1967]). Hence it follows a possible relation between CR, solar activity, geomagnetic field (as main elements of Space Weather) and terrestrial climate that, in turn, determines **indirect impact** of CR on the biosphere. Mechanism of GCR impact on the tropospheric processes may be of trigger nature, similar to the scheme of “two-cascade amplifier” [Krymsky, 2002]. If we take the GCR energy flux to be $\geq 10^{-3}$ erg/s·cm², and that for typical tropospheric disturbance — about 10^{-3} W/cm² = 10^4 erg/s·cm², then a coefficient of amplification should be as large as $> 10^7$ in a time scale < 1 day [Tinsley and Deen, 1991].

1. PREREQUISITES FOR COSMIC RAY BIOEFFECTIVITY

Is the role of cosmic rays in the biosphere clear completely? It is obvious that to give a final response to this question is still too early. Meanwhile, as well-known, for several decades a hypothesis is discussed on possible **direct impact** of CR on the biospheric processes, in particular, on the occurrence rate of genetic mutations for some organisms. This effect may be due to arrival of intense flux of CR from the Supernova (SN) bursts that happened near the Solar system. For the first time, this fundamental and very bold hypothesis was reported by outstanding Soviet astrophysicist I. S. Shklovsky in 1957 (see [Krassovsky, Shklovsky, 1957, 1958; Shklovsky,

1962, 1985, 1987]). Note, however, that after-effects of such radiation exposure may be different for different species of the biosphere. For example, if enhanced radiation in the dinosaur's epoch (~65.5 Myr ago) might be a cause of their extinction, for some other animals and plants considerable increase of CR intensity could serve as a factor that favoured to their further evolution. Of special interest is so-called "Cambrian explosion of life" in the biosphere (~540 Myr ago) when, according to some meteoritic data, **CR intensity was about 1/3 of modern level**.

In fact, the first experimental evidence of important biological role of cosmic rays was obtained in the course of fulfillment of the Apollo program (for details see [Miroshnichenko, 2003]). The picture of observed radiation impact is shown in Figure 2 [Comstock et al., 1971] for two cases: (A) a track from a particle entering the astronaut's helmet; (B) **an ending track, from a particle that has crossed from the opposite side of the helmet and come to rest**. The **tracks** are 500 and 700 μm in length, respectively. The crewmembers on the last seven Apollo flights (from Apollo 11 through Apollo 17) observed also mysterious **light flashes** (e.g., [Pinsky et al., 1974]). The flashes are tentatively attributed to cosmic ray nuclei (with the atomic numbers $Z > 6$) penetrating the head and eyes of the observers and interacting in the retina, vitreous body (humour) and possibly the optic nerve. Later on, the light flash (LF) phenomena have been observed in detail by many cosmonauts (astronauts) on board the Space Stations Apollo – Soyuz and Mir (e.g., [Avdeev, 2001]).

In some recent experiments, there were noted effects of **secondary neutrons** from CR on the cell structures. In particular, [Belisheva, Gak, 2002] noted that some types of cell colonies displayed sensitivity to the intensity of secondary neutrons at the Earth's surface during a series of solar proton events in October 1989. The experiments have been carried out by well-known cell culture method at the polygon of the Institute of Physics, Leningrad State University, at Island Sredny, White Sea, 66.3° N, 33.7° E, in the period from 15 through 31 October 1989. As the objects for investigation the authors used three typical cell lines growing *in vitro*: L, CHO, and FHM.

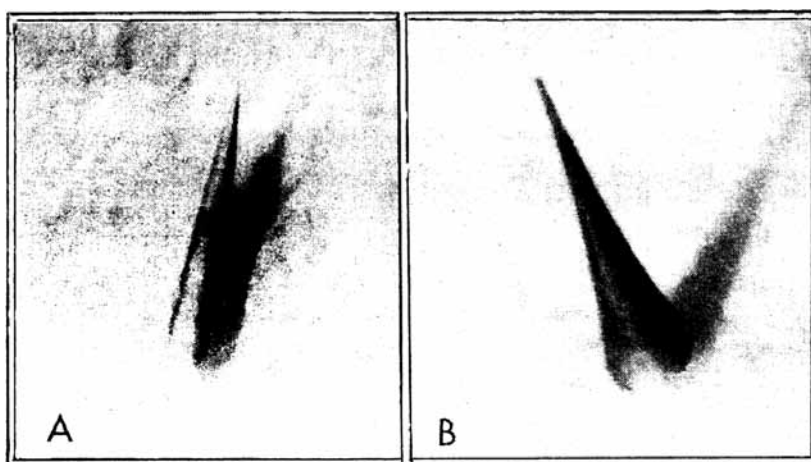


Figure 2. Tracks from heavy nuclei on the inside of an Apollo helmet [Comstock et al., 1971]: A — a track from a particle entering the helmet; B — an ending track from a particle that crossed from the opposite side of the helmet and come to rest

Cell monolayer in quiet period is revealed itself by rather homogeneous structures in all three lines indicated. In the period of increasing of neutron counts the monolayer morphology becomes extremely inhomogeneous: a process of mass **cell merging** takes place (Figure 3).

Dynamics of this process in all three cell lines is presented in Figure 3 in terms of poly-nuclei cell index PCN. Main conclusion of this study is following: at certain conditions, geo-cosmic impact due to invasion of high-energy SCR seems to change radically some properties of biological objects by initiation of re-organization of genetic material that may be important for the mechanisms of evolution.

Bioeffectivity of background variations of the flux of **secondary neutrons** has been also demonstrated by [Belisheva et al., 2006] in the measurements of functional state of human blood in Pushchino in the periods of 11–25 October 1996. Interesting positive correlation between CR intensity and **metachromasy reaction** for volutin granule in cells of *Saccharomyces cerevisiae* has been found by [Gromozova et al., 2010]. The authors studied a variability of reaction of metachromasy of polyphosphates of volutin granules in yeast cells, in connection to some cosmic factors. The results are given in Figure 4. Due to the ancient origin of these biomolecules, their presence in biological objects of different organization levels and multifunctional role in cellular processes, such kind of investigation is of great interest. To explain the results obtained, the authors applied to the hypothesis about the sol-gel phase transitions in a state of the system (see, e.g., [Tanaka et al., 1997]).

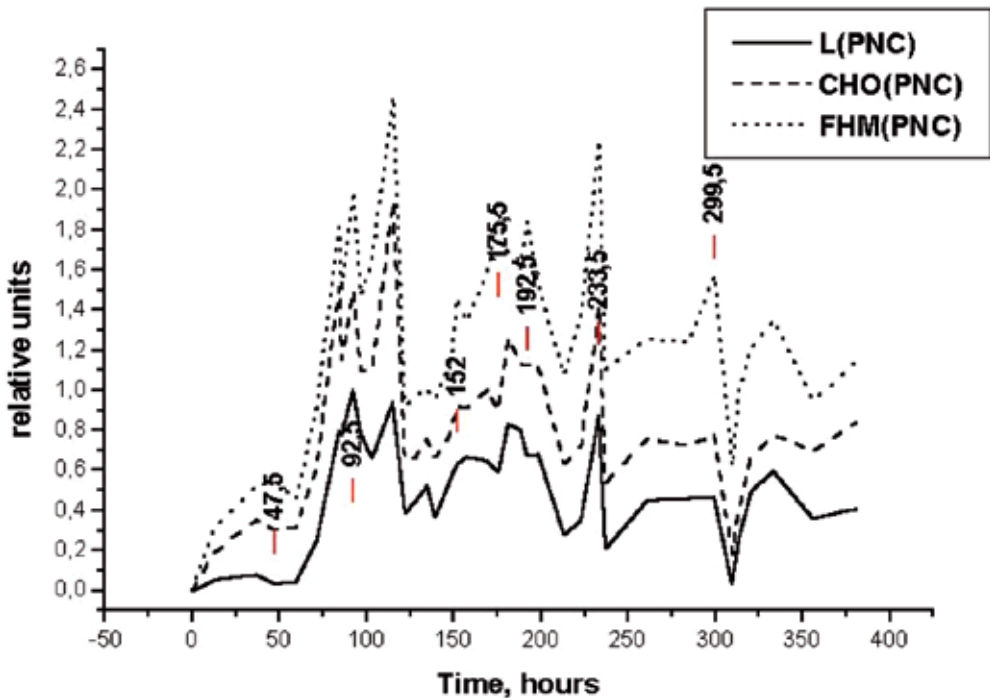


Figure 3. Dynamics of the polynucleotide index PCN (relative units by ordinate axis) for cell crops in lines L, CHO, and FHM in October 1989. At the abscissa axis a time is given (in hours) from the beginning of the experiment (22:30 UT of 15 October). Figures at the curves are the moments of fixation (in hours) of laboratory preparations corresponding to increasing of PCN index

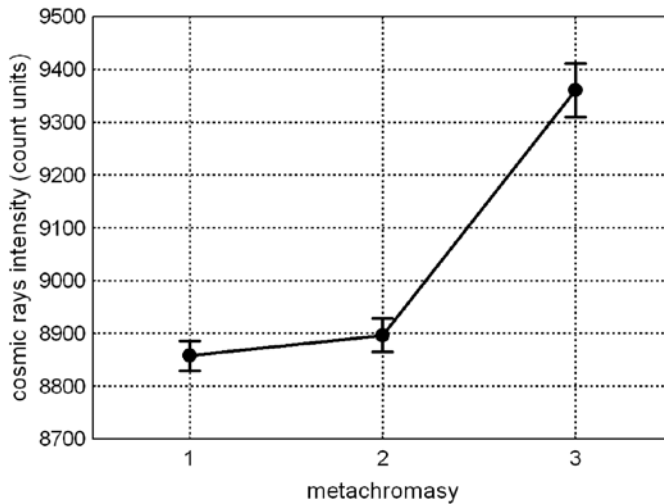


Figure 4. Results of the one-way ANOVA of statistical dependence of the metachromasy index for volutin granules in yeast cells, on the intensity of cosmic rays (neutron monitor data, arbitrary units). On the abscissa axis is an index of metachromasy. On the ordinate axis are the mean values of cosmic ray intensity (in counts). The 95 % confidence intervals are marked [Gromozova et al., 2010]

The phase transition in the solution-gel system is a manifestation of competition among several forces which contribute to the osmotic pressure in the gel. The balance of these forces varies with change in temperature or solvent properties. The total osmotic pressure acting on the system is the sum osmotic pressure of the gel. Note that the phase transition can be induced by the application of an electrical field across the gel. The volume change at the transition point is either discrete (as in a first-order Ehrenfest transition) or continuous (second order Ehrenfest analogy), depending on the degree of ionization of the gel and on the solvent composition. In the context of possible contribution of CR particles, it is of great interest that the processes of sol-gel phase transitions depend on the degree of ionization of the gel.

It is important that GCR of extreme energies ($\geq 10^{15}$ eV) with a high probability may initiate the lightning discharges in the atmosphere (e.g., Erlykin and Wolfendale, 2010), and this factor, in turn, could stimulate the formation from simple organic compound of **complicated molecular complexes** — “building blocks” of the life at the Earth [Krassovsky, Shklovsky, 1957, 1958].

2. BIOTIC EXTINCTIONS AND SUPERNOVA BURSTS, PLATE TECTONICS, CLIMATE AND/OR...?

Since life began on Earth, several major mass extinctions have significantly exceeded the background extinction rate. The most recent, the Cretaceous–Paleogene extinction event, which happened approximately 65.5 Myr ago, was a large-scale mass extinction of animal and plant species in a geologically short period of time. In the past 540 Myr there have been five major events when over 50 % of animal species died. Mass extinctions seem to be a Phanerozoic phenomenon, with extinction rates low before large complex organisms arose.

In general, one of the indices of success or setback for life is biodiversity. The evolution of living creatures can be gauged by the rate of origination of new forms (classified, for example, as orders, families, genera or species) and the rate of extinction of old forms. The difference at any stage results in an increase or decrease of global biodiversity. As known, by counting known fossils, palaeontologists have found large variations in marine biodiversity over the past 500 Myr. One of the many intrinsic and environmental factors suspected of influencing biodiversity is sea level. Conventionally, in plate tectonics, the accretion of mid-ocean ridges during sea-floor spreading pushes up higher sea level. The reasons for the variations in biodiversity are also matters of dispute. Mechanisms on offer include biological processes such as spontaneous diversification with limits to species richness, and physical influences such as continental drift (plate tectonics), extraordinary volcanic eruptions, and impacts of comets or asteroids causing mass extinctions. The role of sea level variations was recently confirmed by [Svensmark, 2012], see also: ftp://ftp2.space.dtu.dk/pub/Svensmark/MNRAS_Svensmark2012.pdf.

Luckiest among our ancestors seems to be a mammal-like reptile, or therapsid, that scraped through the Permo-Triassic Event, the worst catastrophe in the history of animal life. The climax was 251 million years ago at the end of the Permian Period. Nearly all animal species in the sea went extinct, along with most on land ones. The event ended the era of “old life”, the Palaeozoic, and ushered in the Mesozoic Era, when our ancestors would become small mammals trying to keep clear of the dinosaurs. So, “what put to death our previously flourishing Gorgon-faced cousins” of the Late Permian? According to [Svensmark, 2012], the Galaxy let the reptiles down. To substantiate the hypothesis, [Svensmark, 2012] estimated occurrence rate of the Supernova bursts during last ~500 Myr BP (Figure 5) and compared the results with the biodiversity of marine animal genera through that period.

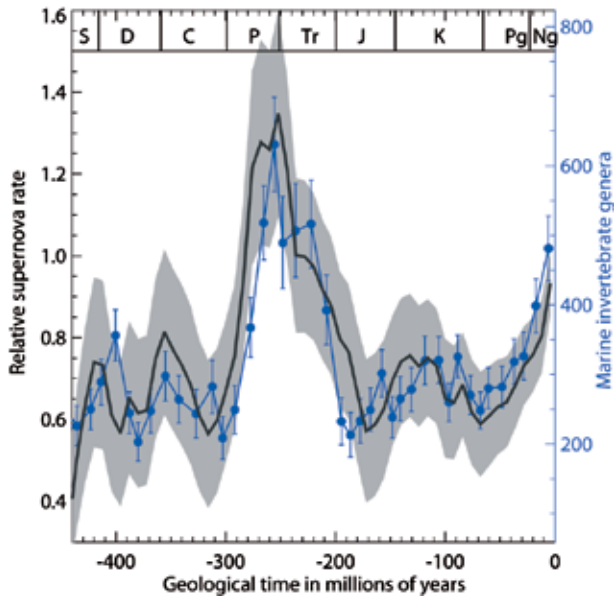


Figure 5. Relative occurrence rate of Supernova bursts (solid curve) in comparison with a number of marine animal genera becoming extinct during any given time interval [Svensmark, 2012]

Solid black curve in Figure 5 shows calculated relative occurrence rate of SN bursts during the time intervals when the Sun (Solar system in the whole) crossed the observed specific star-dust arms of our Galaxy. Another curve (with the points) illustrates a number of marine animal genera in the fossils, provided the influence of variations of the ocean level on the mortality of living organisms being taken into account. There is present a distinct peak of one of the five mass extinctions of terrestrial animals at the boundary of Permian and Triassic (P-Tr) periods. Obvious striking coincidence of two curves sets thinking rather strongly. The connection with SN occurrence rates revealed in Figure 5 adds to the mix of hypotheses, by providing strong evidence that Galactic cosmic rays (GCR) have influenced the course of evolution.

For a comparison, in Figure 6 we give a complete picture of extinction events in geological scale of time. The “Big Five” extinctions cannot be so clearly defined, but rather appear to represent the largest (or some of the largest) of a relatively smooth continuum of extinction events: Ordovician–Silurian (O-S), Late Devonian (Late D), Permian–Triassic (P-Tr), Triassic–Jurassic (Tr-J), and Cretaceous–Paleogene (K-Pg) extinction events. The peak (P-Tr) under consideration here seems to be the biggest one.

Of course, the results by [Svensmark, 2012] may be called in question. In particular, an accuracy of his calculations of the occurrence rate of SN bursts is quite striking. In addition, when comparing the plots in Figures 5 and 6, we discover in Figure 5 the absence of extinction peak at the boundary of Triassic–Jurassic (Tr-J) periods, about 200 Myr ago. Apparently, the author’s correction for the ocean level changes rather significantly the original set of data and should be undergo to additional verification. On the other hand, there are independent climatic data [Veizer et al., 1999] that points to the variations of the concentration of the oxygen isotope ^{18}O (as one of the best climatic index) at large time scale (Figure 7). All maximums obtained by [Veizer et al., 1999] coincide with the Svensmark’s curve.

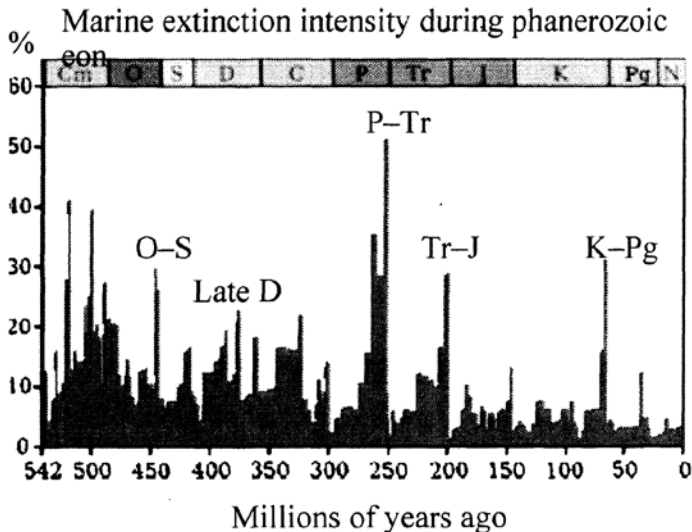


Figure 6. Marine extinction intensity through time [Sepkoski, 2002]. The graph shows the apparent percentage (not the absolute number) of marine animal genera becoming extinct during any given time interval. It does not represent all marine species, just those that are readily fossilized

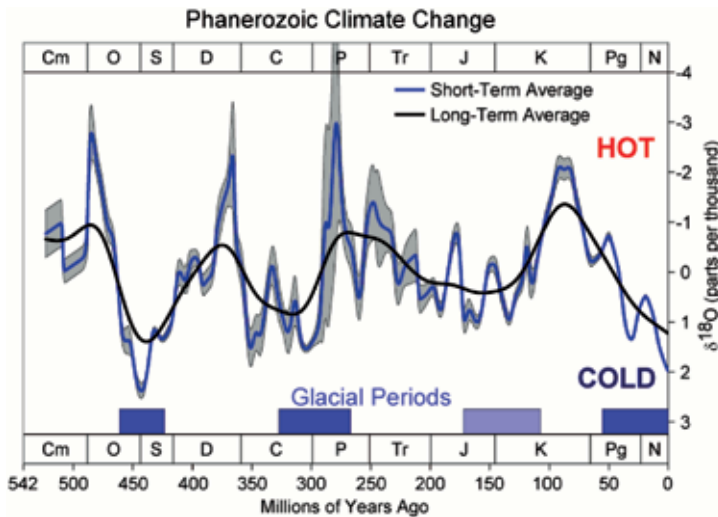


Figure 7. Variations of the concentration of the oxygen isotope ^{18}O and terrestrial climate in the Phanerozoic eon [Veizer et al., 1999]

3. PROBABILITY OF GIANT SOLAR FLARES AND BIOTIC EXTINCTIONS

How large a proton event can the Sun produce? How frequently the largest events occur? As shown below, both of these questions are not trivial. The extreme features of the Sun's proton productivity are very important not only for fundamental research, but also for the planning and protection of future space missions (see, e.g., [Miroshnichenko, 2003]). Meanwhile, it would be very interesting, in particular, to estimate the effect of solar flares on the evolution of life (e.g., [Reid et al., 1976]).

3.1. Some preliminary estimates

Very large flares can, in principle, cause big changes in the low energy CR intensity. A detailed study of expected catastrophic effects from cosmic rays (primarily the depletion of atmospheric ozone layer) was undertaken by [Wdowczyk, Wolfendale, 1977]. In terms of the energy density ϵ of CR particles (in $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}$) coming at the top of the atmosphere, they estimated, in particular, the likely frequency of solar flares of sufficient strength to have significant effect. The frequency distributions were constructed for two periods, 1956–1960 and 1961–1972, with different average levels of solar activity. The results obtained for SEPs (solar energetic particles) are summarized in Figure 8, together with the corresponding estimates for the occurrence rate of gamma flashes from the Supernovae (SN).

The abscissa in Figure 8 is the energy density in the event and relates to the top of the atmosphere. Line *a* is a rough estimate of the long-period average event rate (for energies above ~ 30 MeV) and derived from measurements made on protons during the very active period of 1956–1960 and during the most recent solar cycle of 1961–1972, the latter being of apparently rather average solar activity as judged by the mean sunspot numbers. Most of the particles under consideration normally arrive

in the polar regions. Line *b* represents the rate distribution when the event energy density is averaged over the Earth's surface. *SN* γ -flash denotes the rate distribution of energy deposition from the gamma-ray flash from Supernovae at 10 pc. *SNR* (3 yr) and *SNR* (all time) represent energy deposition over a 3-year period, and integrated over the whole time, respectively, from protons when the Earth is immersed in a Supernova remnant. *P* is a probability and ϵ the energy density.

As it has been shown by [Crutzen et al., 1975], a prominent SEP effect is a destruction of the ozone layer by nitrogen oxide NO produced after ionization of the stratosphere, and the incident proton energy necessary to reach the appropriate levels in the stratosphere is about 30 MeV. Thus, an energy threshold of 20 MeV in Figure 8 is only a little low for the necessary limit. In spite of an evident disparity in the absolute rates, $P(>\epsilon)$, the slopes of the variations are very similar in the two periods. There seems to be evidence for an empirical power law for $P(>\epsilon)$ over seven orders of magnitude. The authors suggest that such a distribution can probably be extended by at least several magnitudes more. Anyhow, one can clearly see that among the bursts at a given energy density, solar energetic particles in the range of 20...100 MeV drastically exceed in occurrence rate such an exotic source of radiation as a SN remnant.

These conclusions, however, have been seriously questioned by [Mullen, Kent, 1979]. They argued against the proposed extrapolation [Wdowczyk, Wolfendale, 1977] of the rate distribution function of solar flares to time intervals of the order of 10 years. [Mullen, Kent, 1979] propose that the power-law spectra, which have been fitted by [Wdowczyk, Wolfendale, 1977] to the SCR data, in fact, could not be extended to arbitrarily high energies. Instead of this, the spectra fall off rapidly beyond the last data point. In their discussion, [Mullen, Kent, 1979] refer to certain similarities in the energy distribution functions obtained by [Rosner, Vaiana, 1978] for three different classes of flaring objects: solar X-ray bursts, optical flares in dwarf M stars of spectral class dMe, and X-ray bursts from a cosmic X-ray source (burster) MXB 1730-335. In all three cases, there is observed to be a range of flare energies, E , in which the flare frequency, $f(>E)$, can be fitted by a power law in E .

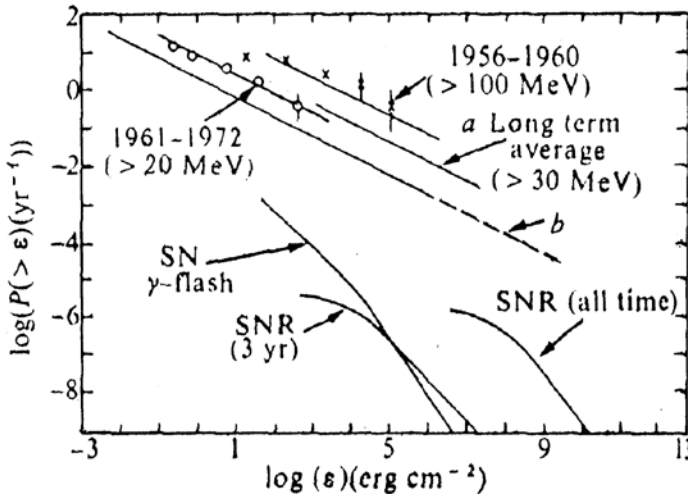


Figure 8. Integral occurrence rates of solar cosmic-ray bursts at the Earth's orbit in comparison with the effects from Supernova bursts [Wdowczyk, Wolfendale, 1977] (for details see the text)

[Rosner, Vaiana, 1978] developed a general model for flaring in which stored energy is built up in a short time scale, and the rate of energy storage, dE/dt , is assumed to be proportional to the energy already stored, $dE/dt = aE$. The release of the stored energy is thought to constitute the flare event. In this context, [Mullan, Kent, 1979] proposed the following physical argument for a rapid cutoff of the flare rate distribution for the Sun at about 11 y. The point is that solar flares energies are derived, ultimately, from the toroidal magnetic field which is created inside the Sun by the action of solar differential rotation on the poloidal field. It is known, however, that after 11 y elapsed, the poloidal and toroidal fields reverse sign, the toroidal field having been decreased to zero. From this point of view, each 11-year cycle begins with an emptying out of the energy reservoir.

This suggests that the equation derived by [Rosner, Vaiana, 1978] for the amount of stored energy $E(t) = E_0[\exp(at) - 1]$ is applicable only up to a maximum time of ~ 11 y. Hence, the occurrence rate distribution $f(E) \approx E^{-\gamma}$ applies as long as f^{-1} does not exceed 11 y. Therefore, in the opinion by [Mullan, Kent, 1979], extrapolation of the power-law behaviour beyond 11 y is not valid, and ancient catastrophes should not on this account be related to extremely high level of solar activity.

Extrapolating their highest energies (>60 MeV) fit to long time scales, [Kiraly, Wolfendale, 1999] obtained some new interesting estimates. It turns out that while the highest fluence measured up to now (in about 30 years) was $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$, one would expect in 1 Myr a few events above 10^{12} cm^{-2} , and in 100 Myr a few above 10^{13} cm^{-2} . This is far less than one would expect from flat slopes found by [Wdowczyk, Wolfendale, 1977], but probably more realistic. Thus, the largest SEP events in geological history should have been not more than 10^3 to 10^4 times larger than those detected so far, giving rise to only moderate “energetic particle catastrophes”. Those estimates, however, seem to be overestimated (see below our estimates for the fluences of $\Phi (\geq 30 \text{ MeV})$).

As to giant solar flares of the 23 February 1956 type, according to some estimates, in the past they might be a cause of some outstanding biotic extinctions. By the way, occurrence rate of giant flares can be estimated from some circumstantial data. For example, it is suggested [Beland, Russel, 1976] that the recently discovered four cases of extinction of *Radiolaria* for the last 2.5 Myr were due to the occurrence of such giant flares with a rate $\sim 10^{-4}$ /year coinciding with the geomagnetic inversion period. On the other hand, [Reid et al., 1976] noted that solar flares can influence on the biosphere not only by direct way, but also indirectly, through the production of nitric oxides. Ionization in the stratosphere caused by SCR (mainly by ≥ 30 MeV protons), in particular, results in formation of nitric oxide NO. Several major flares during 1 y can produce NO in the amount comparable with that is produced by its main source (oxidation of N_2O) and much more that can be provided by GCR. This process is followed by destruction of atmospheric ozone O_3 , mainly through the pair of reactions: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ and $\text{NO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$. Therefore, effectiveness of ozone shield for the biosphere against solar UV radiation will be weakened. Note also that in spite of that strong increase of SCR flux continues of ≤ 24 h, life time of NO in the stratosphere is large, and its impact on the ozone layer continues probably for several years. Based on such mechanism, the authors tried to explain both mass large-scale biological catastrophes (similar to dinosaurs’ extinction at the end of Cretaceous period) and small-scale extinctions (similar to four extinctions of *Radiolaria*). As noted above, the latter took place during last ~ 2.5 Myr when also 10 geomagnetic reversals occurred.

This hypothesis may be questioned, at least, on three reasons [Beland, Russel, 1976]. First of all, the extinction at the end of Cretaceous period affected more extended class of the organisms (not only dinosaurs) than extinctions of *Radiolaria*. Further, dinosaurs' extinction went on short time interval. It is worthy to note that, during 18 Myr before this phenomenon, 11 geomagnetic reversals took place, but diversity of land and marine reptiles preserved up to the end of Cretaceous period. At last, as we show below, the hypothesis by [Reid et al., 1976] is open to injury or criticism in the light of discrepancies concerning the occurrence rate of giant solar flares at different level of solar activity in the deep past and in current epoch.

3.2. Recent probabilistic analysis

As follows from observations of Sun-like stars, they display rather regularly the presence of the super-flares with a total energy of $10^{34} \dots 10^{35}$ erg [Maehara et al., 2012]. Note that their occurrence rate changes with the star's rotation period rather insignificantly, so that, in principle, similar events might be expected both at the "young" and "mature" Sun. As it was discovered recently, the most powerful flare, that was registered with confidence up to now during about 450 years both by direct solar observations and indirect data on nitrate concentration in the cores of Greenland (polar) ice, has released in optic range the energy of $\sim 10^{32}$ erg only. It was a famous Carrington flare of 1 September 1859 ("Carrington event"). On the other hand, this flare produced SEP flux with the fluence of protons at energy ≥ 30 MeV nearly $2.0 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, and it was the maximum value obtained through entire history of SCR investigations (since 1942). This means that it would be erroneous to exclude the events of 2–3 orders of magnitude larger, and, moreover, in the epoch of the young Sun their occurrence rate might be larger, too.

Recently, some progress in the **specification of the distribution function of SEP events** in the range of Low Probabilities was achieved [Miroshnichenko, Nymmik, 2012], due to new results of the study of Greenland Ice Cores (GIC). Important (unique) data on the fluences of large SEP events in the past were obtained for the period of 1561–1950 [McCracken et al., 2001]. In particular, it was estimated a fluence of protons of ≥ 30 MeV for the largest SEP event of that period $\Phi (\geq 30 \text{ MeV}) = 1.88 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (Carrington event). In the context of this study, it is worthy to compare this value with some earlier estimates (Figure 9).

In fact, according to modern data on proton fluences at the energy ≥ 30 MeV, for the period from 1973 up to 2008 there were registered 205 events with the fluence $\geq 10^6 \text{ cm}^{-2}$. If solar activity remains at modern (present) level, it means that for 1 My and 100 My, respectively, we may expect for $6 \cdot 10^6$ and $6 \cdot 10^8$ of such events, and the probabilities of their realization would be $\sim 1.7 \cdot 10^{-7}$ and $\sim 1.7 \cdot 10^{-9}$, respectively. According to our estimates (see Figure 9), for such long periods the events may appear with the fluences up to $6 \cdot 10^{10}$ and 10^{11} cm^{-2} , respectively, that is for 1.5...2 orders of magnitude lesser than the estimates by [Kiraly, Wolfendale, 1999]. Difference in the energies of protons (30 and 60 MeV) makes this discrepancy even much more. The cause of this discrepancy is rather simple. As it was repeatedly noted (see references in [Miroshnichenko, Nymmik, 2012]), lognormal distribution function of SEP events [Feynman et al., 1993] that was applied by [Kiraly, Wolfendale, 1999], by no means does reflect a physical essence of SEP event distribution in the range of large fluences.

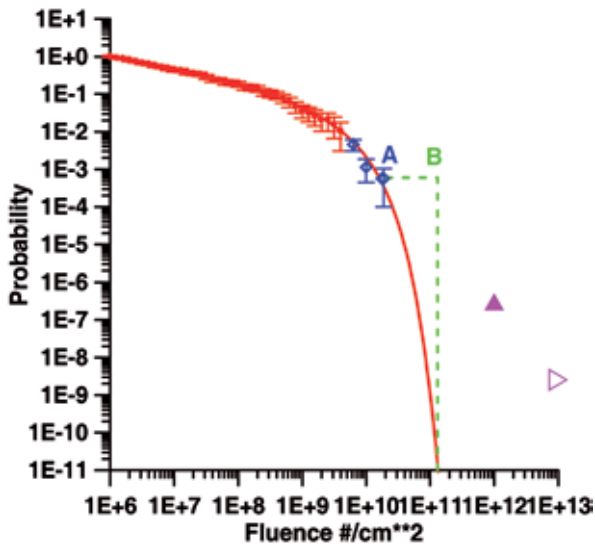


Figure 9. Distribution function of SEP events on the fluences of Φ (≥ 30 MeV): points with the statistical errors — measurement data onboard the spacecraft *IMP-8* and *GOES*; blue diamonds — estimates by the data from Greenland ice core; solid red line — our distribution function; triangles — our estimates of Φ (≥ 30 MeV) by [Kiraly, Wolfendale, 1999] data; segment AB = 7.2 [Miroshnichenko, Nymmik, 2012]

Parameters of the model by [Feynman et al., 1993] are determined mainly by subjective (random) magnitudes of the registration thresholds and selection of small SEP events; therefore, they can not serve for the extrapolation of the data into the range of extremely large events.

Distribution of extremely large SEP fluxes is shown to have a probabilistic nature, so that a formulation “limit flux” does not contain a strict physical sense. The SEP fluxes may be only characterized by quite certain probabilities of their appearance, with a sharp break of the spectrum in the range of large fluences (or low probabilities). Modern data of observations and methods of investigations do not allow, for the present, to resolve precisely the problem of spectrum break and estimate maximum potentialities of solar accelerator(s). This restricts considerably an extrapolation of obtained results for the past and future, for the epochs with different levels of solar activity.

4. MODERN ASTROPHYSICAL BACKGROUND

Recently, [Erykin, Wolfendale, 2010] considered long-term time variability of cosmic rays and possible relevance to the development of life on Earth over the period of 1 Myr by special statistical model developed by these authors since 2001. The time bin width under consideration was 1000 y. At present, the most wide-spread point of view is that predominant contribution into total intensity of GCR is provided by SN bursts. The authors’ model of particle acceleration in SN burst shows that differential energy spectrum of released particles is rather hard: $I(E) \sim E^{-2.1}$. If the burst occurred nearby the Solar system, then, on their way to the Earth, very high-energy particles do not undergo to the effects of propagation.

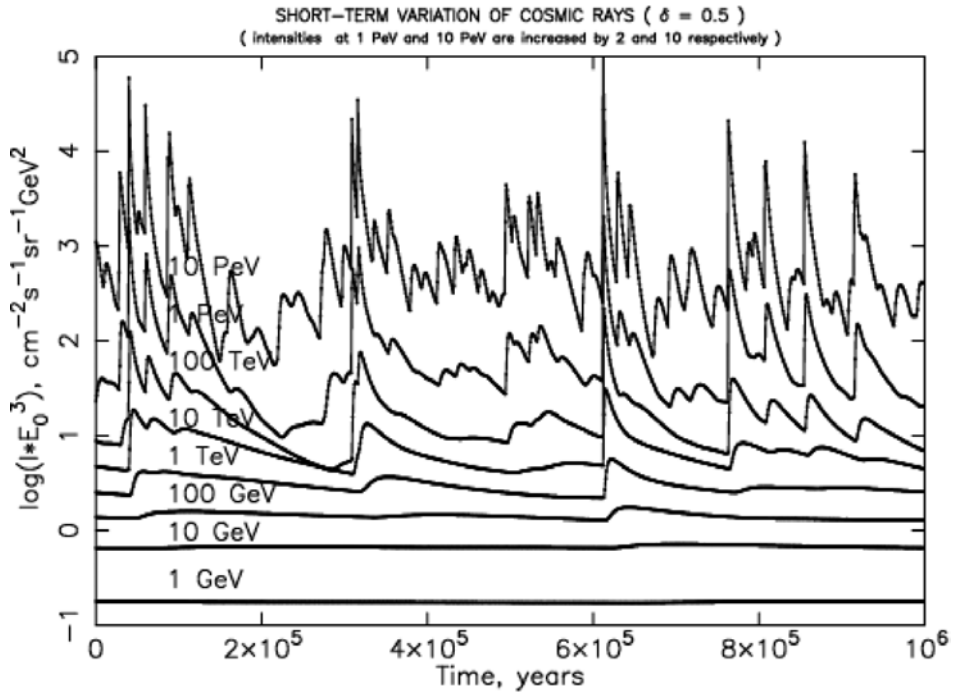


Figure 10. Long-term variations of cosmic rays of different energies over the time interval of 1 Myr with a time bin of 1000 yr. The sources of cosmic rays are SN bursts. Particle (proton) energies are indicated at the curves. Intensities for the particles with energies of 1 and 10 PeV are enlarged two times for the better resolution of the plots [Wolfendale, Erlykin, 2010]

As a result, they come to the Earth in practice with the same spectrum. At the same time, a leakage of CR in the process of propagation from more remote and old sources gives more hard spectrum: $I(E) \sim E^{-2.7}$, as it is just observed (in the present time). This difference in the spectra from distant and old sources, from one side, and that from near and relatively recent ones, from the other, results in that, after the near SN burst, the intensity of high-energy cosmic rays enhances more quickly, that that in low-energy range. Figure 10 demonstrates this difference.

In spite of that the model was developed for the protons only, the results may be also applied to other CR nuclei by a simple transformation of their rigidities to energies. Figure 10 shows the model results for the time interval of the 1 Myr width, with time resolution of 1000 yr, and energy range from 1 GeV (10^9 eV) to 10 PeV (10^{16} eV). It may be seen that high-energy cosmic rays from the SN remnants propagate more quickly and during more short time intervals than the particles of relatively low energies. Amplitudes of the CR variations in PeV energy range are about 100...1000 times as large as in the range of GeV energies. Note also that the high-energy peaks are narrower than at low energies. If we extrapolate the results obtained by [Erlykin, Wolfendale, 2010] for the period of 100 Myr from the present moment into the past, from the plots of Figure 10 one can see that even in such a remote past there might be the periods with very high intensity of cosmic rays in the PeV energy range.

Now we return to the latest results of CR measurements and demonstrate **some new findings and arising matters** related to the problem under consideration. The space-borne experiment PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and

Light nuclei Astrophysics) represents a state-of-the-art of the investigation of the cosmic radiation, addressing the most compelling issues facing astrophysics and cosmology: the nature of the dark matter (DM) that pervades the Universe, the apparent absence of cosmological antimatter, the origin and evolution of matter in the Galaxy. The instrument is optimized for the detection of the antiparticle components of cosmic rays. In particular, experiment PAMELA is able to measure proton, antiproton, helium nuclei, electron and positron spectra in a wide energy range (from 80 MeV to 190 GeV for antiproton and from 50 MeV to 270 GeV for positron) achieving a high precision in this energy range. As mentioned above, protons and helium nuclei are the most abundant components of the cosmic radiation. Precise measurements of their fluxes are needed to understand the acceleration and subsequent propagation of cosmic rays in the Galaxy. Recently, [Adriani et al., 2011] reported detailed PAMELA measurements of the proton and helium spectra in the rigidity range 1 GV – 1.2 TV. It was found that the spectral shapes of these two species are different and **cannot be well described by a single power law** (Figure 11).

These data challenge the current paradigm of cosmic-ray acceleration in SN remnants followed by diffusive propagation in the Galaxy. More complex processes of acceleration and propagation of cosmic rays are required to explain the spectral structures observed in PAMELA data. Those results imply that in our Galaxy, side by side the Supernovas, there are other sources of CR in the PAMELA energy range.

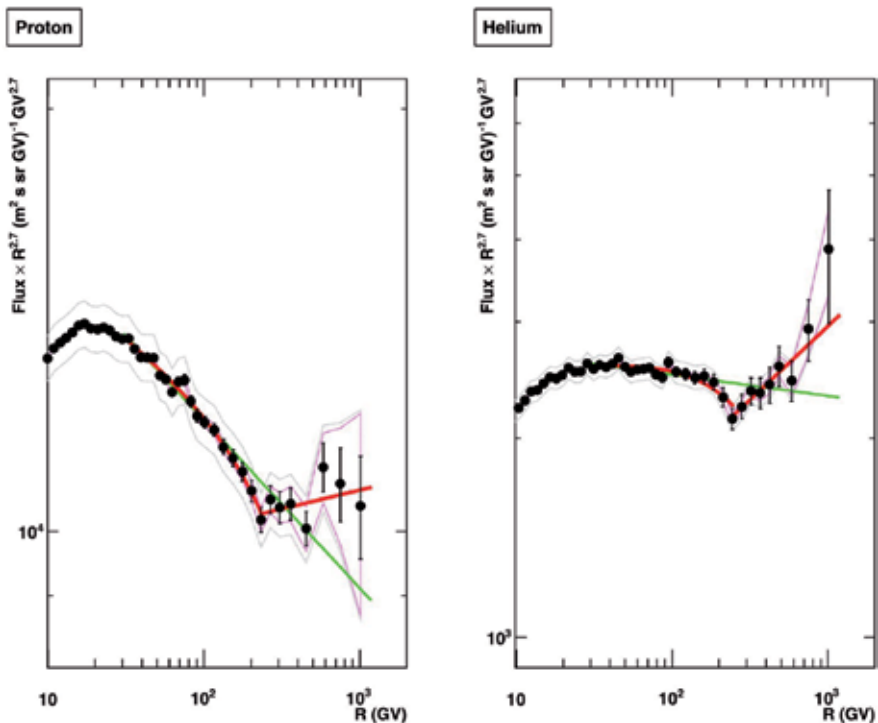


Figure 11. Proton (left panel) and helium (right panel) spectra in the range 10 GV – 1.2 TV. The gray shaded area represents the estimated systematic uncertainty; the pink shaded area represents the contribution due to tracker alignment. The straight (green) lines represent fits with a single power law in the rigidity range 30...240 GV. The red curves represent the fit with a rigidity dependent power law (30...240 GV) and with a single power law above 240 GV

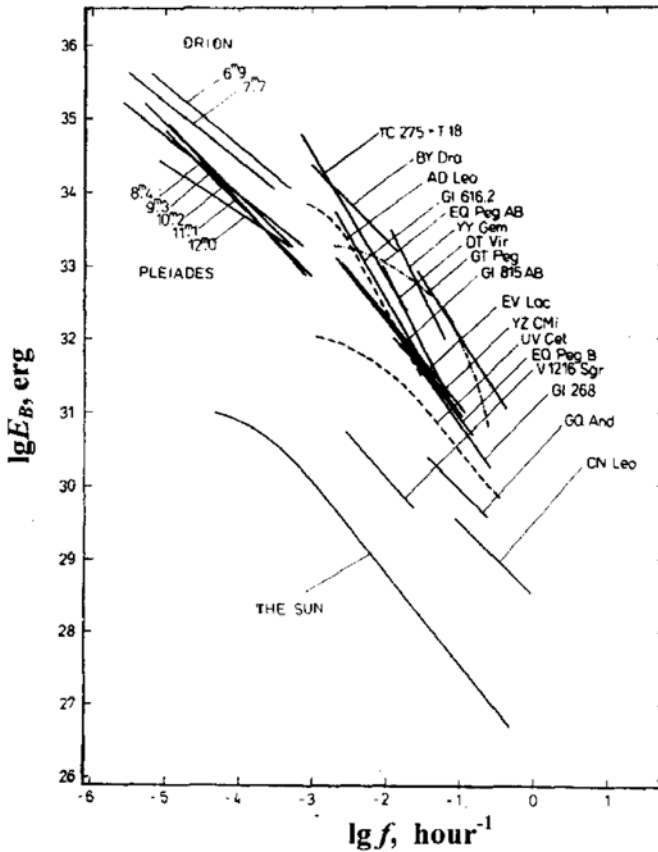


Figure 12. Energy spectra of flares on red dwarf stars and the Sun [Shakhovskaya, 1989]. Total energy in the B -band (Balmer emission lines) flare radiation, E_B , is plotted versus frequency, f , of flares with energy exceeding E_B

The main candidates of this kind are so-called **dwarf stars**. Here we only note that the energy distributions of dwarf stellar flares in the B -band (Balmer emission radiation) are power laws and similar to that for the solar flares (Figure 12), suggesting a similar scenario on other stars [Shakhovskaya, 1989]. The spectral indices in the energy spectra of star flares have a rather narrow range of values: from 0.4 to 1.4.

To illustrate present situation in this field, Figure 12 shows energy spectra of flares of 23 red dwarf stars in the solar vicinity, several groups of flare stars in clusters, and, for comparison, on the Sun (see for details and references in [Shakhovskaya, 1989]). In general features, the curves of stellar spectra and solar ones are similar (compare, for example, the curves for the Sun and UV Cet), though a difference in their amplitudes may be of several orders of magnitudes in energy. The similarity of those distributions, though obvious, is not investigated completely yet. Nevertheless, it is worthy to note that from physical point of view, potential acceleration sites in the Universe (including the Sun and heliosphere) need to have the appropriate combinations of sizes, magnetic (electric) fields, shock velocities and other relevant parameters.

Let us apply now to some other sources of information about CR variations in the very remote (geological) past. One of the rare and, therefore, very valuable

source of “ancient” data on cosmic rays are **meteorites**, with a possible application of those data to biospheric problems. As an example, we may note the rapid event in the history of origin of new forms of life (so-called “Cambrian explosion”) that occurred about 580...500 Myr ago and seems to coincide in time with considerable change of GCR intensity (Figure 13).

It has long been recognized that iron meteorites are excellent fossil detectors of cosmic ray radiation. Their exposure times to cosmic rays varied near three orders of magnitude; some of them were exposed for periods in excess of 1.0 Gyr. A substantial data base of cosmic-ray-produced nuclides exists including the data used for the $^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$ method, developed by [Voshage, Feldmann, 1979], which yields unique information on exposure ages of iron meteorites.

From Figure 13 it follows that within the interval between 900 and 400 Myr ago the flux of GCR may be several times lesser than the present level. Such an effect might take place provided the intensity of “ancient” solar wind was about 3...5 times of the present value in the maximum of the most powerful cycles of solar activity (SA) in the past century. With such large intensities, solar fluxes of magnetized plasma would be able to “sweep” cosmic ray particles out of the boundary of the asteroid belt that is considered as a “parent source” for the most of meteorites. As a result, strong solar wind might decrease the flux of GCR inside the heliosphere (in particular, at the Earth’s orbit) up to the magnitude needed. However, modern theory of the solar dynamo cannot give yet an exact estimate of maximum magnitude of solar activity that would preserved with stable high level during several hundreds of Myr.

More late studies of GCR variations by meteorite data compel us to doubt the reliability of the curve plotted in Figure 13. In particular, there is no confidence in that before 900 Myr ago (right part of the Figure 13) the flux of GCR was the same as in present time. There are some indications on that the errors in the estimates of the GCR flux by meteorite data are rather large (from ~ 0.3 to ~ 1.5). At the same time, according to recent estimates, expected changes of GCR intensity in the past (up to 1 Gyr ago) might reach the values from 25 to 135 % (e.g., [Shaviv, 2002]). In addition, a new methodical (as well as physical?) question arises: Which level of GCR intensity should we take as a normal — the ancient or present ones? Anyway, as shown above, a possibility itself of considerable changes of CR intensity in the past is beyond any doubt. In particular, with some confidence we can state that in the period of 900...400 Myr ago the flux of GCR seems to be 2...3 times lesser than in the modern epoch. Of special interest is the problem of correct estimates of the occurrence rate for the giant solar flares in the present time and in the distant past, as well as the similar problem for the occurrence rate of SN burst.

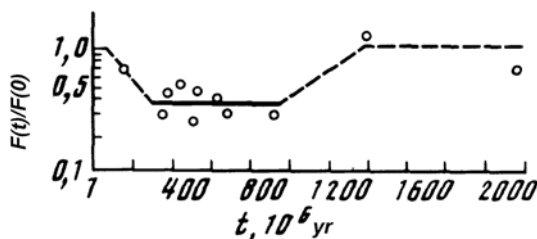


Figure 13. Possible changes of GCR intensity in the Solar system during last ~ 2 Gyr by the data on radioactive ^{40}K in eight iron meteorites and metallic phases of chondrites with different exposure times [Lavrukhina, 1969; Lavrukhina, Ustinova, 1990]

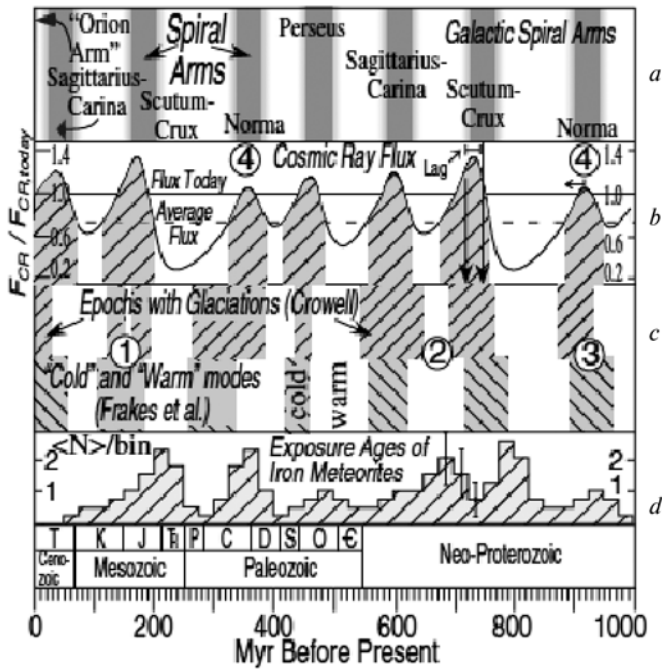


Figure 14. A compilation of 74 iron meteorites which were K(41)/K(40) exposure dated [Voshage, Feldman, 1979] with other concomitant data for the past Eon: *a* — past Galactic spiral arm crossings; *b* — the CR flux reaching the Solar System using the CR diffusion model; *c* — qualitative descriptions of the geologically recorded IAEs; *d* — a 1-2-1 averaged histogram of the $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$ exposure ages of Fe meteorites, which are predicted to cluster around the CR flux minima (for more details see [Shaviv, 2002])

About 10 years ago, new interesting attempt to go deeply into the problem was undertaken. Based on more extended meteorite data [Voshage, Feldmann, 1979] for 74 species of different ages, [Shaviv, 2002] carried out his study within the concept of possible connection between Galactic structure, cosmic rays and climatic changes for the period up to 1 Gyr in the past. He constructed a GCR diffusion model while considering that CR sources reside predominantly in the Galactic spiral arms. To avoid real clustering in the data (due to one parent body generating many meteorites), the author has removed all occurrences of Fe meteorites of the same classification that are separated by less than 100 Myr and replace them by the average. This left him with 42 meteorites. From the very beginning, it was suggested that the CR flux reaching the Solar system should periodically increase each crossing of a Galactic spiral arm. Searching for this signal in the CR exposure age record of iron meteorites, [Shaviv, 2002] confirmed this prediction (Figure 14).

Then the hypothesis has been checked that climate, and in particular the temperature, is affected by the CR flux to the extent that terrestrial glaciations can be induced or completely hindered by possible climatic variations. Finally, it was found that although the geological evidence for the occurrence of Ice Age Epochs (IAE) in the past Eon is not unequivocal, it appears to have a nontrivial correlation with the spiral arm crossings — agreeing in period and phase. Note that the correlation need not be absolute since additional factors may affect the climate. As it was predicted by the model, an averaged histogram of the $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$ exposure ages of Fe meteorites to

be clustered around the CR flux minima. The cluster-IAE correlation further suggests an extraterrestrial trigger for the glaciations. Thus, a better timing study of glaciations could either confirm this result as an explanation to the occurrence of IAEs or refute a CR flux climatic connection.

Recently, the results and conclusions by [Shaviv, 2002] have been severely criticized by [Overholt et al., 2011]. These authors re-examined past suggestions of a close link between terrestrial climate change and the Sun's transit of spiral arms in its path through the Milky Way Galaxy. As shown above (see [Figure 14]), these links produced concrete fits, deriving the unknown spiral pattern speed from terrestrial climate correlations. Although in a number of previous works it was found a correlation between the 140 Myr climate cycle on the Earth and the intersection with spiral arms (e.g., [Shaviv, 2002]), with a new set of data on the structure of the Galaxy, according to [Overholt et al., 2011], this correlation disappears.

The authors used a new model of the large-scale gas distribution in the Galaxy, using a velocity deconvolution of CO and H I line data based on self-consistently computed, non-circular gas flows in the inner Galaxy. In contrast to many published studies, this model does not force azimuthal symmetry into the spiral-arm structure. The asymmetry of the arms near the solar circle erases any correlation to the 140 Myr cycle and any periodic trend less than the orbital period of our Solar system relative to the spiral pattern as a whole. This would be greater than 500 Myr for the previously fit pattern speed. Even if [Overholt et al., 2011] allow the pattern speed to vary, it will not be less than the orbital period of the Sun, which is still longer than the 140 Myr cycle in question. The asymmetry of the new galactic picture could create a correlation between the spiral arm crossings and any non-periodic event by varying the pattern speed. The final authors' conclusion is: Based on these new data, there is no evidence to suggest any correlation between the transit of our Solar system through the spiral arms of our Galaxy and the terrestrial climate. This categorical conclusion, nevertheless, **by no means removes the problems** and consequences related to enhanced occurrence rate of SN bursts and increased CR fluxes at the Sun's transit of spiral arms.

5. ASTROBIOLOGY, COSMIC RAYS AND MARTIAN EXPERIMENTS

In the context of the problem under consideration, of paramount interest is a question about a possibility to **preserve some kinds of life** in the surface layers of Martian soil. This problem is discussed since the realization of the first astrobiological experiment at Mars, namely, landing of the space module Viking in 1976. Interpretation of the Viking results made very actual a discussion of the hypothesis on the presence of strong oxidants in the regolith that may not be compatible with organic life (e.g., [Cheptsov et al., 2012]). Thus, it was no surprise that our first interplanetary target to look for life was Mars (e.g., [Levin, 2010]).

Since 1960, more than 40 spacecraft have been launched to Mars. Only 20 of these craft succeeded in orbiting or landing on the planet. But the first evidence of life on Mars, according to the opinion by [Levin, 2010], was already found... three decades ago! He argued that in 1976, the Viking Mission has already obtained strong evidence for life on Mars. That evidence has been so unreasonably tinged that many people have never heard of it. The Labeled Release (LR) life-detection experiment, performed by Levin and his colleagues, released radioactive food into a sample of

Martian soil to see if there were any microbes present that would ingest the food and then exhale radioactive gas. The LR data detected such an exhalation — and the response was exactly what researchers would have found in soils on Earth. Yet, because this was Mars, there was a lot of skepticism about the findings. The skepticism was reinforced by another Viking experiment that found no organic compounds in other soil samples. Researchers have since impugned the instrument that conducted the organic search, but the positive LR results have not been vindicated and are still attributed to some unknown, highly oxidative chemical in the soil. But even that has been shown to be wrong. After more than 30 years of avid testing by many skeptics, no one has found a non-biological way to replicate the results of the Levin's experiment.

In fact, recent planetary observations have brought new data that allow to revise the results of Viking experiments. Key finding for that was a discovery of the **sodium perchlorate NaClO_4** (salt of chlorine acid) in the Martian soil. At the Earth's surface the perchlorate is rather extensively spread in arid biotopes, in forms the evaporites. However, biological role of this active oxidant is poor studied. Some recent publications concerning new analysis of Viking Mission results, where the perchlorate is included in the analytical model, give rather forcible arguments in favour the suggestion that the life on Mars was really found in 1976.

In 2008 the experiment MECA onboard spacecraft Phoenix found the perchlorate NaClO_4 in the Martian soil. At the temperature above 200 °C used in the LR-experiments, this substance displays the properties of strong oxidant. Model experiments confirmed that **the perchlorate transforms organic substance in the soil into chloromethane and dichloromethane**, and just those gases have been found in the LR-experiments. According to opinion by Gil Levin (principal investigator of the experiments), this result, together with a bulk of other Martian data (studies of the meteorite Allan Hills, planetary data on the presence of methane and formaldehyde, discovery of sedimentary rocks, direct and indirect evidences of the presence of liquid water at the Mars, discovery of perchlorates) confirmed that in 1976 the LR-experiments have provided distinct proofs of the life presence in the Martian soil [Levin, 2010] (see also: http://gillevin.com/Mars/EARTHComment_8=9-10.pdf).

There are also some another interesting aspects related to the problem of life evolution (adaptation) at the Mars. As well-known, Mars has no dense atmosphere and strong magnetic field. Therefore, particles of GCR and SCR can effectively bombard the Martian surface. This impact results in the formation of radiation background that may reach about 100 times of that at the Earth's surface. However, as far as we know, up to now, there are no special theoretical and/or experimental works on the variations of CR background and their influence on the biological objects and biomarkers in the course of long-term Martian evolution.

As mentioned above, detection of the organic matter on Mars is one of the main goals of the current and future Martian landing missions. However, as noted by [Pavlov et al., 2012], the degradation of organic molecules by cosmic ray irradiation on Mars is often ignored. The authors calculated the accumulation rates of radiation dose from solar and galactic cosmic rays at various depths in the shallow Martian subsurface (Figure 15). It was shown that a 1 Gyr outcrop on Mars accumulates the dosage of ~500 MGy (MegaGrey) in the top 0...2 cm and ~50 MGy at 5...10 cm depths. It means that the preservation of ancient complex organic molecules in the shallow (~10 cm depth) subsurface of rocks could be **highly problematic** if the exposure age of a geologic outcrop would exceed 300 Myr.

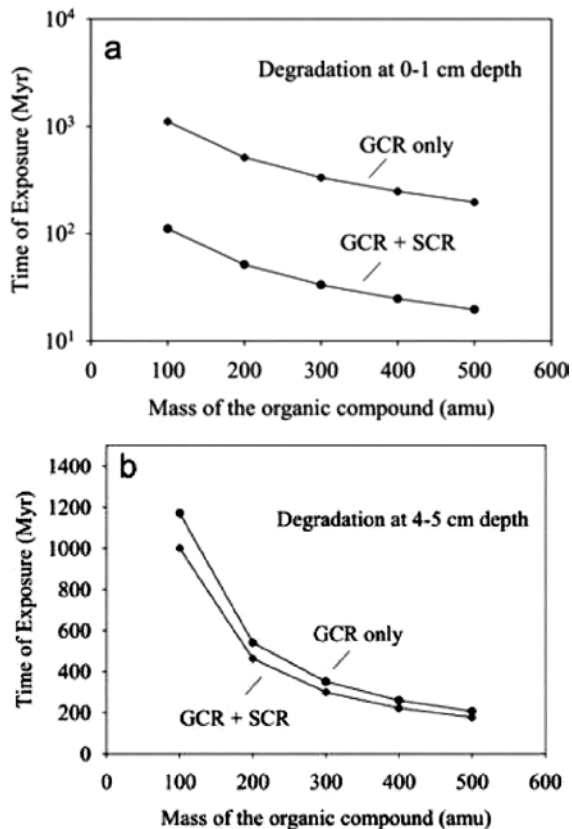


Figure 15. Exposure time (a) at 1 cm and (b) at 5 cm depths necessary for a 1000-fold decrease in the organic molecules abundance vs. molecular mass of the organic compounds. The “standard” Martian surface rock composition and 7 mbar atmosphere were assumed for calculations of GCR contribution. Calculations of the organic degradation due to SCR assume that the atmospheric pressure drops to 0.2 mb for 10 % of Martian history in the last billion years (for more details see [Pavlov et al., 2012])

On the other hand, it was demonstrated that more simple organic molecules with masses ~100 amu should have a good chance to survive in the shallow subsurface of rocks.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

As noted in the Introduction, life on the Earth has developed with an ever present background of radiation. It is not something new, invented by the wit of man: radiation has always been there. The fields of heredity, botany, genetics, cytology and other biological sciences are becoming increasingly important because of the intensive studies being made of the effects of radiations upon cell structure and offspring of animals and human beings who have been exposed to various types of radiations.

Of course, when considering the problems related to the origin and evolution of the biosphere we should take into consideration rather deeply studied **principles of adaptation** of the biological systems to cosmophysical factors (see, e.g., [Aguilova,

1998]). One of them is a **complex impact** of the factors on the biological object. With this in mind, it is very important to separate and estimate quantitatively the **partial contributions of main and concomitant factors**, for instance, cosmic rays, as it seems to take place in the case of metachromasy investigations. On the other hand, there is evidence concerning evolution analogous to plate tectonics in geology, imposing an overarching simplicity while leaving mismatches to explain and infinity of details to explore. Anyhow, we believe that at present there are serious grounds (see, e.g., [Obridko et al., 2012]) to consider the modern response of the biological systems on cosmophysical factors as **specific “atavistic” reaction** on the changes of the habitat (“**evolution-adaptation syndrome**”).

Thus, from the results and discussions given above we can naturally formulate several promising Research Tasks, as follows:

1. Analysis of the occurrence rates of SN bursts and that of the ordinary (in particular, dwarf) stars from the nearest environment of the Sun with a goal to specify their relative contribution into observed GCR flux.
2. Revision of meteorite data available on the variation of GCR flux in the deep past, with taking into account the results of Task 1.
3. Estimates of maximum potentialities of particle accelerator at the Sun at present time and in the epoch of “young Sun”.
4. As an example of complex fundamental and/or applied problems, we emphasize a great importance of the searches for life signatures at the Martian surface, taking into account theoretical and empirical estimates of radiation hazard at the Martian orbit from GCR and SCR in modern epoch and further theoretical calculations of possible CR impact on the Martian surface layers in the deep past.

In the whole, from astrophysical point of view, it would be timely, in particular, **to estimate anew** the probabilities of SN bursts and giant flares at nearest dwarf stars, taking into account accurately the transport time of CR from their sources to the Earth. It would be also important to revise a modern concept of so-called “Galactic Habitable Zone”, taking into consideration new data on the structure of Galactic spiral arms. As to occurrence rate of giant solar flares, we are ready to apply a hypothesis that in the remote past the young Sun was able to produce the fluxes of SCR of several orders magnitude of the present values. The consequences of such situation concern mainly the fields of radiobiology and genetics. To our mind, the radiobiologists and genetics have to carry out new modeling studies with taking into account new real information about cosmic ray variations in the past and in the present time.

Acknowledgements. For the first time, preliminary author’s review of the problem “Cosmic Rays and Biosphere: Origin and Evolution of Terrestrial Life” was presented at the 11th Ukrainian Space Research Conference (Ukraine, Crimea, Yevpatoria, 29 August – 3 September 2011). In December 2011 my talk with the same title was given at the Round Table Italia-Russia “Astrobiology: New Ideas and Research Trends” (December 10–13, 2011, Dubna, Russia). Two new up-to-dated presentations by L. I. Miroshnichenko, “Cosmic Rays and Evolution of the Biosphere: Search for New Approaches”, have been made at the International Conference “Space Weather Effects on Humans in Space and on Earth” (IKI, Moscow, 4–8 June 2012) and 12th Ukrainian Space Research Conference (Ukraine, Crimea, Yevpatoria, 2–7 September 2012). The latest talk on the subject “Cosmic Rays and Evolution of the Biosphere: Facts and Hypotheses” has been presented at the special

Round Table Session within the framework of the Conference on Astrobiology in Pushchino (Russia), 16–19 September 2012.

Acknowledgments. The author is very indebted to all researchers whose data and figures have been used in this paper. I also greatly thank my colleagues from the Helio-Ecology Group of IZMIRAN — V.N. Obridko, O.V. Khabarova, M.V. Ragskaya and others — for learning discussions and fruitful cooperation. This work is partially supported by RAS-28 Program of Fundamental Research “Problems of the life origin and formation of the biosphere” (Russian Academy of Sciences).

REFERENCES

- [Adriani et al., 2011] *Adriani O., Barbarino J. C., Bazilevskaya G. A.* et al. (in all 65 authors). PAMELA Measurements of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra // *Science Express*. 3 March 2011. P. 1–5.
- [Agulova, 1998] *Agulova L. P.* Principles of the organism adaptation to the cosmogeophysical factors // *Biophysics*. 1998. V. 43. Iss. 4. P. 571–574 (= *Агулова Л. П.* Принципы адаптации биологических систем к космогеофизическим факторам // *Биофизика*. 1998. Т. 43. Вып. 4. С. 571–574).
- [Avdeev, 2001] *Avdeev S. V.* Experimental studies of particles inducing a light flash phenomenon in the cosmonaut’s eyes by position-sensible semiconductor strip detectors: Candidate Dissertation (PhD Thesis). Moscow Engineering and Physical Institute (MEPhI), 2001. 120 p.
- [Beland, Russel, 1976] *Beland P., Russel D. A.* Biotic extinctions by solar flares // *Nature*. 1976. V. 263. N. 5574. P. 259.
- [Belisheva, Gak, 2002] *Belisheva N. K., Gak E. Z.* Importance of cosmic ray variations for the functioning of living systems // *Collection of Scientific Reports at 7th Intern. Conf. “Ecology and Development of North-West Russia”*. 2–7 August 2002. St.-Petersburg. 2002. P. 118–129.
- [Belisheva et al., 2006] *Belisheva N. K., Kuzhevsky B. M., Sigaeva E. A., Panasyuk M. I., Zhirov V. K.* Modulation of functional state of blood by variations of neutron intensity near the Earth’s surface // *Reports (Doklady) of Russian Academy of Sciences*. 2006. V. 407. N. 5. P. 687–691 (= *Белишева Н. К., Кузевский Б. М., Сигаева Е. А., Панасюк М. И., Жиров В. К.* Модуляция функционального состояния крови вариациями интенсивности нейтронов у поверхности Земли // *Докл. Акад. наук*. 2006. Т. 407. № 5. С. 687–691).
- [Black, 1967] *Black D. J.* Cosmic ray effects and faunal extinctions at geomagnetic reversals // *Earth and Planet. Sci. Letters*. 1967. V. 3. N. 3. P. 225–236.
- [Cheptsov et al., 2012] *Cheptsov V., Solovyeva O., Vorobyeva E. A.* Stability of the soil microbe associations to the radiation and oxidation stress as an analytic model of Martian ground // *1st Russian School-Conf. Astrobiology*. Pushchino, Moscow Region, Russia, 16–19 Sept. 2012 (= *Чепцов В., Соловьёва О., Воробьёва Е. А.* Устойчивость микробных сообществ почв к радиации и окислительному стрессу как аналитическая модель марсианского грунта: стендовый докл. // 1-я Всерос. науч. шк.-конф. по астробиологии «Астробиология: от происхождения жизни на Земле к жизни во Вселенной» (памяти Д. А. Гиличинского). 16–19 сент. 2012, Пушкино).
- [Comstock et al., 1971] *Comstock G. M., Fleischer R. L., Giard W. R.* et al. (in all 6 authors). Cosmic ray tracks in plastics: The Apollo helmet dosimetry experiment // *Science*. 1971. V. 171. N. 3979. P. 154–156.

- [Crutzen et al., 1975] *Crutzen P. J., Isaksen I. S. A., Reid G. C.* Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide // *Science*. 1975. V. 189. N. 4201. P. 457–458.
- [Erlykin, Wolfendale, 2010] *Erlykin A. D., Wolfendale A. W.* Long term time variability of cosmic rays and possible relevance to the development of life on Earth // *Survey of Geophysics*. 2010. V. 31. N. 4. P. 383–398.
- [Ermakov, Stozhkov, 2003] *Ermakov V. I., Stozhkov Yu. I.* Cosmic rays in the mechanism of thundercloud production // *Proc. 28th Intern. Cosmic Ray Conf. Tsukuba, Japan*. 2003. V. 6. P. 4157–4160.
- [Eugster, 1940] *Eugster J.* Die Weltraumstrahlung (kosmische Strahlung) und ihre biologische Wirkung. Zurich: Füssli, 1940.
- [Feynman et al., 1993] *Feynman J., Spitale G., Wang J.* Interplanetary Proton fluence model: JPL-91 // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. P. 13 281–13 294.
- [Goswami, 1991] *Goswami J. N.* Solar flare heavy-ion tracks in extraterrestrial objects // *The Sun in Time / Eds. C. P. Sonett, M. S. Giampappa, M. S. Matthews*. The University of Arizona, Tucson. 1991. P. 426–444.
- [Goswami, Marhas, 2005] *Goswami J. N., Marhas K. K.* Limits on the spectral shape and flux of energetic charged particles from the Proto-Sun // *Proc. 29th Intern. Cosmic Ray Conf. Pune, India*. 2005. V. 1. P. 79–82.
- [Gromozova et al., 2010] *Gromozova Ye. N., Grigoriev P. Ye., Kachur T. L., Voychuk S. I.* Influence of cosmophysical factors on a reaction of metachromasy in the volutine granules in *Saccharomyces cerevisiae* // *Geophysical Processes and Biosphere*. 2010. V. 9. N. 2. P. 67–76.
- [Gurevich, 2009] *Gurevich A. V.* Nonlinear phenomena in ionospheric plasma. Effect of cosmic rays and runaway electron breakdown on thunderstorm discharges // *Uspekhi Fiz. Nauk*. 2009. V. 179. N. 7. P. 779–790 (= *Гуревич А. В.* Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды // *Успехи физ. наук*. 2009. Т. 179. № 7. С. 779–790).
- [Hess, Eugster, 1949] *Hess V. F., Eugster J.* Cosmic radiation and its biological effects. N. Y.: Fordham Univ. Press, 1949.
- [Király, Wolfendale, 1999] *Király P., Wolfendale A. W.* Long-term particle fluence distributions and short-term observations // *Proc. 26th ICRC. Salt Lake City, USA*. 1999. V. 6. P. 163–166.
- [Krassovsky, Shklovsky, 1957] *Krassovsky V. I., Shklovsky I. S.* Possible influence of Supernova bursts on life's evolution at the Earth // *Reports (Doklady) of Academy of Sciences of the USSR*. 1957. V. 116. P. 197–199 (= *Красовский В. И., Шкловский И. С.* Возможное влияние вспышек сверхновых на эволюцию жизни на Земле // *Докл. АН СССР*. 1957. № 116. С. 197–199).
- [Krassovskij, Šklovskij, 1958] *Krassovskij V. I., Šklovskij I. S.* Variation of the Intensity of Cosmic Radiation during Earth's Geological History and Their Possible Influence on Life's Evolution // *Nuovo Cimento Supplemento*. 1958. V. 8. Ser. 10. N. 2. P. 440–443.
- [Krebs, 1950] *Krebs A. T.* Possibility of biological effects of cosmic rays in high altitudes, stratosphere and space // *Aviation Medicine*. 1950. P. 481–494.
- [Krymsky, 2002] *Krymsky G. F.* Cosmic rays and near-terrestrial space // *Solar-Terrestrial Physics. Irkutsk*. 2002. Iss. 2. N. 115. P. 42–45 (= *Крымский Г. Ф.* Космические лучи и околоземное пространство // *Солнечно-земная физика. Иркутск: ИСЗФ СО РАН*, 2002. Вып. 2. № 115. С. 42–45).
- [Lal, Ligenfelter, 1991] *Lal D., Ligenfelter R. E.* History of the Sun during the past 4.5 Gyr as revealed by studies of energetic solar particles recorded in extraterrestrial and terrestrial samples // *The Sun in Time / Eds. C. P. Sonett, M. S. Giampappa, M. S. Matthews*. The University of Arizona, Tucson. 1991. P. 221–231.

- [Lavrukhina, 1969] *Lavrukhina A. K.* New data on temporal and spatial variations of cosmic rays in the Solar system (by meteorite data) // *Izvestiya (Bull.) of AN SSSR. Phys. Ser.* 1969. V. 23. N. 11. P. 1870–1876.
- [Lavrukhina, Ustinova, 1990] *Lavrukhina A. K., Ustinova G. K.* Meteorites — Probes for Cosmic Ray Variations. M.: Nauka, 1990. 262 p. (= *Лаврухина А. К., Устинова Г. К., Шуколюков Ю. А.* Метеориты — зонды вариаций космических лучей. М.: Наука, 1990. 261 с.).
- [Levin, 2010] *Levin G. V.* It's time to realize there is life on Mars // *EARTH*, Oct. 2010. P. 86. (see also http://gillevin.com/Mars/EARTHComment_8=9-10.pdf)
- [Maehara et al., 2012] *Maehara H., Shibayama T., Notsu Sh.* et al. (in all 9 authors). Super-flares on solar-type stars // *Nature Research Letter.* 2012. V. 485. P. 478–481. doi:10.1038/nature11063.
- [McCracken et al., 2001] *McCracken K. G., Dreschhoff G. A. M., Zeller E. J., Smart D. F., Shea M. A.* Solar cosmic ray events for the period 1561–1994. 1. Identification in polar ice, 1561–1950 // *J. Geophysical Research.* 2001. V. 106. N. A10. P. 21 585–21 598.
- [Messerotti, Chela-Flores, 2007] *Messerotti M., Chela-Flores J.* Solar activity and life. A review // *COST 724 final report. Developing the scientific basis for monitoring, modeling and predicting Space Weather.* 2007. P. 109–118. (see also <http://www.spaceweather.eu/en/cost>.)
- [Miroshnichenko, 1980] *Miroshnichenko L. I.* Biological effects of cosmic rays // *Mutagenesis on Exposure to Physical Factors* / Eds. Dubinin N. P., Shevchenko V. A., Pomerantseva M. D et al. M.: Nauka, 1980. P. 187–205 (= *Мирошниченко Л. И.* Биологические эффекты космических лучей // Мутагенез при действии физических факторов / Под ред. Дубинин Н. П. М.: Наука, 1980. С. 187–205).
- [Miroshnichenko, 1984] *Miroshnichenko L. I.* Variations of cosmic rays in the biosphere // *Electromagnetic Fields in the Biosphere.* M.: Nauka, 1984. V. 1. P. 33–39 (= *Мирошниченко Л. И.* Вариации космических лучей в биосфере // Электромагнитные поля в биосфере. М.: Наука, 1984. Т. 1. С. 33–39).
- [Miroshnichenko, 1992] *Miroshnichenko L. I.* Cyclic variations and sporadic fluctuations of solar cosmic rays // *Biophysics.* 1992. V. 37. N. 3. P. 452–466.
- [Miroshnichenko, 2001] *Miroshnichenko L. I.* *Solar Cosmic Rays.* Kluwer Academic Publishers: The Netherlands, 2001. 480 p.
- [Miroshnichenko, 2003] *Miroshnichenko L. I.* *Radiation Hazard in Space.* The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. 248 p.
- [Miroshnichenko, 2008] *Miroshnichenko L. I.* Solar cosmic rays in the system of solar-terrestrial relations (Review) // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (Special Iss. ISROSES Proc.).* 2008. V. 70. P. 450–466.
- [Miroshnichenko, Nymmik, 2012] *Miroshnichenko L. I., Nymmik R. A.* Extreme fluxes in solar energetic particle events: Methodical and physical limitations // *Radiation Measurements.* 2012.
- [Mullan, Kent, 1979] *Mullan D. J., Kent D. W.* Can solar flares be the cause of ancient catastrophes? // *Proc. 16th Intern. Cosmic Ray Conf. Kyoto, Japan.* 1979. V. 5. P. 323–326.
- [Obridko et al., 2012] *Obridko V. N., Miroshnichenko L. I., Ragulskaya M. V.* et al. (in all 7 authors). Space factors of evolution of the biosphere: New trends of investigations // *Problems of the life origin and formation of the biosphere* / Ed. A. Yu. Rozanov. M.: Paleontology Institute of Russian Academy of Sciences, 2012.
- [Overholt et al., 2009] *Overholt A. C., Melott A. L., Pohl M.* Testing of the link between terrestrial climate change and galactic arm transit // *Astrophysical J. Letters.* 2009. V. 705. P. L101–L103.
- [Pavlov et al., 2012] *Pavlov A. A., Vasilyev G., Ostryakov V. M., Pavlov A. K., Mahaffy P.* Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by

- cosmic rays // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. L13202, doi: 10.1029/2012GL052166.
- [Pinsky et al., 1974] *Pinsky L. S., Osborne W. Z., Bailey J. V.* et al. (in all 5 authors). Light flashes observed by astronauts on Apollo 11 through Apollo 17 // *Nature*. 1974. V. 183. P. 957–959.
- [Reid et al., 1976] *Reid G. C., Isaksen I. S. A., Holzer T. E., Crutzen P. J.* Influence of ancient solar proton events on the evolution of life // *Nature*. 1976. V. 259. N. 5540. P. 177–179.
- [Ribas et al., 2005] *Ribas I., Guinan E. F., Güdel M., Audard M.* Evolution of the solar activity over time and effects on planetary atmospheres. I. High-energy irradiances (1...1700 Å) // *Astrophysical J.* 2005. V. 622. N. 1. P. 680–694.
- [Rosner, Vaiana, 1978] *Rosner R., Vaiana G. S.* Cosmic flare transients: Constraints upon models for energy storage and release derived from the event frequency distribution // *Astrophysical J.* 1978. V. 222. P. 1104–1108.
- [Sepkoski, 2002] *Sepkoski J. J.* A Compendium of Fossil Marine Animal Genera // *Bull. American Paleontology / Eds. Jablonski D., Foote M.*, N. Y.: Paleontological Research Institution, Ithaca, 2002. V. 363. P. 560.
- [Shakhovskaya, 1989] *Shakhovskaya N. I.* Stellar flare statistics — Physical consequences // *Solar Physics*. 1989. V. 121. N. 2. P. 375–386.
- [Shaviv, 2002] *Shaviv N. J.* Cosmic ray diffusion from the Galactic spiral arms, iron meteorites, and a possible climatic connection // *Physical Review Letters*. 2002. V. 89. N. 5. P. 051102-1–051102-4. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.051102.
- [Shea, Smart, 2000] *Shea M. A., Smart D. F.* Cosmic ray implications for human health // *Space Science Reviews*. 2000. V. 93. P. 187–205.
- [Shklovsky, 1962] *Shklovsky I. S.* Universe, life, mankind. M.: Nauka, 1962 (1st ed.), 1985 (5th ed.), 1987 (6th ed.) (*Шкловский И. С.* Вселенная. Жизнь. Разум. 1-е изд. М.: Изд-во АН СССР, 1962; 2-е изд. 1965; 3-е изд. М.: Наука, 1973; 4-е изд. 1976; 5-е изд. 1980; 6-е изд. 1987).
- [Singh et al., 2011] *Singh A. K., Siingh Devendraa, Singh R. P.* Impact of galactic cosmic rays on Earth's atmosphere and human health // *Atmospheric Environment*. 2011. V. 45. P. 3806–3818.
- [Stepanov, 1980] *Stepanov A. M.* Evolutionary approach to the determination of genetically significant radiation doses // *Mutagenesis on Exposure to Physical Factors / Eds. Dubinin N. P., Shevchenko V. A., Pomerantseva M. D.* et al. M.: Nauka, 1980. P. 176–186 (= *Степанов А. М.* Эволюционный подход к определению генетически значимых доз радиации // *Мутагенез при действии физических факторов*. М: Наука, 1980. С. 176–186).
- [Stozhkov, 2003] *Stozhkov Yu. I.* The role of cosmic rays in the atmospheric processes // *J. Physics G: Nuclear Particle Physics*. 2003. V. 29. P. 913–923.
- [Svensmark, 2012] *Svensmark H.* Evidence of nearby Supernovae affecting life on Earth // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012. V. 423. N. 2. P. 1234–1253. (see also: ftp://ftp2.space.dtu.dk/pub/Svensmark/MNRAS_Svensmark2012.pdf.)
- [Tanaka et al., 1977] *Tanaka T., Ishiwata S., Ishimoto C.* Critical behavior of density fluctuations in gels // *Physical Review Letters*. 1977. V. 38. P. 771–775.
- [Tinsley, Deen, 1991] *Tinsley B. A., Deen G. W.* Apparent tropospheric response to MeV...GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercold water in high-level clouds? // *J. Geophysical Research*. 1991. V. 96. N. D12. P. 22 283–22 296.
- [Veizer et al., 1999] *Veizer J., Ala D., Azmy K.* et al. (in all 15 authors). ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, δ¹³C and δ¹⁸O evolution of Phanerozoic seawater // *Chemical Geology*. 1999. V. 161. P. 59–88.
- [Voshage, Feldmann, 1979] *Voshage H., Feldmann H.* Investigations of cosmic-ray produced nuclides in iron meteorites, 3: Exposure ages, meteoroid sizes and sample depths

determined by spectrometric analyses of potassium and rare gases // Earth Planet. Sci. Lett. 1979. V. 45. P. 293–308.

[Wdowczyk, Wolfendale, 1977] *Wdowczyk J., Wolfendale A. W.* Cosmic rays and ancient catastrophes // Nature. 1977. V. 26. N. 5620. P. 510–512.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ: ПОИСК НОВЫХ ПОДХОДОВ

Л. И. Мирошниченко^{1,2}

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, Россия, e-mail: leonty@izmiran.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ МГУ) им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Биосфера Земли зародилась, развивалась и продолжает свою эволюцию при наличии постоянно действующего экологического фактора — радиационного фона ионизирующих излучений. К последним относятся, в первую очередь, естественная радиоактивность окружающей среды и космические лучи галактического и солнечного происхождения (ГКЛ и СКЛ). Поток космических лучей, приходящих из Галактики, подвержен значительным изменениям во времени и пространстве. Причиной таких изменений могут быть вспышки Сверхновых звёзд, особенно в периоды прохождения Солнца через спиральные рукава Галактики. В свою очередь, потоки СКЛ зависят от частоты и мощности вспышек на Солнце. Суммарное воздействие ГКЛ и СКЛ на околоземное пространство, в конечном счёте, сильно зависит от уровня солнечной активности (СА) в настоящее время и могло существенно зависеть от СА в далёком прошлом Земли (в эпоху «молодого Солнца»). В некоторых экспериментах последнего времени отмечаются *эффекты воздействия вторичных нейтронов от КЛ* на клеточные культуры (например, во время солнечных протонных событий в октябре 1989 г.). ГКЛ сверхвысокой энергии ($\geq 10^{15}$ эВ) с высокой вероятностью инициируют молниевые разряды в атмосфере, что, в свою очередь, способствует *образованию некоторых сложных молекул*, которые являются основными строительными «кирпичиками» для зарождения и развития жизни на Земле. В обзоре суммируются современные астрофизические данные о частоте вспышек Сверхновых, о вероятности и частоте гигантских солнечных вспышек в настоящее время и в далёком прошлом, о вариациях космических лучей в прошлом и их возможном вкладе в изменения климата и эволюцию биосферы.

ТЯЖЁЛЫЕ ЯДРА В КОСМОСЕ — ИСТОЧНИК РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ

М. И. Панасюк

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИЯФ МГУ), Москва, Россия e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru

Потоки тяжёлых ядер (ионов) в космическом пространстве, как правило, малы по сравнению с протонными и электронными и не могут вызвать заметных дозовых эффектов. Однако именно они рассматриваются как основной компонент, вызывающий так называемые одиночные сбои в микроэлектронике и локальные нарушения в биологических структурах на молекулярном уровне. Их роль среди других эффектов радиационного воздействия чрезвычайно актуальна как с точки зрения надёжности космических аппаратов, так и снижения риска длительных космических полётов человека. Но нельзя исключать и влияние протонной радиации на возникновение эффектов типа одиночных сбоев и нарушений в биологических структурах вследствие генерации ими, например, вторичных тяжёлых ядер. Ядра (ионы) в космосе имеют разные источники, подвергаются воздействию различных типов ускорения и переноса, формирующих их различные пространственно-временные и энергетические характеристики. Как правило, любой космический аппарат подвергается одновременному воздействию нескольких компонентов космической радиации. Это вызывает трудности при моделировании эффектов воздействия на наземных установках. Более того, в некоторых случаях это делает их бессмысленными. Данная статья посвящена описанию физических характеристик ионного компонента космической радиации и проблемам, связанным с их моделированием для оценки радиационного риска космических полётов.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению тяжёлых ядер в космосе, как источнику радиационной опасности для человека и создаваемой им космической электроники, возник в период первых лунных экспедиций человека. Астронавты США совершили несколько экспедиций на Луну на космических аппаратах «Аполлон». В одной из первых экспедиций американский астронавт Б. Олдрин сообщил о своих необычных ощущениях: иногда во время полёта он наблюдал яркие вспышки в глазах. Порой их частота достигала сотни в день. Именно тогда и было высказано предположение, что это явление может быть вызвано галактическими космическими лучами (ГКЛ), постоянно присутствующими в космическом пространстве. В их составе есть тяжёлые ядра — углерод, кислород, железо. Именно эти ядра, обладающие большими, чем лёгкие ядра, ионизационными потерями, и вызывают вспышки света в глазах человека. По сути, глаз человека — своеобразный детектор космического излучения, регистрирующий его отдельные, тяжёлые компоненты. В данном случае тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) вызывают фосфены в глазном яблоке.

Так началась история исследования ТЗЧ в космосе в аспекте изучения их воздействия на биологические структуры и электронику космических аппаратов.

Где в космосе встречаются тяжёлые заряженные частицы? Каковы их основные механизмы воздействия на биологические структуры и космический

аппарат? Каким образом можно защитить космический аппарат и человека, совершающего космический полёт, от неблагоприятного воздействия ТЗЧ?

Попытка ответа на данные вопросы будет сделана в данной работе.

1. О ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Тяжёлые заряженные частицы, обладая большой массой, теряют значительно больше энергии на единицу пройденного пути, чем более лёгкие частицы с той же скоростью. Вследствие этого будут проявляться только локальные, в микроскопических объёмах, повреждения биоструктур. При малых потоках ТЗЧ не следует, конечно, ожидать «дозовых» эффектов, характерных для высокоинтенсивных потоков ионизирующего излучения. Тем не менее, воздействие ТЗЧ в микрообъемах может вызвать существенные и, иногда, необратимые изменения. Одним из таких результатов воздействия являются повреждения, возникающие на клеточном уровне. Это наглядно демонстрируется результатом эксперимента, показанного на рис. 1: при одной и той же исходной дозе радиации от электронов и тяжёлых частиц число повреждённых клеток в последнем случае значительно больше. Как следствие, частота мутаций от мощности дозы при облучении ТЗЧ и гамма-излучением также разная — в первом случае больше. Как результат — необратимые генетические последствия, в том числе и канцерогенные.

ТЗЧ могут вызвать изменения в структуре ДНК. Вода — основное вещество биологических тканей — под воздействием радиации ионизируется, в результате образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК. Не исключён и сценарий прямого повреждения ДНК при торможении ТЗЧ (рис. 2). Следует отметить, что область взаимодействия ТЗЧ с веществом биоструктур, в отличие, например, от гамма-квантов, сопоставима с размерами элементов самой ДНК — структуры и клетки. Это приводит, естественно, к очень эффективному результату — локальным повреждениям.

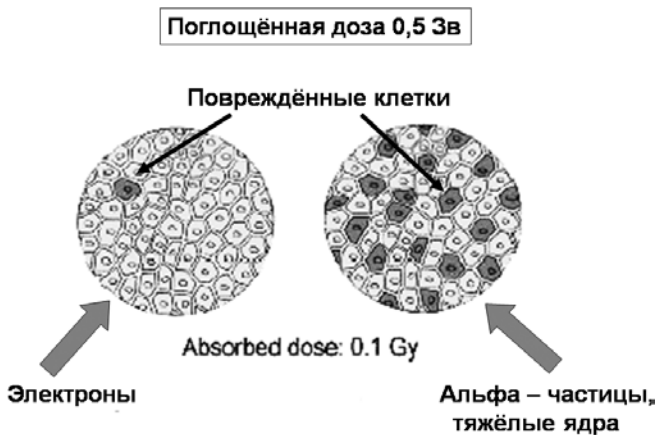


Рис. 1. Тяжелые частицы воздействуют на клетки более эффективно, чем более легкие: при одной и той же дозе радиации число поврежденных клеток при облучении тяжелыми ядрами заметно больше

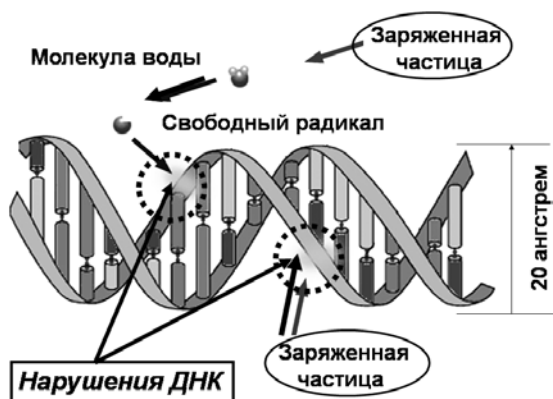


Рис. 2. Взаимодействие ТЗЧ с молекулой ДНК происходит в пределах ее линейных размеров ($\sim 20\text{\AA}$). Это может привести к нарушениям в ее структуре: либо через образование свободных радикалов, либо напрямую — путем повреждения самой молекулы

По свидетельству специалистов НАСА, у некоторых астронавтов — ветеранов длительных космических полётов наблюдались серьёзные хромосомные aberrации кровяных клеток [George et al., 2001] что может быть свидетельством начала развития канцерогенных образований. Эти образования могут и не вызвать рак, если они не будут подвержены дополнительным мутациям, но, несомненно, потенциально опасны [Cucinotta et al., 2000]. Другой пример: воздействие ТЗЧ на глаз человека могут привести к повреждению клетчатки и хрусталика [Труханов и др., 2001].

Однако надо отметить, что в самом механизме взаимодействия ТЗЧ с клеточными структурами много неясного и сама проблема в рамках радиационной биологии далека от решения. Так, например, вероятность радиационных нарушений, описанных выше, не обязательно пропорциональна общей дозе радиации. Сами aberrации разных типов по-разному соотносятся с величиной общей дозы: для одних aberrаций необходимы малые дозы, для других — значительно большие. Не вполне ясен и синергетический эффект различных видов радиации: скажем, воздействие ТЗЧ наряду с гамма-излучением, электронами. Так, например, из статьи [Труханов и др., 2001] следует, что если хрусталик глазного яблока предварительно облучить ионизирующей радиацией, развитие катарактных явлений протекает быстрее.

Биологическая эффективность ионизирующей радиации коррелирует с энерговыделением вдоль трека частицы в проходящем ею веществе. В качестве единицы измерения потерь энергии частицы обычно используется величина линейных потерь — ЛПЭ, или ЛПЭ — “linear energy transfer”. ЛПЭ — энергия, теряемая частицей на единицу длины в веществе, т. е.:

$$\text{ЛПЭ} [\text{МэВ}/(\text{мг}\cdot\text{см})^2] = \frac{dE/dx}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ — массовая плотность вещества. Видно, что ЛПЭ зависит от типа частицы, её энергии и массовых свойств самого вещества. Считается, что биологическая эффективность воздействия ТЗЧ (например, инактивация клетки) начинает увеличиваться с определённого порога, затем наступает насыщение (см., например, [Борейко, Красавин, 2011]).

Несмотря на то, что существуют факты, свидетельствующие в пользу такой интерпретации взаимодействия ионизирующей радиации с биоструктурами, следует отметить, что зависимость между ЛПЭ и биоэффективностью воздействия ТЗЧ не является простой функцией. Свидетельство тому — например, тот факт, что биоэффективность ионов с различными зарядовыми состояниями при одном и том же ЛПЭ [Cucinotta et al., 2011] — разная. Специалистами в области радиобиологии отмечается, что, в отличие от нейтронов и, скажем, альфа-частиц, ситуация по изучению эффектов воздействия на биоструктуры от высокоэнергичных ТЗЧ представляется более проблематичной. Такие данные практически просто отсутствуют, а имеющиеся относятся к экспериментам с большими дозами. Для ТЗЧ с большими значениями ЛПЭ биологическая эффективность воздействия не имеет прямой связи с ЛПЭ. Это происходит скорее всего из-за того, что ширина трека частиц в веществе зависит от скорости частиц. Поэтому частицы с разными зарядами ядер Z приводят к разному эффекту при одном и том же ЛПЭ. Так, по данным [Cucinotta et al., 2000], максимум биологической эффективности воздействия изменяется от 100 до более чем 150 кэВ/мкм при изменении от $Z=1$ (протоны) до $Z=26$ (железо). Можно констатировать, что биоэффективность воздействия от ТЗЧ на биоструктуры скорее зависит от заряда частицы Z и её энергии, чем ЛПЭ.

В этом случае становится очевидным, что «ЛПЭ — концепция» интерпретации эффектов воздействия ТЗЧ на биоструктуры не является вполне состоятельной.

В контексте изложения механизмов воздействия ТЗЧ на биоструктуры следует упомянуть и об изменении когнитивных функций высших млекопитающих при воздействии ТЗЧ [Красавин, 2012]. Причиной тому — нарушения на молекулярном уровне, изучение которых также ещё впереди.

Таким образом, краткий экскурс в данную проблему показывает, что изучение радиационного воздействия ТЗЧ на биоструктуры — на пути своего развития. Однако уже сейчас очевидно, что потенциальная опасность воздействия ТЗЧ на биоструктуры — реальность, которую нельзя не учитывать при планировании космических миссий.

2. О ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРОНИКУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Это удивительно, но подобные по своему негативному результату последствия, наблюдаемые в биоструктурах при воздействии на них ТЗЧ, обнаруживают себя и в космической электронике. Эти эффекты стали заметны при широком внедрении в бортовую электронику микросхем высокой степени интеграции. Поэтому такая проблема возникла где-то на рубеже 60–70-х гг. прошлого столетия, т. е. даже календарно её появление совпало с рождением сходной проблемы в радиационной биологии.

В качестве прямого доказательства существования эффекта негативно-го воздействия ТЗЧ на бортовую электронику можно привести результаты эксперимента на рис. 3 [Bashkirov et al, 1999]. Здесь приводится частота сбоев в микросхеме памяти, наблюдавшаяся на одном из спутников в течение ряда лет. Там же нанесена кривая солнечной активности. Налицо — высокая

корреляция между этими явлениями. В годы минимума солнечной активности, когда поток ГКЛ максимален, частота сбоев нарастает, а уменьшается в максимуме, когда поток ГКЛ — минимален. Таким образом, очевидно, что частицы ГКЛ были источником сбоев в бортовой электронике данного спутника. В результате воздействия ГКЛ на микросхему бортового компьютера КА может «зависнуть», а через некоторое время восстановиться, но иногда и окончательно выйти из строя (заметьте сходство с воздействием на биоструктуры!).

Каков же механизм образования сбоев в микросхемах под воздействием ТЗЧ?

В принятой в настоящее время терминологии — это так называемые «эффекты одиночных событий — SEE (“Single Event Effects”) или эффекты одиночных сбоев. Явления SEE могут быть классифицированы как мягкие сбои (SEU — “single effect upset”) или жёсткие. К последним относятся, например, SEL (“single effect latchup”) или эффект прогорания *p-n*-перехода SEB (“single event burnout”), а также ряд других.

SEE представляет собой эффект ионизации ТЗЧ, генерирующий трек из электронно-дырочных пар, как это показано на рис. 4. Заряд, аккумулированный на электроде, может сформировать ложный сигнал, приводящий к мягкому сбою. Дальнейший сброс или перезапись устройства приводит, как правило, к нормальному функционированию. Подобные сбои обычно наблюдаются как переходные импульсы в логических или вспомогательных цепях, а также инвертирование в элементах памяти или в регистрах. Возможны многократные одиночные сбои, в которых единичная ТЗЧ поражает два или более бита, вызывая одновременные сбои.

В отличие от «мягких», «жёсткие» сбои приводят к отказам, которые исключают возможность восстановления путём перезапуска — при этом функциональность устройств нарушается окончательно. Один из примеров — эффект «защёлки», или SEL (“single effect latchup”). SEL приводит к генерации сильных токов во время «зависания» в одном состоянии («защёлкивание»).

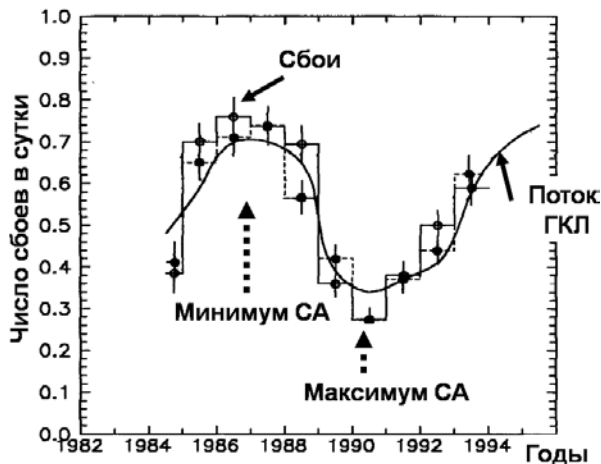


Рис. 3. Доказательство связи между изменениями потока ГКЛ и сбоями в микросхеме КА: характерная модуляция ГКЛ в течение цикла солнечной активности приводит к аналогичным изменениям частоты сбоев

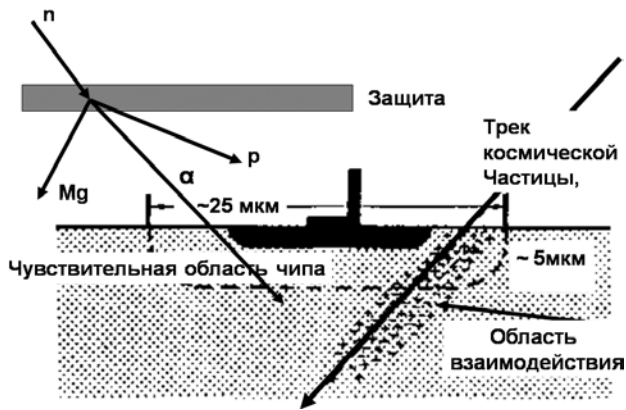


Рис. 4. Механизм формирования одиночного сбоя в микросхеме: ТЗЧ, проникая внутрь чувствительной области микросхемы, создают локальные нарушения электропроводности, что приводит к сбоям в работе устройства. Другая возможность – рождение вторичных частиц в результате взаимодействия нейтронов с конструкционными материалами КА и самой микросхемы

Состояние защелкивания может разрушить устройство, закортит напряжение на общей шине, или повредить источник электропитания. Интересно, что SEL впервые наблюдалось во время наземного испытания микросхем. Более подробно о различных типах SEE можно узнать, например, в обзорах [Чумаков, 2007, Chechenin, 2012].

Для описания SEE обычно, так же как и в радиационной биологии, используется концепция линейных потерь энергии ЛПЭ. Считается, что устойчивость устройства определяется порогом ЛПЭ, определяемым по минимуму ЛПЭ, вызывающей сбой. Зная энергетический спектр исходного космического ионизирующего излучения и преобразовав его в ЛПЭ-спектр, можно модельно оценить частоту сбоев в конкретной микросхеме с учётом её топологии и конструктивных особенностей. Этот метод оценки SEE основан на определении для микросхемы так называемой величины критического заряда — минимального аккумулированного заряда, создаваемого ионизирующей частицей в чувствительном объёме устройства и вызывающей одиночный сбой (см., например, [Kems et al., 1989]).

Таким образом, высокоэнергичная ионизирующая радиация, помимо «дозовых эффектов», — главной причины деградации полупроводниковых приборов в высокоинтенсивных полях радиации, может вызывать сбои, вызванные не объёмной, а локальной ионизацией. При этом SEE зависят от ЛПЭ. Зависимость от ЛПЭ носит пороговый характер (аналогично воздействию ТЗЧ на биоструктуры!). Судя по зависимости, представленной на рис. 5, сбои возникают при воздействии ТЗЧ, имеющих достаточно высокие значения ЛПЭ. Наихудшие микросхемы имеют порог ЛПЭ ~1...2 МэВ/(мг/см²). При более высоких значениях ЛПЭ сечение растёт и выходит на насыщение при ~40...80 МэВ/(мг/см²). Однако имеются результаты наземных испытаний ряда микросхем, демонстрирующие, что такая простая зависимость вероятности сбоев от ЛПЭ — весьма упрощённая. В реальности она более сложная, свидетельствующая о существовании «многоуровневого» порогового эффекта.

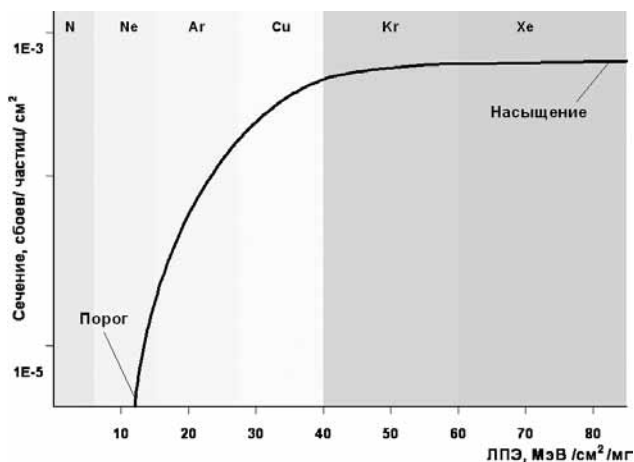


Рис. 5. Зависимость вероятности одиночных сбоев от линейных передач энергии имеет пороговый характер

ЛПЭ-концепция базируется на простейшем подходе учёта средних ионизационных потерь заряженных частиц в аморфном веществе. При этом не учитываются возможные вклады многократного рассеяния, страгглинг энергетических потерь, изменение энергии в пройденном слое мишени. Нет также учёта влияния кристаллической решётки и температуры кристалла полупроводниковых материалов интегральных схем, что может быть связано с проблемами каналирования при прохождении частицы через вещество.

Ещё больше усложняют упрощённую ЛПЭ-концепцию сбоев процессы, связанные с генерацией ядер отдач и фрагментов ядерных реакций при взаимодействии ТЗЧ с веществом. Продукты ядерных реакций, имеющие меньшие энергии, но большую массу и, следовательно, большие ЛПЭ, могут быть ответственны за косвенную — вторичную ионизацию. Другой источник нарушения концепции ЛПЭ связан с ориентационными эффектами при прохождении частиц через кристаллическую матрицу электронного устройства. Учёт этих вкладов дополнительно усложняет модельный прогноз надёжности космического аппарата в радиационных полях (более подробно см. [Чеченин и др., 2012]).

Считается, что для «наихудших» современных микросхем прямая ионизация от протонов не может создавать сбои, так как «прямая» ионизация от них ничтожна. Тем не менее, имеются данные, указывающие на возникновение одиночных сбоев при длительном воздействии лёгких частиц — протонов. При воздействии протонов на кремний сбои могут возникать за счёт ядерных реакций и от образованных ядер отдачи. При этом сечение ядерных реакций с протонами выходит на относительно постоянный уровень, начиная с 100...200 МэВ. Прямая ионизация от протонов не может создавать сбои. Ионы не могут вызвать сбои, если $E < \sim 0,4$ МэВ/нуклон, ионы O — если $E < \sim 30$ МэВ/нуклон, а ионы Si — если $E < 120$ МэВ/нуклон. Fe (и более тяжёлые ионы) могут создавать сбои при любой энергии. Конечно, при этом надо ещё учитывать, чтобы пробег ионов в микросхеме был, по крайней мере, более 10 мкм. Как увидим ниже, данные значения энергий — типичные для космической радиации.

Не исключено, что сбои могут произойти за счёт генерации вторичных продуктов ядерных реакций при взаимодействии ГКЛ с веществом, окружающим саму микросхему. Аналогичный процесс, приводящий к образованию вторичных ТЗЧ, происходит и при взаимодействии нейтронов с веществом (см. рис. 4). Кроме этого, не является очевидным, что дозовые эффекты и сбои под воздействием одиночных частиц — независимые явления. Проблема связи накопленной дозы и вероятности одиночных сбоев — неоднозначна и является актуальной. Все эти «дополнительные» факторы, очевидно, нельзя сбрасывать со счётов при оценке ресурса электроники в условиях космического полёта.

На этом завершим краткий экскурс в проблему изучения механизмов воздействия ТЗЧ на биоструктуры и электронные компоненты. Необходимо сделать очевидный вывод, что в настоящее время любые оценки одиночных сбоев в их приложениях к условиям воздействия космической радиации, полученные либо в ходе экспериментов на ускорительных установках и других, например, на лазерных, или с использованием источников радиоактивных излучений, и тем более — расчётным путём, носят оценочный характер в силу, прежде всего, ограниченности наших знаний о механизмах самого воздействия. Проблема усугубляется ещё и тем, что космический аппарат подвергается воздействию многокомпонентной космической радиации, где каждая из компонент имеет свои особенные пространственно-энергетические и временные характеристики, которые невозможно воспроизвести в условиях наземного эксперимента. Рассмотрим эти характеристики более подробно.

3. КОСМИЧЕСКАЯ РАДИАЦИЯ

3.1. Радиационные пояса Земли

Околоземное космическое пространство в плане описания радиационной обстановки является наиболее «сложным местом» в солнечной системе для её моделирования, необходимого для расчётов оценок радиационных нагрузок, в том числе и сбоев. Прежде всего потому, что здесь присутствуют одновременно компоненты ионизирующей радиации, своим происхождением связанные с действием разных источников, механизмов ускорения и транспорта. Несмотря на более чем 50-летний период исследования этой области остаётся ещё ряд «белых пятен», подлежащих дальнейшему изучению. Радиационные пояса не являются в этом плане исключением.

Радиационные пояса Земли (РПЗ) — это тороидальное образование захваченных в магнитном поле Земли заряженных частиц различного происхождения. Здесь находятся частицы солнечного происхождения — ускоренная плазма солнечного ветра и солнечные космические лучи (СКЛ), частично проникающие вглубь магнитного поля и подвергающиеся захвату (рис. 6). Галактические космические лучи вследствие значительной величины их импульса не могут быть захвачены в магнитном поле Земли, но продукты их взаимодействия с атмосферой — нейтроны — распадаясь, создают протоны и электроны, которые «наполняют» внутреннюю область РПЗ. И, наконец, частицы из ионосферы Земли — вполне реальный источник электронов и протонов, а также ионов кислорода в РПЗ.



Рис. 6. Пространственная структура радиационных поясов Земли

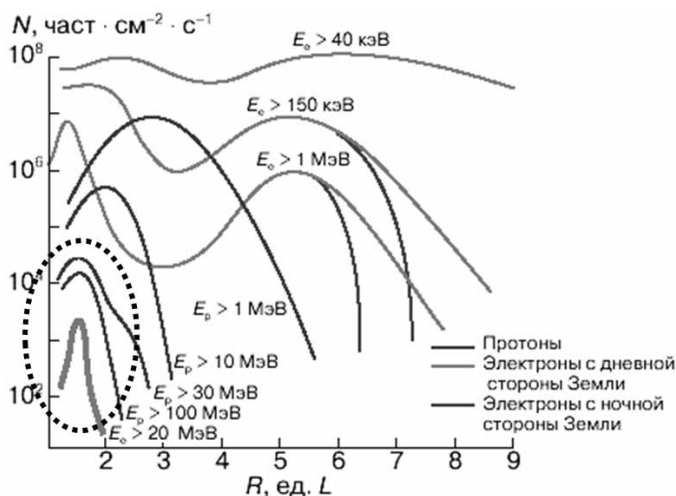


Рис. 7. Радиальные профили интенсивности электронов и протонов радиационных поясов Земли. Наиболее энергичные ионы с энергиями в десятки и сотни мегаэлектронвольт наблюдаются во внутренней зоне поясов (пунктирный овал). Именно здесь расположена область и более тяжелых ионов высоких энергий в радиационных поясах

Отличительной особенностью частиц РПЗ являются их характерные временные вариации на широкой шкале времени. Так, суббуриевые эффекты в динамике частиц РПЗ могут наблюдаться в минутно-часовом диапазоне, а солнечно-циклические — с периодом в несколько лет и более.

В рамках данной работы интерес для нас представляют ТЗЧ, обладающие достаточными ЛПЭ, способные вызвать сбои и нарушения как в биоструктурах, так и в электронике космических аппаратов.

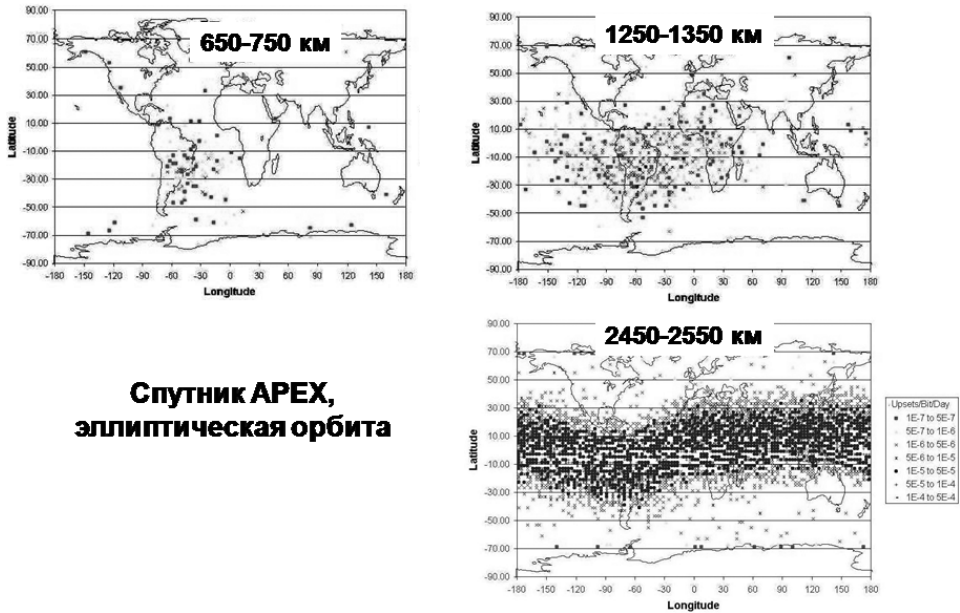
Область локализации таких частиц — во внутренней зоне РПЗ (рис. 7). Почему? Известно, что источник большей части частиц РПЗ находится вблизи их внешней границы, в районе орбит геостационарных КА, на расстояниях 6...7 радиусов Земли (R_z). Частицы от различных источников (солнечного ветра, ионосферы) посредством механизма радиационной диффузии перемещаются внутрь РПЗ под действием флуктуаций электрических и магнитных

полей, подвергаясь одновременному ускорению. Как результат, на внутренних магнитных оболочках (на расстояниях в плоскости экватора $<2R_3$) происходит формирование очень энергичного ионного пояса, состоящего из тех частиц, которые присутствуют в солнечном ветре и ионосфере. Энергия захваченных протонов в этой области может достигать ~ 1 ГэВ, т.е. сопоставима с энергией ГКЛ. Тем не менее, радиальная диффузия не может быть доминантным механизмом формирования протонов и ТЗЧ во внутренней зоне РПЗ в силу, прежде всего, малого времени их жизни относительно ионизационных потерь. Механизм распада нейтронов альбеда, возникающих при взаимодействии ГКЛ с атмосферой, является дополнительным и мощным источником протонов в области высоких энергий в этой части пространства. Более тяжёлые частицы возникают здесь как продукты ядерных реакций — результат взаимодействия первичных протонов ГКЛ и протонов внутренней зоны РПЗ с атмосферой Земли.

Следует констатировать, что наши знания о химическом составе ионной компоненты РПЗ внутренней зоны РТВ крайне ограничены. Это связано с экспериментальными трудностями проведения измерений в этой области околоземного пространства. Потоки высокоэнергичных протонов (с энергиями более десятков мегаэлектронвольт) здесь настолько велики, что «мёртвое время» любой электроники накладывает ограничения на возможность измерений значительно меньших потоков более тяжёлых ионов. Тем не менее, существуют модельные расчёты транспорта ионов в РПЗ, которые показывают реальную возможность существования захваченных энергичных ионов — ТЗЧ в этой области.

Из данного рассмотрения структуры РПЗ очевидно, что источником сбоев и нарушений в РПЗ являются ТЗЧ, захваченные в их внутренних областях. Отсюда вывод, что КА с высотой орбит от нескольких тысяч километров и ниже — наиболее опасны к воздействию ТЗЧ. Причём следует отметить, что эта область опасна как с точки зрения возникновения нежелательных дозовых эффектов вследствие высокоинтенсивных потоков протонного пояса, так собственно и генерации эффектов одиночных сбоев и нарушений под воздействием мало интенсивной тяжёлой ионной компоненты РПЗ. О трудностях интерпретации результатов совместного действия обоих механизмов воздействия отмечалось выше, в разд. 1.

К настоящему времени накоплено большое число экспериментальных данных — прямых измерений сбоев электроники на КА, не ставящих под сомнение их возникновение во внутренней зоне РПЗ (см., например, [Poivey et al., 2002]). При этом высокая зависимость частоты сбоев характеризуется ярко выраженной ограниченной пространственной структурой (рис. 8) — с уменьшением высоты орбиты КА сбои начинают локализоваться в пределах сравнительно узкой географической зоны над Южной Атлантикой. Это — так называемая Южно-Атлантическая магнитная аномалия (ЮАА) — область локального ослабления магнитного поля Земли вследствие, вероятно, «нецентрального» расположения его источника поля внутри планеты. Как результат ослабления магнитного поля, магнитные силовые линии в этой области «провисают» над поверхностью Земли, «опуская» при этом траектории захваченных частиц РПЗ. Для низкоорбитальных КА (например, — МКС, высота орбиты которой ~ 350 км) это — наиболее опасный радиационный участок их траектории.



**Спутник АРЕХ,
эллиптическая орбита**

Рис. 8. Высотная зависимость одиночных сбоев микросхем Hitachi 628128 по данным эксперимента АРЕХ/CRUX

Именно здесь, как это следует из данных КА АРЕХ и др., наблюдается наибольшее количество сбоев электроники. По свидетельству многих космонавтов именно в этой области частота фосфенов в глазах превышает наблюдаемые на других участках орбиты пилотируемых орбитальных станций.

Очевидно, что источником этих сбоев и фосфенов являются ТЗЧ, захваченные в РПЗ. Не исключено, что и высокоинтенсивные потоки протонов ЮАА также создают эти явления. Прежде всего, они должны возникать как следствие взаимодействия продуктов ядерных реакций с участием протонов с материалом КА, расположенным вокруг микросхемы (см. выше, разд. 1).

В связи с рассмотрением ЮАА как источника радиационной опасности для низкоорбитальных КА следует отметить характерные для этой области пространственно-временные вариации, связанные как с солнечным циклом, так и вековыми вариациями главного магнитного поля Земли.

Солнечно-циклические вариации потоков частиц в ЮАА (и на высотах <math><1000\text{ км}</math>) связаны с вариациями ионизационных потерь частиц вследствие нагрева и охлаждения верхней атмосферы в течение 11-летнего цикла солнечной активности [Башкиров и др., 1998; Кузнецов и др., 2010; Huston et al., 1998]. На рис. 9 представлены такие примеры вариаций протонных потоков: во время солнечного минимума потоки увеличиваются, что должно приводить к увеличению частоты сбоев. Обратная картина будет наблюдаться в солнечном максимуме: в это время плотность атмосферы на больших высотах увеличивается, вызывая рост потерь частиц и, соответственно, уменьшение потоков захваченных частиц, в том числе, конечно, и ТЗЧ. Поэтому можно ожидать, что в максимуме цикла солнечной активности частота сбоев работы электроники в районе ЮАА и количество фосфенов в глазах космонавтов должно быть меньше.

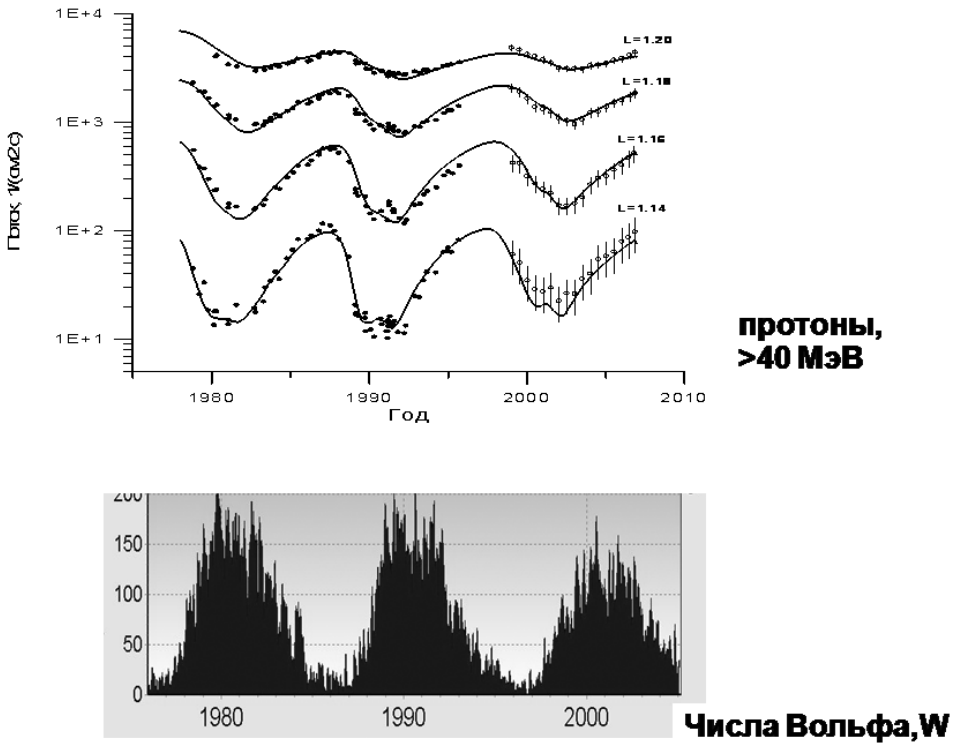


Рис. 9. Солнечно-циклические вариации потоков протонов на малых высотах, вызванные изменениями плотности атмосферы

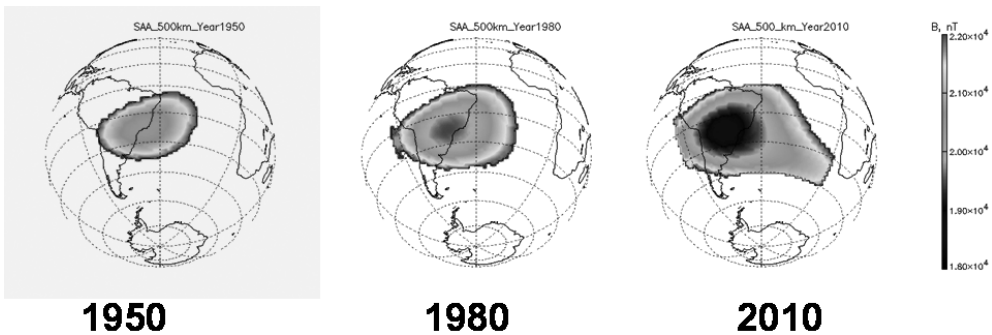


Рис. 10. Модельные вековые вариации пространственной структуры ЮАА вследствие изменения главного магнитного поля Земли

Топология ЮАА должна меняться вследствие существования вариаций главного магнитного поля Земли. Как показывают расчёты [Башкиров и др., 1998], на шкале времени десятки лет и более область ЮАА должна расширяться и смещаться к западу (рис. 10). **Некоторые экспериментальные данные** на возможность такой динамики были представлены в [Budhwar, 1997; Grigoryan et al., 2008; Yukutake, Tachinaka, 1962]. **Таким образом, можно ожидать, что в перспективе ЮАА будет представлять большую радиационную опасность, чем в настоящее время.**

3.2. Солнечные космические лучи

Солнечные космические лучи генерируются в активных областях Солнца — непосредственно во вспышечных областях посредством, например, механизма пересоединения (см., например, [Somov, 2012]) или в межпланетной среде на фронтах ударных волн, распространяющихся в межпланетном пространстве корональных инъекций масс (СМЕ — **Coronal Mass Ejection**), при стохастическом механизме типа Ферми (см., например, [Ellisson, 1985]). Помимо протонов, в составе СКЛ присутствуют и более тяжёлые ионы. В рамках данного обзора нас интересуют прежде всего ТЗЧ с энергиями в десятки и сотни мегаэлектронвольт на нуклон, поэтому ниже рассмотрим имеющиеся экспериментальные данные, относящиеся именно к этому энергетическому диапазону.

Наиболее полные обзоры экспериментальных данных по химическому составу СКЛ можно найти, например, в работах [Ныммик, 2011; Mewaldt et al., 2007; Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008], которые, на наш взгляд, противоречивы. Так, из анализа экспериментальных данных, представленных в [Mewaldt et al., 2007], следует, что в ряде событий СКЛ наблюдается обогащение состава ядрами Fe по сравнению с другими ядрами при достаточно больших энергиях (>30 МэВ/нуклон). Такое обогащение наблюдается не всегда, оно было замечено для периода 1997–2005 гг., но не для более поздних. По данным работы [Ныммик, 2011] отношения величин спектральных индексов тяжёлых ионов СКЛ к спектральным индексам протонов «не является постоянным, а испытывают значительные флуктуации, величина которых для всех тяжёлых ионов одинакова». Кроме этого отмечено, что индексы энергетических спектров по импульсу на нуклон одинаковы для всех тяжёлых ионов и несколько больше, чем спектральные индексы протонов. Последнее означает, что относительное содержание тяжёлых ионов уменьшается с ростом энергии.

На наш взгляд, для выявления особенностей в энергетических спектрах различных ионов более правильным было бы сравнивать их не в представлении энергетической шкалы в единицах энергия на нуклон или импульса, а в представлении полной энергии, т.е. энергии на частицу, и с соответствующим для исчерпывающего анализа масштабированием шкалы потока.

В качестве примера можно привести результат, представленный на рис. 11 [Ныммик, 2012] — усреднённый спектр СКЛ по нескольким мощным событиям в представлении полной энергии. Из него следует совершенно очевидное указание на возрастание обогащения тяжёлыми ионами состава СКЛ с ростом полной энергии при условии аппроксимации протонного спектра в сторону больших энергий с показателем наклона, характерного для более низкоэнергичного компонента. Однако важно подчеркнуть, что область энергий более сотен мегаэлектронвольт — пока «белое пятно» для прямых измерений протонов на КА. Этот энергетический диапазон может быть «перекрыт» нейтронными мониторами, что и делается для оценки максимальной энергии инжектируемых во время вспышек солнечных частиц. Но следует принять во внимание, что данные нейтронных мониторов не могут дать независимых от модельных представлений оценок относительного содержания ионов в этом диапазоне энергий.

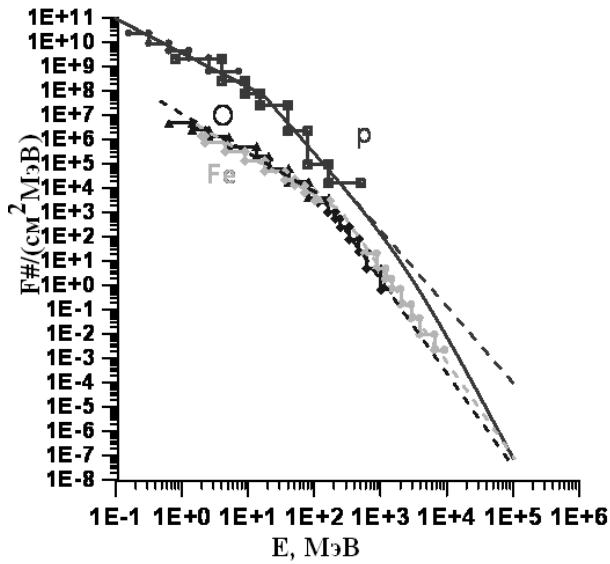


Рис. 11. Усредненные по нескольким мощным событиям энергетические спектры протонов, ионов кислорода и железа с соответствующими интерполяциями к большим энергиям

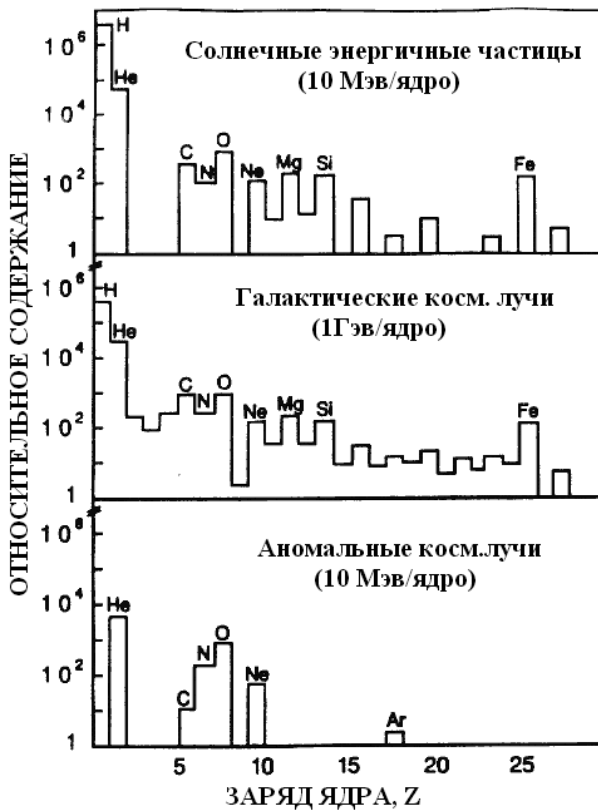


Рис. 12. Химический состав галактических и солнечных космических лучей

Если же обратиться к теории генерации СКЛ, то, следуя стохастическому механизму типа Ферми, следует ожидать, что максимальная энергия частиц, генерируемая во время активных процессов E_{\max} , пропорциональна заряду ядер Z , т.е. относительное содержание тяжёлых ионов по мере приближения к предельной энергии ускорения должно увеличиваться. Именно так и происходит, например, при ускорении ГКЛ на остатках взрывов сверхновых звёзд в районе «колена» — изменения показателя наклона энергетического спектра ($10^{15} \dots 10^{17}$ эВ). В этом диапазоне энергий наблюдается очевидное обогащение состава ГКЛ тяжёлыми ядрами. Очевидно, что аналогичный механизм ускорения должен действовать и для частиц, имеющих солнечное происхождение.

Для СКЛ предел ускорения по энергии может быть достигнут за счёт последовательного действия импульсивного механизма — процесса пересоединения в активной области (см., например, [Somov, 2012]) и следующего за ним стохастического ускорения частиц на ударных волнах СМЕ, распространяющихся уже в межпланетной среде (см., например, [Ellison, Ramaty, 1985]). Следует отметить, что согласно данным мюонных подземных телескопов, максимальная энергия ускоренных протонов во время GLE может достигать 100...200 ГэВ [Sarabhai, 1956], т.е. фактически достигать энергии ГКЛ в максимуме из потока (рис. 12). Если это так, то можно ожидать, что при развитии на Солнце мощных солнечных событий (типа GLE — Ground Level Enhancement), поток тяжёлых ионов в составе СКЛ на «хвосте» энергетического распределения может превысить (при равных энергиях) протонный (см. рис. 11). В этом случае значения потоков ТЗЧ, используемые в современных моделях СКЛ как основа для расчётов сбоев, следует считать как не соответствующие реальным космическим условиям. Этот вывод относится к энергиям более сотен мегаэлектронвольт.

Рассмотрим теперь некоторые особенности характеристик наиболее энергичных частиц в нашей Солнечной системе — ГКЛ.

3.3. Галактические космические лучи и относительный радиационный риск от солнечных и галактических космических лучей

Относительное содержание тяжёлых частиц в составе ГКЛ сходно с СКЛ (рис. 13). Максимум интенсивности этих частиц приходится на диапазон энергий 300...500 МэВ/нуклон (см. рис. 12). Прежде всего, именно эти частицы и представляют опасность возникновения сбоев в электронике и повреждений в биоструктурах.

Важной особенностью ГКЛ является их постоянное присутствие в космическом пространстве с характерной модуляцией потока в течение солнечного цикла (рис. 14). Существующая модель ГКЛ, адекватно описывающая временные характеристики потоков частиц в зависимости от параметра солнечной активности — числа W , представлена в виде международного стандарта [International Standard..., 2004] и используется при расчётах частоты сбоев в микросхемах. Один из таких примеров приведён на рис. 3. Как указывалось выше (см. введение), ТЗЧ ГКЛ представляют особую опасность для **длительных** межпланетных миссий в силу именно их постоянного присутствия в космосе. В этом плане важен модельный учёт модуляции ГКЛ для правильных инженерных расчётов сбоев, позволяющий выбрать оптимальный временной интервал для осуществления космических миссий.

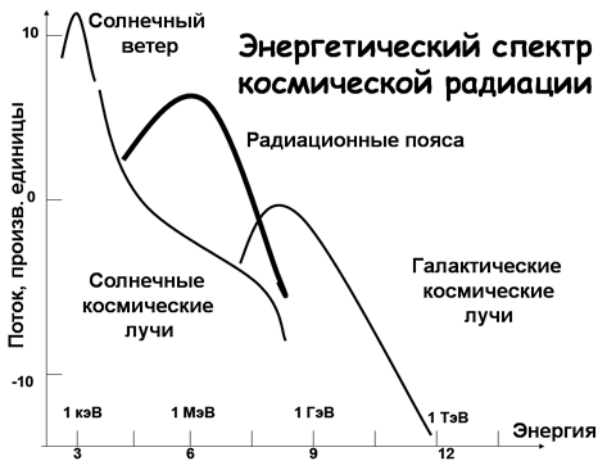


Рис. 13. Энергетические спектры протонов солнечной плазмы, солнечных космических лучей, частиц радиационных поясов Земли и галактических космических лучей (качественное представление в произвольной шкале потоков)

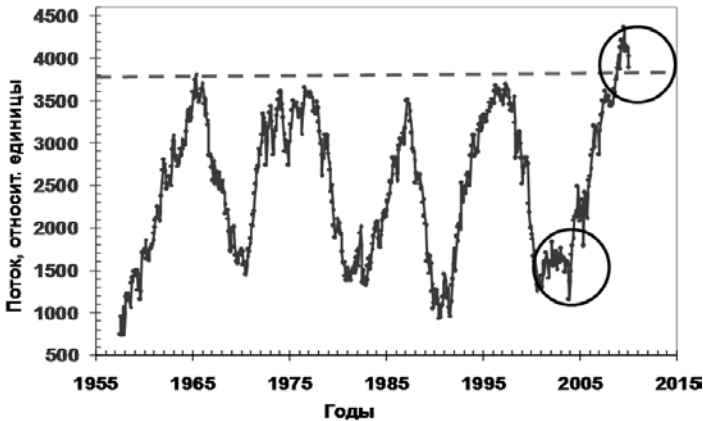


Рис. 14. Модуляция галактических космических лучей: в период 2001–2010 гг. наблюдалась аномальная вариация ГКЛ, не учитываемая в существующих моделях

Очевидно, что оптимальным с точки зрения минимизации частоты сбоев от воздействия ТЗЧ ГКЛ является интервал времени, относящийся к максимуму солнечной активности. Долговременное непрерывное наблюдение ГКЛ в атмосфере Земли (начиная с 1957 г.) позволяет оценить максимальную частоту сбоев и смоделировать эксперименты на наземных ускорителях по изучению воздействия ТЗЧ на биоструктуры. Однако корректная оценка эффекта воздействия ТЗЧ сталкивается с трудностями прогностического характера, не описываемыми в существующих моделях. Так, например, в последнем десятилетии наблюдался аномально длительный период мощной солнечной активности с 2005 по 2010 г. Последствия этого аномального минимума — относительно продолжительное (1...2 года) превышение потоков ГКЛ над максимальным уровнем (начиная с 1957 г., пик на рис. 14), наблюдавшееся в 2009–2010 гг. [Стожков, частное сообщение, 2011].

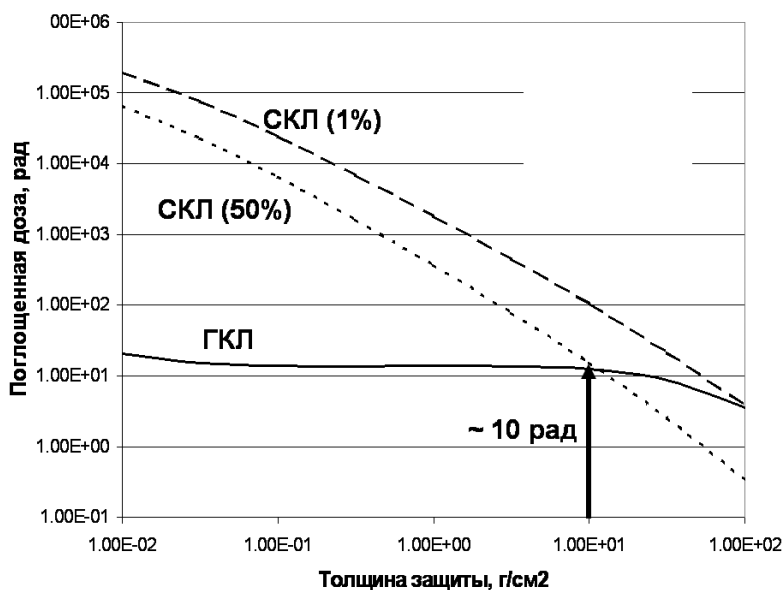


Рис. 15. Модельные дозы радиации для марсианской экспедиции под различными защитами (см. текст)

Кроме того, на этой фазе солнечной активности наблюдался её продолжительный пик. Как результат — аномально низкий поток ГКЛ в период 2001–2005 гг. Очевидно, что такие экстремальные периоды необходимо учитывать в модельных оценках и наземных экспериментах.

Ещё одна проблема существует для корректной оценки степени радиационной опасности таких компонентов космической радиации как ГКЛ и СКЛ: какова относительная степень радиационной опасности каждого из них?

Для решения этой проблемы разрабатываются и применяются модели соответствующих радиационных полей. Что касается модели ГКЛ — опубликован международный стандарт ISO (Международная организация стандартизации) [International Standard..., 2004] — результат консенсуса между специалистами, работающими в этой области. В существующих же моделях СКЛ различных групп применяются различные подходы, приводящие к разным прогностическим оценкам потоков СКЛ. Так, разрабатываемая в МГУ вероятностная модель СКЛ [International Standard..., 2004] (для протонов и более тяжёлых ионов) приводит к следующим оценкам радиационных доз по сравнению с моделями ГКЛ и РПЗ. Так, например, для до толщин защит вплоть до ~ 10 г/см² (2,7 см алюминия) на орбите МКС доминируют радиационные поглощённые дозы, создаваемые частицами РПЗ и СКЛ, а при более толстых защитах — РПЗ и ГКЛ. Для межпланетной миссии Земля – Марс в СКЛ также играют существенную роль: радиационная нагрузка от СКЛ больше, чем от ГКЛ, вплоть до достаточно толстых защит 10...30 г/см² (рис. 15). Отличие моделей СКЛ не может не сказаться на оценках радиационного риска.

В работе [Кузнецов и др., 2012] представлены оценки среднетканевой эквивалентной дозы (D) для СКЛ и ГКЛ для межпланетных условий, из которых следует, что при максимуме солнечной активности годовая величина $D_{\text{СКЛ}} > D_{\text{ГКЛ}}$ (при вероятности протонных солнечных событий 1 %) для толщин

защиты вплоть до ~ 30 г/см², а в минимуме — до ~ 10 г/см². Это означает, что при уровне радиационного риска 3 % прогнозируемая длительность пребывания человека на поверхности Луны не должна превышать 1,5 мес во время максимума СА и 1 года во время минимума. Противоположный результат получен в работе [Kim et al., 2009]: **в солнечном максимуме допустимая продолжительность пребывания человека на Луне превышает величину для минимума СА (210 дней по сравнению с 90 днями).**

Такие столь противоречивые выводы базируются на разных подходах статистических описаний высокоэнергичного участка спектра СКЛ: в модели [ГОСТ..., 2001] «хвосты» спектров СКЛ более жёсткие, чем в других моделях, например, в модели [Kim et al., 2009] или [Feynman et al., 1993]. Очевидно, что эффект воздействия ТЗЧ/СКЛ на электронику и биоструктуры будет максимальным в периоды наибольшей вспышечной активности на Солнце. Расчётная величина частоты сбоев должна увеличиться с учётом обогащения ТЗЧ состава СКЛ в высокоэнергичной части энергетических распределений (см. разд. 3.2). В силу этого «интегральный» радиационный риск космических полётов («дозовый риск» плюс риск от «сбоев») может быть ещё более значительным, чем это предполагается в современных расчётах. Однако для окончательных выводов требуются, прежде всего, новые экспериментальные результаты, относящиеся к высокоэнергичной части ТЗЧ/СКЛ вблизи предела их ускорения.

3.4. Вторичные частицы в космическом пространстве

3.4.1. Околосемные орбиты

Однако не только протоны и более тяжёлые ядра — источники сбоев на низких орбитах, в частности на орбите МКС. Как отмечалось выше, ТЗЧ могут возникнуть в результате ядерных реакций в веществе, окружающем микросхему. Вторичные нейтроны, возникающие при взаимодействии первичных ГКЛ с окружающим веществом, могут создать тяжёлые ядра, которые, в свою очередь, и станут источниками сбоев в электронике или нарушений в биоструктурах. В реальности ситуация с нейтронным полем ещё более сложная.

Источниками нейтронов в окружении КА могут стать и ГКЛ, взаимодействующие с атмосферой Земли, которые генерируют потоки альбедных нейтронов, приходящие от Земли, а также солнечные нейтроны во время очень мощных событий на Солнце (рис. 16). Последнее происходит достаточно редко, но экспериментальные доказательства прихода солнечных нейтронов на низкие орбиты (<500 км) имеются (см., например, [Kuznetsov et al., 2004]). Таким образом, на низких околосемных орбитах космический аппарат подвергается воздействию нейтронных полей различного происхождения: локальных нейтронов, возникающих в результате взаимодействия ГКЛ с веществом КА, альбедных нейтронов, рождающихся при взаимодействии ГКЛ с атмосферой, и солнечных нейтронов. Поток локальных нейтронов существенно зависит от массы самого КА [Vogomolov et al., 2000]: чем больше его масса, тем больше поток локальных нейтронов (рис. 17). **Отсюда следует важный вывод: МКС и другие пилотируемые КА для лунных и планетных миссий, обладающие значительными массами, — мощный источник нейтронов.** Достаточно привести следующий результат: до 30 % от общей дозы радиации

внутри орбитальной станции «Мир» приходился на локальные нейтроны [Bogomolov et al., 2000].

Для межпланетных миссий роль локальных нейтронов становится ещё более существенной: в течение длительного полёта КА подвергается непрерывной бомбардировке ГКЛ, поэтому нейтронный фон — основной источник накопленной радиационной дозы, которая становится очень существенной вследствие большой продолжительности полёта. Её величина, помимо времени полёта, зависит от массы КА, а так как ожидаемая масса пилотируемого КА для, например, марсианских миссий — это десятки и более тонн, то поток вторичных нейтронов ожидается весьма большим.

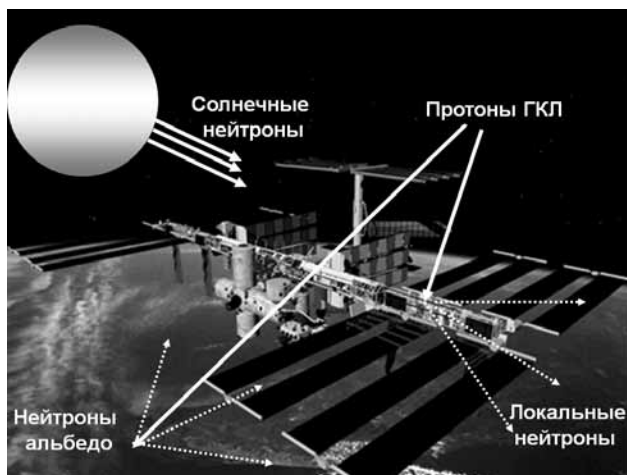


Рис. 16. Создание нейтронных полей различной природы на околоземных орбитах: нейтроны солнечного происхождения; локальные нейтроны, генерируемые в результате взаимодействия ГКЛ с веществом КА, а также альбедные нейтроны — результат взаимодействия ГКЛ с атмосферой

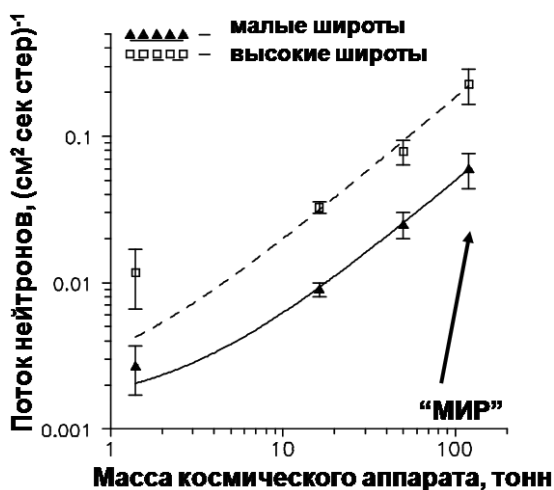


Рис. 17. Зависимость потока локальных нейтронов от массы КА на низких и средних широтах: с увеличением массы КА поток нейтронов увеличивается

3.4.2. Поверхность Луны и Марса

Для посадочных модулей и долговременных станций на поверхности Луны и Марса в расчётах нейтронного фона следует учитывать как свойства самого грунта, так и наличие (отсутствие) атмосферы. На рис. 18 можно видеть отличие энергетического спектра вторичных нейтронов, рождённых в атмосфере Земли и Марса, а также от реголита Луны, вокруг которой нет атмосферы. У Земли и у Марса спектр атмосферных нейтронов более жёсткий, чем на Луне. Присутствие нейтронов с энергиями более 1000 МэВ, очевидно, чрезвычайно важно для оценки частоты сбоев и повреждений в биоструктурах вследствие роста сечения ядерных реакций с ростом энергии, которые создают потоки вторичных ТЗЧ.

Следует подчеркнуть, что вторичные, локальные нейтроны, — не единственный источник радиационной опасности в плане генерации сбоев и повреждений в биоструктурах. Выше мы видели, что локальные повреждения могут создаваться и протонами. Последние могут генерироваться при взаимодействии ГКЛ с лунным и марсианским грунтом, причём зависимость от толщины грунта для вторичных протонов и нейтронов должна быть разной: в отличие от протонов с ростом толщины грунта поток нейтронов должен возрастать (до определённой толщины), в то время как поток протонов — уменьшаться. Это подтверждается расчётами, выполненными в работах [Кузнецов и др., 2012; Denisov et al., 2011] и приведёнными на рис. 19.

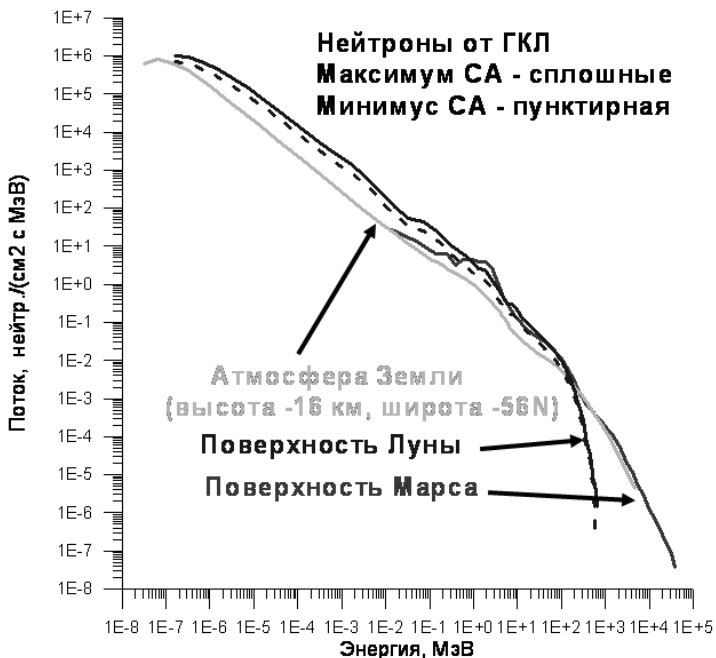


Рис. 18. Потоки нейтронов, созданные ГКЛ в результате их взаимодействия с поверхностью Луны, а также с атмосферами Земли и Марса. Спектр вторичных нейтронов значительно более жесткий для Земли и Марса из-за наличия атмосфер у этих планет (для максимума (сплошные линии) и минимума (пунктирные линии) солнечной активности)

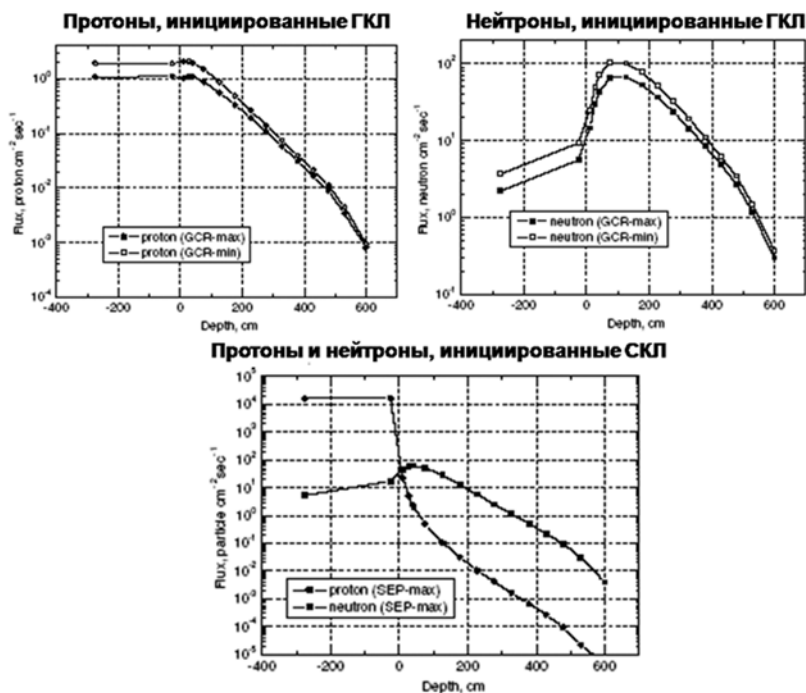


Рис. 19. Генерация вторичных протонов и нейтронов в лунном грунте.
Для нейтронов максимум потока наблюдается на глубине ~1,5 м

Так, для нейтронов максимум генерации находится на глубине ~1,5 м лунного реголита. Отсюда следует вывод, что при создании как «поверхностных», так и «подповерхностных» станций обитания человека на Луне и Марсе требуется тщательный расчёт радиационных полей различной природы.

В заключение данного раздела следует отметить, что источником вторичных частиц на Луне и Марсе являются не только ГКЛ. СКЛ — очевидный источник вторичной радиации для этих объектов Солнечной системы, имеющих очень слабые (Марс) или не имеющих вообще магнитных полей (Луна), способных отклонить потоки солнечных частиц во время вспышек и СМЕ. О трудностях модельного описания СКЛ было отмечено в разд. 3.2 и 3.3.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе приведённого выше анализа существующих проблем как в области изучения механизмов взаимодействия ТЗЧ с полупроводниковыми и биологическими структурами, а также пространственно-временных и энергетических распределений этого компонента космической радиации, можно сформулировать следующие выводы.

1. На сегодня не все физические процессы взаимодействия ТЗЧ с полупроводниковыми структурами космической электроники поддаются количественным оценкам. Это же относится и к воздействию ТЗЧ на биоструктуры. Совокупность двух этих факторов и каждый из них в отдельности занижают оценку радиационного риска космических полётов.

2. Физические характеристики ТЗЧ, присутствующие в радиационных поясах Земли и СКЛ, недостаточно изучены. Прежде всего, это касается тяжёлых высокоэнергичных ядер в районе ЮАА и «хвоста» энергетических распределений СКЛ во время мощных солнечных событий, генерирующих частицы вплоть до энергий в сотни МэВ/нуклон и более. Неправильные оценки потоков этих частиц будут приводить к искажению расчётных значений сбоев в микросхемах и повреждений в биоструктурах.

В силу этого можно констатировать, что проблема ТЗЧ для космических исследований требует времени для её завершения на уровне, необходимом для обеспечения приемлемого радиационного риска планируемых длительных космических миссий.

Возникает вопрос: как минимизировать риск от ТЗЧ в современных условиях? Можно рассмотреть следующие рекомендации, которые, конечно, необходимо уточнять по мере накопления наших знаний.

1. **Электроника.** Следует признать, что применяемая в настоящее время практика квалификационных тестов электронных компонентов не оказывает существенного влияния на снижение радиационного риска, связанного с воздействием ТЗЧ. Такие тесты лишь позволяют оценить вероятность сбоев в конкретной микросхеме, но не минимизировать её. Проблема усугубляется невозможностью моделирования космических радиационных условий на наземных ускорительных установках.

Для того чтобы минимизировать частоту сбоев под воздействием космической радиации — снизить радиационный риск, — необходимо проводить радиационное тестирование на стадии *разработки* микросхем, а не тестирование готовых изделий. Применение специальных конструкционных материалов, схем резервирования и программного обеспечения вместе с радиационным тестированием на стадии разработки — реальный путь к минимизации сбоев и снижению радиационного риска в космической электронике. Сложный характер космической радиации, прежде всего — её многокомпонентный состав, ставит вопрос о необходимости проведения космических тестов электроники для адекватной оценки радиационных рисков.

2. **Биоструктуры.** По естественным причинам, то, что можно сделать для электроники, невозможно для биоструктур. Вряд ли возможно скорректировать — изменить структуру, скажем, ДНК, сделав её нечувствительной к ТЗЧ. Здесь применим только путь исследования механизмов воздействия ТЗЧ на биоструктуры и оценка возможных рисков при воздействии определённых видов частиц на конкретные биоструктуры.

Учитывая вышесказанное, наиболее оптимальным и эффективным способом минимизации риска воздействия ТЗЧ представляется *оптимизация планирования* космических миссий, которая должна включать следующее.

1. Запрет и ограничение проведения ответственных операций на борту КА в местах и во время попадания КА в поле ТЗЧ. Например: ЮАА — наиболее опасное место, где эффективность воздействия велика по сравнению с другими географическими зонами. Следовательно, любые ответственные операции (корректировка орбиты, выход человека в космос и др.) в этом районе должны быть исключены. То же относится и к периодам мощных солнечных вспышек. Для околоземных орбит в местах, где наблюдается проникновение СКЛ (например, полярные и авроральные области), ответственные операции также должны быть исключены.

2. Для человека, вероятно, должны быть установлены максимальные временные пределы космического полёта. Очевидно, они должны быть разными для околоземных орбит, для межпланетных перелётов и нахождения на поверхности Луны и Марса. Именно *время* — эффективная защита биоструктур от воздействия ТЗЧ в условиях космического полёта.

Благодарности. Автор благодарит организаторов конференции «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле» и лично Т. К. Бреус за возможность представить доклад. Автор благодарит М. А. Островского, Е. А. Красавина, Р. А. Ныммика, Н. В. Кузнецова и Н. Г. Чеченина за полезные дискуссии при подготовке доклада.

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

- [Башкиров и др., 1998] Башкиров В. Ф., Тельцов М. В., Панасюк М. И. Динамические модели захваченной радиации на малых высотах в магнитосфере // Космич. исслед. 1998. Т. 36. № 4. С. 356–368.
- [Борейко, Красавин, 2011] Борейко А. В., Красавин Е. А. Мутагенное действие ускоренных ионов на бактериальные клетки // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2011. Т. 42. Вып. 2.
- [ГОСТ..., 2001] ГОСТ Р 25645. 165-2001. Лучи солнечные космические. Вероятностная модель потоков протонов. 2001.
- [Красавин, 2012] Красавин Е. А. Радиобиологические исследования на ускорителях ОИЯИ: докл. // Выездная сессия Бюро отделения физиологии и фундаментальной медицины РАН. 27–28 июня 2012.
- [Кузнецов и др., 2010] Кузнецов Н. В., Николаева Н. И., Панасюк М. И. Вариация потока захваченных протонов во внутреннем радиационном поясе Земли в зависимости от солнечной активности // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 1. С. 81–86.
- [Кузнецов и др., 2012] Кузнецов Н. В., Ныммик Р. А., Панасюк М. И., Денисов А. Н., Соболевский Н. М. Оценка радиационного риска для космонавтов на Луне // Космич. исслед. 2012. Т. 50. № 3. С. 224–228; Cosmic Research. 2012. V. 50. N. 3. P. 216–220. © Pleiades Publishing, Ltd., 2012. ISSN 0010_9525, Cosmic Research, 2012, Vol. 50, No. 3, 216–220.
- [Ныммик, 2011] Ныммик Р. А. К вопросу об особенностях химического состава солнечных космических лучей // Космич. исслед.. 2011. Т. 49. № 2. С. 1–7.
- [Труханов и др., 2001] Труханов К. А., Бриндикова Т. А., Зак П. П., Лебедев В. М., Спаский А. В., Федорович И. Б., Островский М. А. Действие тяжелых заряженных частиц на родопсин и изолированную сетчатку глаза // Докл. Акад. наук. 2001. Т. 377. № 5. С. 715–717.
- [Чумаков, 2007] Чумаков А. И. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов // Модель космоса. Т. 2 / Под ред. Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. С. 494–518.
- [Badhwar, 1997] Badhwar G. D. Drift rate of the South Atlantic Anomaly // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. N. A2. P. 2343–2349.
- [Bashkirov et al., 1999] Bashkirov V., Kuznetsov N., Nymmik R. An analysis of the SEU rate of microcircuits exposed by the various components of space radiation // Radiation Measurements. 1999. V. 30. N. 3. P. 427–433.

- [Bogomolov et al., 2000] *Bogomolov A. V., Dementyev A. V., Kudryavtsev M. I., Myagkova I. N., Ryumin S. P., Svertilov S. I., Sobolevsky N. M.* Fluxes and Energy Spectra of Secondary Neutrons with Energies >20 MeV as Measured by the MIR Orbital Station, the SALY-UT-7-KOSMOS-1686 Orbital Complex, and the KORONAS-I Satellite: Comparison of Experimental Data and Model Calculations // *Cosmic Research*. 2000. V. 38. N. 1. P. 28.
- [Chechenin et al., 2012] *Chechenin N. G., Kadenskii A. G., Motaweh G. H., Panasyuk M. I.* Impact of High-Energy Cosmic-Ray Protons and Ions on the Elements of Spacecraft On-Board Devices // *J. Surface Investigation. X ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2012. V. 6. N. 2. P. 303–313.
- [Cucinotta et al., 2000] *Cucinotta F. A., Nikjoo H., Goodhead D. T.* Model of the Radial Distribution of Energy Imparted in Nanometer Volumes From HZE Particle // *Radiation Research*. 2000. V. 153. P. 459–468.
- [Cucinotta et al., 2011] *Cucinotta F. A., Hu S., Shwadron N. A.* Space radiation Cancer Risk Projections and Uncertainties-2010. 2011, NASA/TP-2011-216155.
- [Denisov et al., 2011] *Denisov A. N., Kuznetsov N. V., Nymmik R. A., Panasyuk M. I., Sobolevsky N. M.* Assessment of the Radiation Environment on the Moon // *Acta Astronautica*. 2011. V. 68. P. 1440–1447.
- [Ellison, Ramaty, 1985] *Ellison D. C., Ramaty R.* Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // *Astrophysical J.* 1985. V. 298. P. 400–408.
- [Feynman et al., 1993] *Feynman J., Spitalo G., Wang J., Gabriel S.* Interplanetary fluence model: JPL 1991 // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. P. 13281–13294.
- [From H to Fe, 2007] *From H to Fe* // *Space Sciences Rev.* 2007. V. 130. P. 323–328.
- [Geopge et al., 2001] *Geopge R. et al.* Chromosome aberrations in the blood lymphocytes of astronauts after space flights // *Radiation Research*. 2001. V. 156. N. 6. P. 731–738.
- [Grigoryan et al., 2008] *Grigoryan O. R., Romashova V. V., Petrov A. N.* SAA drift: Experimental results // *Advances in Space Research*. 2008. V. 41. N. 1. P. 76–80.
- [Huston et al., 1998] *Huston S. L., Kuck G. A., Pfitzer K. A.* Solar cycle variation of the low-altitude trapped proton flux // *Advances in Space Research*. 1998. V. 21. N. 12. P. 1625–1634.
- [International Standard..., 2004] *International Standard. Space Environment (Natural and Artificial) — Galactic Cosmic Ray Model*. 2004. ISO, 15390.
- [Kems, 1989] *Kems S. E.* Ionization radiation effects in MOS devices and circuits / Eds. Ma T. P., Dressendorfer P. V. N. Y.: Willlie, 1989.
- [Kim et al., 2009] *Kim Myung Hee Y., Matthew J., Hayat A. et al.* 2009. Prediction of Frequency and Exposure Level of Solar Particle Events // *Health Physics*. 2009. V. 97. N. 1. P. 68–81.
- [Kuznetsov et al., 2006] *Kuznetsov S. N., Kurt V. G., Myagkova I. N., Yushkov B. Yu., Kudela K.* Gamma-ray emission and neutrons from solar flares recorded by the SONG instrument in 2001–2004 // *Solar System Research*. 2006. V. 40. Iss. 2. P. 104–110.
- [Mewaldt et al., 2007] *Mewaldt R. A., Cohen C. M. S., Mason G. M. et al.* Long term fluencies of solar energetic particles from H to Fe // *Space Science Reviews*. 2007. V. 130. P. 323–328. doi: 10.1007/s11214-007-9200-8.
- [Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008] *Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J. A.* Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays // *Intern. J. Modern Physics A*. 2008. V. 23. N. 1. P. 1–141.
- [Poivey et al., 2002] *Poivey G. et al.* Lessons learned from radiation induced effects on solid state records (SSR) and memories. SGT Inc, NASA-GSFC, Dec., 2002.
- [Sarabhai et al., 1956] *Sarabhai V., Duggal S. P., Razdan Y., Sastry F. S. G.* A solar flare type increase in cosmic rays at low latitudes // *Proc. Indian Academy of Sciences — Mathematical Sciences*. 1956. V. 43. P. 309–315.

- [Somov, 2012] *Somov B. V.* Plasma Astrophysics. Pt. 2. Reconnection and Flares. 2nd ed. N. Y.: Springer SBM, 2012.
- [Yukutake, Tachinaka, 1962] *Yukutake T., Tachinaka H.* The westward drift of the magnetic field of the Earth // Bull. Earthquake Research Inst. Univ. Tokio. 1962. V. 40. P. 1–65.

HEAVY NUCLEI IN SPACE — THE SOURCE OF RADIATION DANGER IN THE VICINITY OF THE EARTH AND IN THE INTERPLANETARY SPACE

M. Panasyuk

D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP), M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: panasyuk@sinp.msu.ru

As to heavy component of nuclei (ions) in space (heavier than hydrogen) it is clear that their fluxes are too low in space in comparison with electron component or protons to cause any significant radiation doses effects, but they can be considered as the major component for Single Events Effects (SEE) in microchips and for damages of biological structures on molecular level. The role of these effects in the field of any others radiation effects are extremely important both from the point of view of lifetime and temporal damages of onboard electronics and safety of men during long duration spaceflight. But we cannot neglect proton component of space radiation for SEE and biological effects because of existence of specific channel of generation of secondary particles — sources of SEE, etc by them. Nuclei (ions) in space have a variety of sources. Among them there are the Earth's radiation belts, solar energetic particles, galactic cosmic rays and even spacecraft's itself. Physical characteristics of fluxes of this component of space radiation are very different and dependent on characteristics of their sources, acceleration processes, and transport which are created different spatial —temporal and energy characteristics of them. As a rule any spacecraft will undergo simultaneously by different components of space radiation. Therefore it is complicated to model them using on ground accelerator's facilities. Moreover in some cases such kind of on ground testing is senselessly. This talk is devoted mainly for physical characteristics of ion components of space radiation and problems of modeling of this important component for radiation risk estimations of spaceflights.

Conclusions and discussion

Basing on the foregoing short review of the existing problems both in the area of interactions between the heavy charged energetic particles (HZE) and semiconductor structures and biological structures, and in spatial-temporal and energy distributions of this component of space radiation it is possible to conclude the following:

1. Currently not all physical processes of interactions between HZE's and semiconductor structures of space electronics can be evaluated quantitatively. The same conclusion is referred to the HZE's influence on the biological structures. Complex of these two factors and each of them separately underscore radiation risk of space flights.

2. Physical characteristics of the HZE's of the Earth's radiation belts and SCR are studied insufficiently. First of all, it concerns heavy high-energy nuclei in the region of SAA and the "tail" of energy distribution of SCR during powerful solar events generating particles with energy up to hundreds of MeV/nucleon and even over. Incorrect evaluation of these particles flux will lead to misrepresentation of estimated values of IC's failures and damages of biostructures.

Therefore, it can be concluded that time is needed in order to solve the problem of HZE's for space research at the level required for provision of reasonable radiation risk during the planned long-term space missions.

The question that has to be answered is: how to minimize risk of HZEs under current conditions? The following recommendations can be considered, taking into account that they surely need to be improved as our knowledge is accumulated:

1. **Electronics.** One must admit that current practice of electronic components qualification tests do not affect decreasing of radiation risk due to the HZE influence. Such tests allow only to evaluate probability of failures in the certain microcheap, but not to minimize it. Inability of space radiation conditions simulation on the Earth-based acceleration plants worsens this problem.

In order to minimize failure frequency — to decrease radiation risk — it is necessary to conduct radiation tests of ICs at the stage of *development*, but not after they were already manufactured. Using of specific structural materials, redundancy design and software along with radiation tests at the stage of development is a real way for minimization of failures and radiation risk decrease in space electronics.

2. **Biological structures.** Due to natural reasons the efforts which can be done for electronics, are inapplicable for biological structures. For instance, it's hardly possible to correct — to change — the structure of DNA in order to make it insensitive for HZEs. It is possible only to study mechanisms of HZEs influence on biological structures and to evaluate possible risks of certain particles' influence on certain biostructures.

Taking the abovementioned into account it can be said that today the most efficient way for minimization of risk of HZEs influence consists in *optimization* of space missions planning which has to include the following steps.

1. Interdiction and restriction of realization of important procedures onboard spacecraft when it is situated in the field of HZEs. For instance, SAA is the most dangerous location where the efficiency of HZEs influence is greater as against other geographic zones. Consequently it is necessary to forbid accomplishment of any important procedures and actions (correction of the orbit, extra-vehicular activity, etc.) while the spacecraft crosses this region. The same recommendation refers to the periods of powerful solar flares and the periods of the spacecrafts crossings of the areas of SCR penetration into the Earth's magnetosphere at the near-Earth orbits (for instance, polar and auroral regions).

2. For the cosmonauts and astronauts time limits of spaceflight are likely to be determined. Obviously, these limits are different for the near-Earth orbits, interplanetary flights and human activity on the surface of the Moon and Mars. Just *time* is an effective protection of biological structures from the influence of HZEs under conditions of space flight.

ПУЛЬСАЦИИ В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ КАК ВАЖНЫЙ БИОТРОПНЫЙ ФАКТОР КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Н. Г. Клейменова^{1,2}

¹ Институт физики Земли Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия, e-mail: kleimen@ifz.ru

Геомагнитные пульсации играют важную роль в передаче энергии в системе солнечный ветер — магнитосфера. Обсуждаются спектральные и сезонные характеристики разных типов геомагнитных пульсаций и их возможный биотропный эффект. Естественно предположить, что в результате эволюции живые организмы (за исключением больных особей) должны быть адаптированы к типичным волновым явлениям в магнитосфере Земли, однако нетипичные случаи могут приводить к непредсказуемым эффектам. Показано, что не каждая магнитная буря является биоэффективной. Биоэффективность магнитной бури не определяется её интенсивностью, как и биоэффективность геомагнитных пульсаций не зависит от их амплитуды. Показано, что наибольшее негативное влияние магнитной бури на живые организмы следует ожидать в зимнее время.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния факторов космической погоды на человека является актуальной задачей современности. Магнитные бури — один из основных факторов, с которым связывают возможные риски для здоровья.

Магнитные бури разделяются на два основных класса в зависимости от их источника на Солнце: вспышечные и рекуррентные. Вспышечные бури наблюдаются на Земле спустя примерно двое суток после яркой хромосферной вспышки на Солнце и характеризуются так называемым «внезапным началом» бури (**SC — sudden commencement**), т.е. скачкообразным возрастанием горизонтальной составляющей магнитного поля. Рекуррентные, т.е. повторяющиеся, бури характеризуются постепенным началом. Источником этих бурь являются высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных «дыр» на Солнце, поэтому такие бури в мировой литературе сейчас называют **CIR-driven storms** (**CIR — corotating interaction regions**). Высокоскоростные струи могут существовать несколько солнечных оборотов, поэтому для рекуррентных бурь характерна последовательность с периодом повторяемости ~27 сут. Интенсивность рекуррентных магнитных бурь обычно ниже, чем вспышечных, но их продолжительность больше. Иногда начало одной бури накладывается на восстановительную фазу предыдущей бури, создавая сложную картину геомагнитных возмущений.

Различия между рекуррентными (**CIR-driven**) и вспышечными (**CME-driven**) магнитными бурями обсуждаются во многих работах (например, [Vorovsky, Denton, 2006]). Установлено, что вспышечные бури характерны для периодов максимума солнечной активности, а рекуррентные — для периодов спада 11-летнего цикла солнечной активности. Если бури с «внезапным началом» выявляются относительно просто, как по наземным данным, так и по условиям в солнечном ветре, то бури с постепенным началом не всегда надёжно идентифицируются даже магнитологами.

Проблема неблагоприятного воздействия магнитных бурь на биосферу и здоровье человека обсуждается в научной литературе более 50 лет. Было установлено (например, [Бреус, Рапопорт, 2003; Breus et al., 1995; Watanabe et al., 1994]), что в человеческом организме наиболее подвержены воздействию гелиогеомагнитной активности сердце и сердечно-сосудистая система в состоянии патологии. Интерес научной общественности к проблемам гелиобиологии резко возрос в 80-х гг. **прошлого столетия**. **Этому, бесспорно, способствовало обнаружение минерализации железа в живых организмах, т. е. появление биогенного магнетита как возможного детектора внешнего магнитного поля [Kirschvink, Gould, 1981].**

Однако, несмотря на значительные успехи гелиобиологии, проблема возможного негативного влияния магнитных бурь на человеческий организм далека от разрешения. Конкретный механизм влияния геомагнитной активности на человека пока ещё достоверно не установлен. Заметим, что обычно не принято публиковать негативные результаты. Это создаёт ошибочное представление, что любая магнитная буря всегда опасна для человека. Но это далеко не так. Не каждая магнитная буря оказывает отрицательное влияние на человеческий организм и приводит к развитию инфарктов.

Так, например, американские исследователи [Lira et al., 1976], сопоставляя планетарную и локальную геомагнитную активность с данными о смертности от сердечно-сосудистых заболеваний в 1962–1966 гг. **по стране в целом** и в отдельных крупных городах, получили коэффициенты корреляции, не превышающие $0,067 \pm 0,023$, что свидетельствует об отсутствии достоверной связи. Таким образом, результаты этих исследований показали, что магнитные бури не всегда биотропны. Заметим, что анализируемый интервал времени совпал с минимумом солнечной активности, когда значительные геомагнитные возмущения достаточно редки, и в статистику могло быть включено много слабых небитропных возмущений.

Спустя почти 30 лет авторы другой работы [Бреус, Рапопорт, 2003], на основании выполненных ими исследований, также сделали вывод, что «феномен магнитных бурь не представляет поголовной опасности для человеческой популяции».

Понятно, что говорить о влиянии геомагнитной активности на биосферу на энергетическом уровне абсурдно, потому что вариации магнитного поля даже во время очень сильных магнитных бурь не превышают 2...5 % от величины главного магнитного поля Земли, что на несколько порядков ниже уровня антропогенных электромагнитных шумов крупных городов. Становится очевидным, что на биологические системы могут действовать не те изменения магнитного поля Земли, по которым вычисляются индексы геомагнитной и солнечной активности, широко используемые в корреляционных гелиобиологических исследованиях, а какие-то иные факторы.

Заметим, что в гелиобиологических исследованиях в качестве индекса солнечной активности часто используются числа Вольфа (*W*), характеризующие относительное число солнечных пятен. Числа Вольфа не точно отражают проявление солнечной активности вблизи Земли, так как не все вспышки и пятна на Солнце вызывают геомагнитные возмущения. Кроме того, если хромосферная вспышка расположена близко к краю солнечного диска, то интенсивный поток солнечного ветра из этой вспышки пролетит мимо, не задев магнитосферу Земли или же лишь частично коснувшись её. Между солнечными

и геомагнитными индексами не может быть полного соответствия. Хорошо известно, что максимумы 11-летних циклов солнечной активности не совпадают с максимумами циклических вариаций геомагнитной активности, а сдвинуты на 1...2 года.

Все используемые в гелиобиологии индексы магнитной активности не содержат информации о спектральном составе вариаций геомагнитного поля, который может быть критически важным для биотропности магнитных бурь. В ряде работ (например, [Плеханов, 1990; Птицына и др., 1998; Темурьянц и др., 1992]) приведены многочисленные примеры биологических эффектов переменных электромагнитных полей очень малых напряжённостей. Было также показано [Плеханов, 1990], что ЭДС, наводимая в биорезонаторе электрического поля, пропорциональна ширине спектра воздействующих колебаний. Следовательно, можно предположить [Клейменова, Троицкая, 1992], что биотропное действие магнитных бурь зависит от волновой структуры и спектра геомагнитных пульсаций, представляющих так называемую тонкую структуру магнитной бури.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Геомагнитные пульсации представляют собой короткопериодные колебания геомагнитного поля и характеризуются квазипериодической структурой, занимая диапазон частот от тысячных долей герца до нескольких герц. В зарубежной литературе в настоящее время для обозначения этих колебаний часто используется термин **ULF-wave (ultra-low-frequency)**. **Наличие пульсирующих** вариаций в геомагнитном поле было известно давно, однако из-за низкой чувствительности регистрирующей аппаратуры серьёзные исследования геомагнитных пульсаций начались лишь в 50-х гг. прошлого столетия. Одной из первых работ в области изучения геомагнитных пульсаций была работа В. А. Троицкой (1953), заложившей основы этого направления исследований.

По физической природе геомагнитные пульсации — это гидромагнитные волны, возбуждаемые в магнитосфере Земли и в солнечном ветре. Верхняя частота пульсаций определяется гирочастотой протонов в магнитосфере, на земной поверхности это соответствует частотному диапазону порядка 3...5 Гц. **Нижняя частота составляет единицы миллигерц.** Многообразие видов пульсаций может быть разделено на два больших класса — иррегулярные, импульсные пульсации (*pulsations irregular — Pi*), имеющие вид отдельных всплесков с нестационарным спектром и длительностью в несколько минут, и непрерывные (*pulsation continues — Pc*), продолжающиеся несколько часов с квазисинусоидальной формой и устойчивым режимом. Как правило, импульсные пульсации (*Pi*) характерны для ночных часов, а непрерывные (*Pc*) — для дневных.

По диапазону периодов геомагнитные пульсации разделяются на следующие типы:

$Pc1$ ($T=0,2...5,0$ с),	$Pi1$ ($T=1...40$ с),
$Pc2$ ($T=5...10$ с),	$Pi2$ ($T=40...150$ с),
$Pc3$ ($T=10...45$ с),	$Pi3$ ($T>150...с$).
$Pc4$ ($T=45...150$ с),	
$Pc5$ ($T=150...600$ с),	

Следует подчеркнуть, что установленные классификацией границы периодов для того или иного типа пульсаций носят, в известной степени, условный характер и в ряде случаев могут несколько отличаться.

Амплитуды пульсаций резко возрастают с увеличением периода колебаний. Так, в средних широтах амплитуды пульсаций $Pc1-Pc2$ и $Pi1$ обычно составляют десятые доли нанотесла, пульсаций $Pc3-Pc4$ и $Pi2$ — единицы нанотесла, а $Pc5$ и $Pi3$ — десятки нанотесла. Несмотря на эти, казалось бы, малые значения амплитуд, ряд исследователей, например [Плеханов, 1990; Птицына и др., 1998], указывает на возможную биоэффективность таких колебаний. Можно предположить, что существует определённая избирательность по частоте, обусловленная резонансными взаимодействиями. Кроме того, возможно, имеет значение также скорость изменения магнитного поля (временные градиенты).

На разных геомагнитных широтах морфологические характеристики пульсаций несколько различаются. С увеличением широты период дневных колебаний увеличивается. Так, если на средних широтах типичными дневными колебаниями являются геомагнитные пульсации $Pc3-Pc4$, то для авроральных широт типичны геомагнитные пульсации $Pc5$. В то же время на любых широтах в ночные часы наблюдаются геомагнитные пульсации $Pi2$ в одном и том же диапазоне периодов.

Как правило, все дневные пульсации $Pc2-5$ есть результат развития в магнитосфере Земли резонансных колебаний силовых линий геомагнитного поля. Собственный период колебаний силовой линии геомагнитного поля определяется как $T = 2 \int dS/V_a$, где интегрирование ведётся вдоль силовой линии геомагнитного поля, соединяющей сопряжённые точки ионосфер противоположных полушарий, а V_a — альфвеновская скорость. Период резонансных колебаний зависит не только от длины силовой линии, но и от напряжённости геомагнитного поля (B) и плотности плазмы вдоль силовой линии (ρ), поскольку альфвеновская скорость $V_a = B/(\mu_0\rho)^{1/2}$. Если все силовые линии геомагнитного поля будут совершать резонансные колебания независимо друг от друга, то период наблюдаемых геомагнитных пульсаций должен непрерывно меняться в пространстве. Однако в магнитосфере силовые линии оказываются связанными и могут колебаться как целое. Альфвеновские волны преимущественно возбуждаются на тех силовых линиях, где резонансный период совпадает с периодом волн внешнего источника.

С возрастанием геомагнитной активности амплитуда пульсаций на всех широтах увеличивается. Однако волновой портрет разных магнитных бурь часто бывает различным, во многом зависящим от условий в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле (ММП). На рис. 1 показан пример аналоговой фоторегистрации геомагнитных пульсаций в магнитовозмущенное время. В настоящее время во всех пунктах такая регистрация больше не проводится, а используется цифровая запись с дискретизацией в 1 или 10 с.

Характеристики геомагнитных пульсаций подробно изложены в ряде обзоров и монографий (например, [Клейменова, 2007; Пудовкин и др., 1976; Троицкая, Гульельми, 1969; Pilipenko, 1990; Saito, 1969; Troitskaya, 1964]).

Рассмотрим более подробно каждый из основных типов геомагнитных пульсаций, наблюдаемых на земной поверхности.

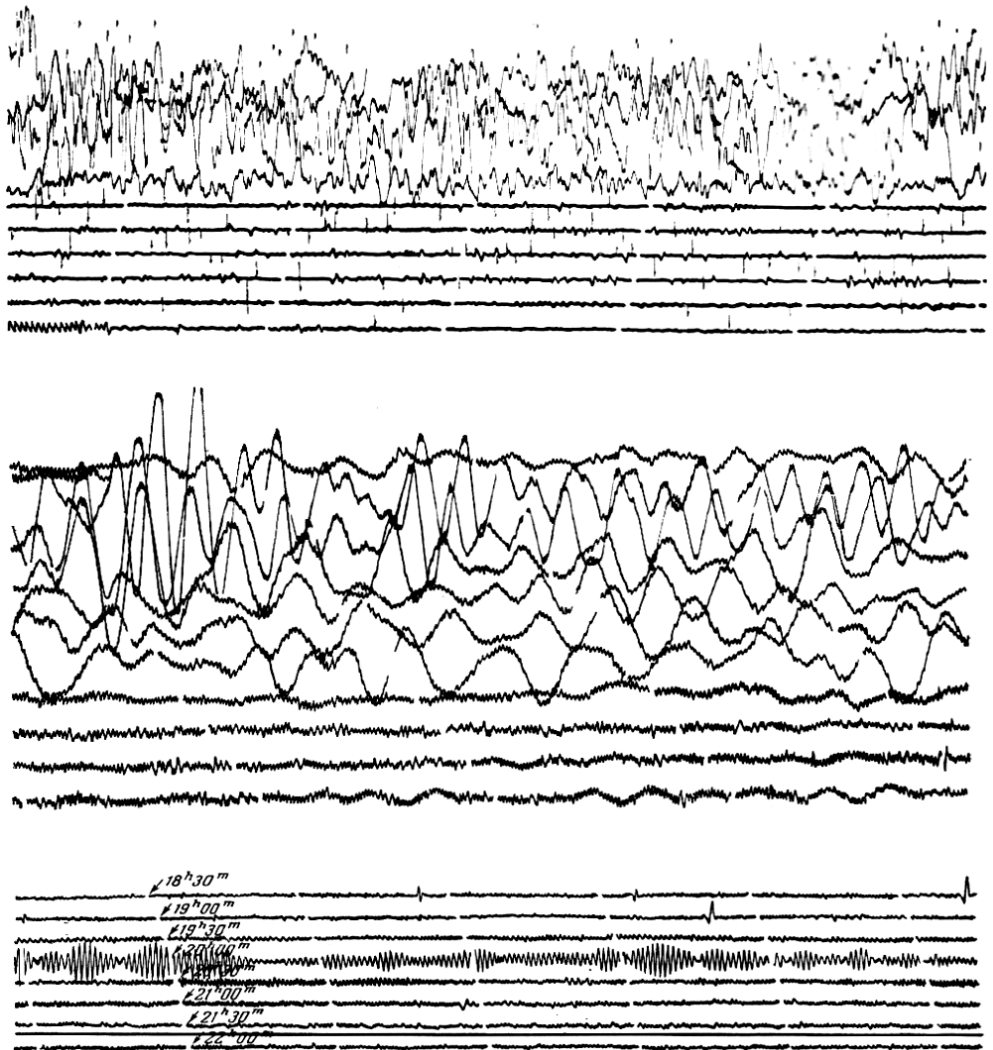


Рис. 1. Пример аналоговой записи геомагнитных пульсаций в обсерватории Борок. Каждая линия — 6-минутный интервал регистрации. Верхний график — иррегулярные $Pi1$ -пульсации, средний — $Pc3$ – $Pc4$, нижний $Pc1$

1.1. Геомагнитные пульсации $Pc1$

Геомагнитные пульсации $Pc1$ представляют собой квазисинусоидальные колебания с периодом от 0,2 до 5 с, имеющие характерную модуляцию амплитуды в виде отдельных волновых пакетов, создающих сложную картину биений (нижний график на рис. 1). Пульсации $Pc1$ В. А. Троицкая называла «жемчужинами», поскольку их магнитограмма напоминает нитку жемчужного ожерелья. Длительность серий $Pc1$ составляет от получаса до нескольких часов, максимум их появления отмечается в ранние утренние часы местного времени [Матвеева, Троицкая, 1965]. В средних широтах амплитуды $Pc1$ -пульсаций составляют 0,01...0,1 нТ. Колебания могут одновременно регистрироваться

в большом диапазоне долгот (до 120°) и несколько сотен километров по широте.

Генерация *PcI*-пульсаций характерна для восстановительной фазы магнитной бури, на 3...6-й день после внезапного начала бури SC [Плясова-Бакунина, Матвеева, 1968]. В восстановительную фазу магнитной бури происходит распад кольцевого тока в магнитосфере Земли и заполнение плазмосферы холодной плазмой, что улучшает условия для развития, приводящего к возбуждению *PcI*-пульсаций.

Кроме того, *PcI*-пульсации часто наблюдаются после внезапного начала бури (SC), если оно происходит в ранние утренние часы местного времени. В этом случае генерация волн связана с резким возрастанием плотности и динамического давления солнечного ветра. В редких случаях *PcI* наблюдаются и за несколько часов до внезапного начала.

Циклические вариации пульсаций *PcI* находятся в противофазе с 11-летней периодичностью солнечной активности [Матвеева, 1987]. Это чётко видно на рис. 2, где приведены данные о солнечной активности (сумма месячных значений чисел Вольфа) и длительность *PcI*-пульсаций (месячная сумма 15-минутных интервалов с *PcI*) в обсерватории Борок Ярославской области (http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc/) за 1970–1995 гг. Видно, что максимум появления геомагнитных пульсаций *PcI* наблюдается в периоды минимума солнечной активности.

В сезонных вариациях длительности среднеширотных *PcI*-пульсаций максимум наблюдается в зимнее время. Особенно чётко сезонный ход *PcI*-пульсаций проявляется в годы минимума солнечной активности. В годы максимума солнечной активности число случаев появления *PcI* уменьшается. Объяснение этому факту пока не найдено, хотя не исключено, что сезонный ход появления *PcI* может быть связан с особенностью прохождения волн через летнюю ионосферу.

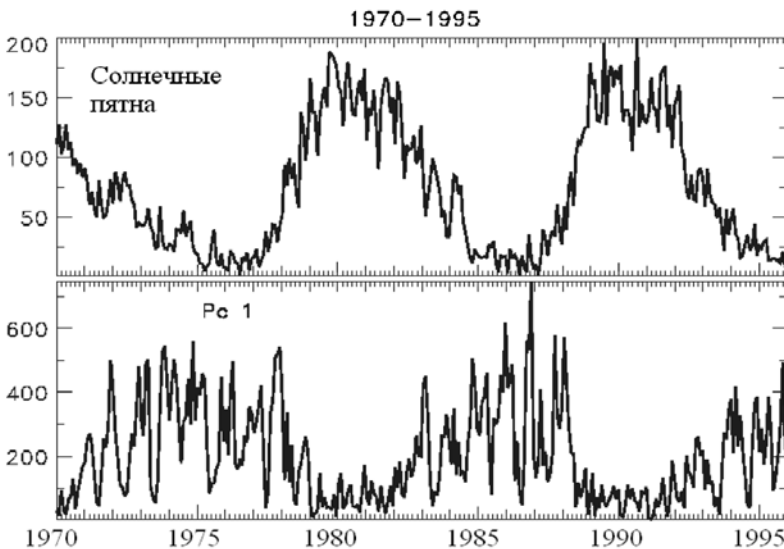


Рис. 2. Циклические вариации солнечной активности и длительности *PcI*-пульсаций

Объяснение этому факту пока не найдено, хотя не исключено, что сезонный ход появления *Pc 1* может быть связан с особенностью прохождения волн через летнюю ионосферу.

Возбуждение геомагнитных пульсаций типа *Pc1* связано с циклотронным взаимодействием волн и частиц в магнитосфере Земли [Троицкая, Гульельми, 1969]. Характеристики пульсаций на земной поверхности определяются как условиями возбуждения, так и коэффициентами отражения от противоположных ионосфер и коэффициентами прохождения через ионосферу.

Для генерации пульсаций *Pc1* необходима предшествующая геомагнитная возмущённость, способствующая накоплению в магнитосфере достаточного числа энергичных частиц, захваченных магнитным полем. Однако в ходе магнитной бури в предвечерние часы могут наблюдаться колебания, очень похожие на *Pc1*, но отличающиеся от них уменьшающимся со временем периодом, в то время как период *Pc1* обычно не изменяется со временем. Это колебания убывающего периода (КУП). С точки зрения возможной биотропности оба этих вида пульсаций равнозначны, но геомагнитные пульсации *Pc1* наблюдаются при малых значениях Кр-индекса, а колебания типа КУП — при больших.

1.2. Иррегулярные пульсации *Pi1*

В диапазоне *Pi1* ($T=40...150$ с) наблюдается несколько видов пульсаций, основными из которых являются: а) вечерние и ночные широкополосные шумовые всплески (*PiB*) длительностью порядка 1...3 мин, обычно сопровождающие всплески *Pi2*-пульсаций и полярных сияний; б) *PiC* — утренние шумовые неструктурированные колебания в достаточно узкой полосе с преобладающим периодом 5...10 с. Пример спектрограммы этих пульсаций показан на рис. 3.

Наибольшие амплитуды *PiB*-пульсаций регистрируются в авроральных широтах. Колебания *PiC* наиболее часто наблюдаются вблизи экваториальной границы авроральной зоны и сопровождаются пульсирующими пятнами полярных сияний.

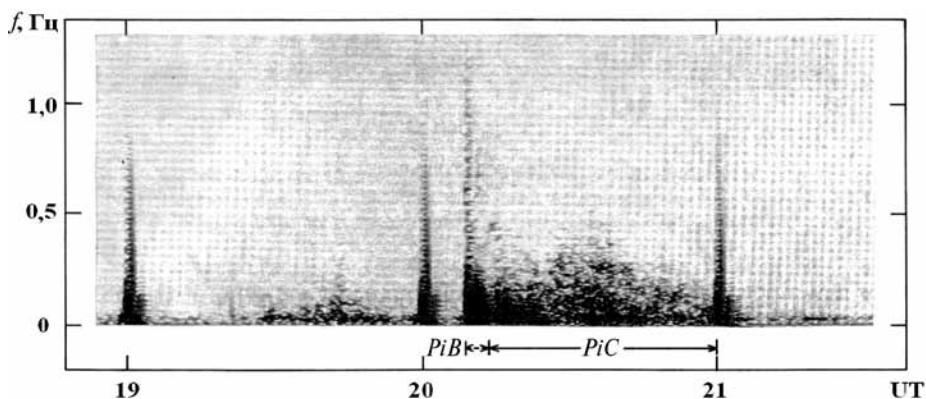


Рис. 3. Пример спектрограммы геомагнитных пульсаций *PiB* и *PiC*

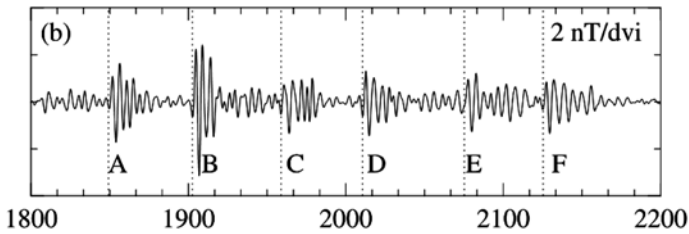


Рис. 4. Пример последовательности всплесков пульсаций $Pi2$ [Kim et al., 2005]

1.3. Геомагнитные пульсации $Pi2$

Геомагнитные пульсации $Pi2$ на магнитограммах имеют характерную форму затухающего цуга колебаний с периодом порядка 50...150 с ($f \approx 6...20$ мГц) и продолжительностью 5...10 мин. Наиболее часто $Pi2$ -пульсации регистрируются в полосе частот 8...15 мГц. Одним из важнейших свойств $Pi2$ -пульсаций, часто используемым при изучении процессов в авроральных широтах, является их чёткая связь со взрывной фазой (брейкапом) магнитосферной суббури. При этом возбуждение цуга $Pi2$ обычно сопровождается всплеском колебаний PiB . В ходе развития взрывной фазы суббури может происходить генерация серии цугов $Pi2$, средний интервал времени между которыми составляет 10...15 мин.

Максимум амплитуды и частоты появления $Pi2$ наблюдается в ночном секторе авроральной зоны и достигает порядка 10...20 нТ. Пример появления нескольких всплесков $Pi2$ -пульсаций в средних широтах показан на рис. 4 (из работы [Kim et al., 2005]). Буквами А–F помечены отдельные волновые пакеты $Pi2$ -пульсаций. По горизонтальной оси — мировое время. Хотя всплески $Pi2$ -пульсаций наблюдаются одновременно в авроральных, средних и низких широтах, природа их в разных широтах различна.

Генерацию $Pi2$ в авроральных широтах связывают с квазипериодическими колебаниями продольных электрических токов, усиливающихся во время магнитосферной суббури, а в средних и низких широтах — с возбуждением глобальной стоячей волны (**cavity mode resonance**) **внутри плазмосферы**, вызванной подходом к плазмопаузе волны сжатия. Первичный источник энергии этих пульсаций связан с плазменными неустойчивостями в хвосте магнитосферы и взрывным освобождением энергии во время начала суббури (брейкап), а также появлением направленных к Земле быстрых потоков заряженных частиц, так называемых *bursty bulk flows* (BBF).

1.4. Дневные геомагнитные пульсации $Pc2$ – $Pc4$

На земной поверхности геомагнитные пульсации $Pc2$ – $Pc4$ наблюдаются от экваториальных до полярных областей, при этом амплитуда колебаний возрастает с ростом широты точки наблюдения. Так, амплитуда самых распространённых $Pc3$ -колебаний с периодом порядка 20...30 с в **средних широтах** составляет десятые доли нанотесла, а в высоких — единицы и первые десятки нанотесла. В свою очередь, среднеширотные $Pc4$ имеют обычно амплитуду

в единицы, а высокоширотные — десятки нанотесла. Генерация волн может продолжаться часами. Часто колебания наблюдаются в виде волновых пакетов с постепенным подъёмом и спадом амплитуды длительностью в несколько минут.

Возбуждение пульсаций *Pc4* характерно для магнитоспокойных условий [Большакова и др., 1995], а *Pc2* и *Pc3* — для умеренно возмущённых. С ростом магнитной активности период колебаний, регистрируемых в данной точке, уменьшается (рис. 5) и попадает в диапазон *Pc2* при $K_p > 5$ и в диапазон *Pc4* при $K_p < 2$.

В возмущённых условиях колебания в диапазоне *Pc3* и *Pc4* нередко генерируются одновременно, что приводит к сложной картине их динамических спектров. На рис. 6 приведено несколько примеров динамических спектров геомагнитных пульсаций *Pc3* и *Pc4*. Из приведённых на рис. 6 примеров регистрации геомагнитных пульсаций в субавроральной обсерватории Кергелен видно, что в одних случаях (верхний и нижний графики) одновременно регистрируются две дискретные достаточно узкие полосы колебаний: одна в диапазоне *Pc3* ($f \approx 30$ мГц), а другая — в диапазоне *Pc4* ($f \approx 8...10$ мГц). В других случаях наблюдается постепенное изменение периодов пульсаций (второй снизу график). В спокойных условиях регистрируются лишь колебания диапазона *Pc4* (второй сверху график).

В широтном распределении амплитуд *Pc3*-пульсаций чётко выделяется два максимума: среднеширотный (геомагнитные широты $55...60^\circ$) в околополуденные часы и высокоширотный (геомагнитные широты $70...74^\circ$) в предполуденные часы. Как правило, период колебаний возрастает с увеличением широты.

Морфологические характеристики *Pc2–Pc4*-пульсаций свидетельствуют о том, что наиболее вероятным механизмом их генерации является альфвеновский резонанс силовых линий геомагнитного поля.

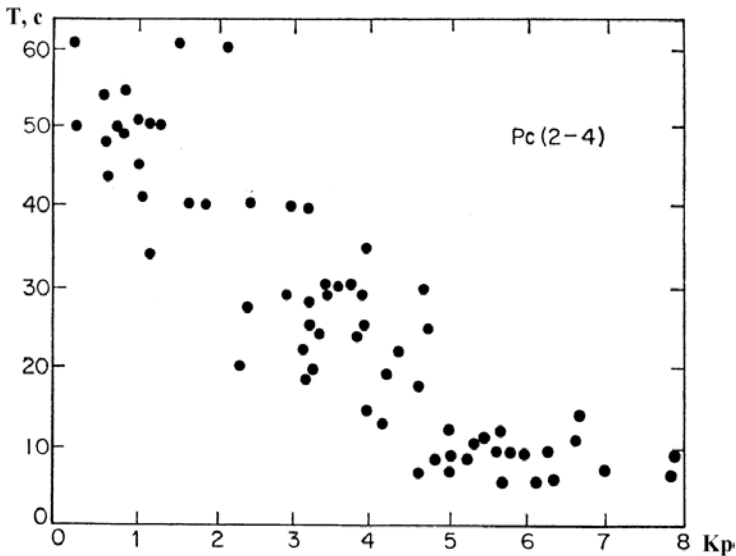


Рис. 5. Пример уменьшения периодов геомагнитных пульсаций *Pc2–Pc4* (обсерватория Борок) с ростом магнитной активности

Основным источником энергии волн может быть неустойчивость Кельвина–Гельмгольца на флангах магнитосферы, развивающаяся за счёт обтекания магнитосферы солнечным ветром. Инкремент этой неустойчивости растёт с увеличением скорости солнечного ветра, т. е. амплитуда волн возрастает с увеличением скорости солнечного ветра.

Кроме этого, в диапазоне $Pc2$ – $Pc4$ могут регистрироваться пульсации, период которых не зависит от широты. Наиболее часто такие квазимонохроматические колебания наблюдаются с периодом $\sim 20\text{...}25$ с ($f \approx 40\text{...}50$ мГц). Эти волны могут иметь внемагнитосферное происхождение. Источником энергии таких пульсаций могут быть волны, возбуждающиеся в турбулентной области на границе магнитосферы перед фронтом ударной волны за счёт ионно-циклотронного резонанса отражённых от магнитосферы протонов солнечного ветра. Эти волны из солнечного ветра могут проникать во внутреннюю магнитосферу и наблюдаться на земной поверхности как геомагнитные пульсации с периодом, не зависящим от широты. Частота таких волн определяется величиной межпланетного магнитного поля (в ММП) и может быть вычислена по эмпирической формуле: f (мГц) $\approx 6B$ (нТ).

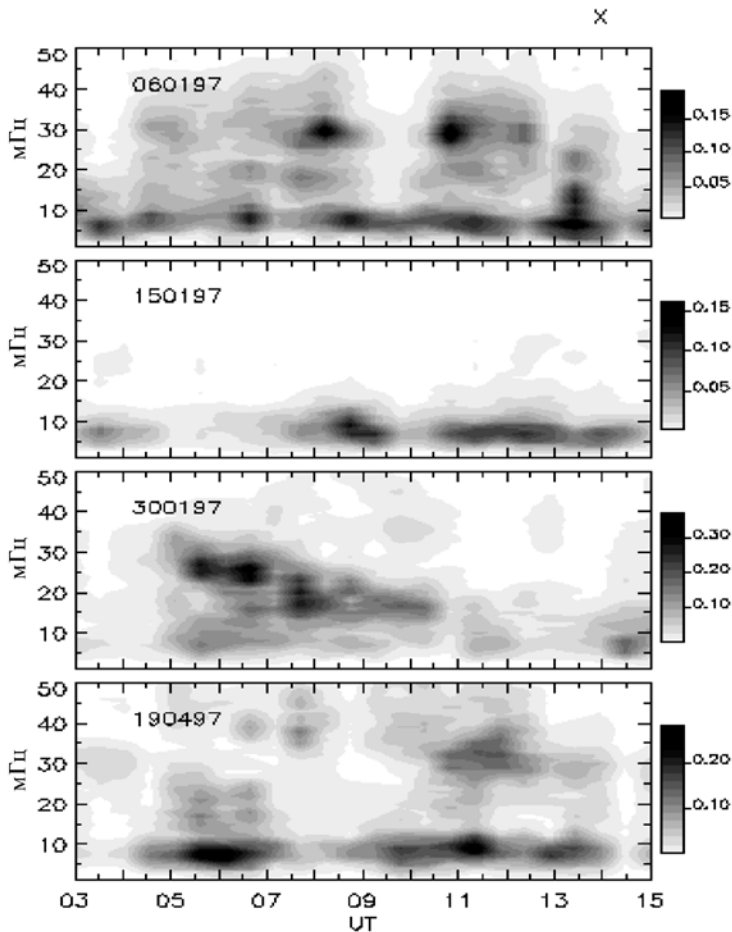


Рис. 6. Примеры динамических спектров геомагнитных пульсаций $Pc3$ и $Pc4$

1.5. Геомагнитные пульсации $Pc5$

Пульсации $Pc5$ от других типов устойчивых пульсаций отличаются большими периодами (150...600 с, $f \approx 1,5...6,0$ мГц) и огромными амплитудами. В высоких широтах амплитуды $Pc5$ обычно составляют порядка 50...200 нТ, а в условиях сильной магнитной возмущённости могут достигать 300...400 нТ и более. В суточном ходе появления пульсаций отмечается два максимума — основной, в утренние часы, и второй, несколько меньший — в послеполуденные часы.

Пульсации $Pc5$ — это, в основном, высокоширотные явления и типичны для начальной и восстановительной фазы бури. Максимум амплитуды $Pc5$ наблюдается в авроральной зоне и при увеличении магнитной активности смещается в сторону более низких широт. Период пульсаций зависит от широты, что свидетельствует о резонансной природе волн. В каждом отдельном волновом пакете спектр колебаний может оставаться одинаковым во всей области широт, где эти колебания наблюдаются, однако на каждой частоте амплитуда колебаний будет максимальна на той широте, где данная частота соответствует локальному альфвеновскому резонансу. Так, в условиях умеренной геомагнитной возмущённости на широтах $\sim 70^\circ$ преобладающий период резонансных пульсаций $Pc5$ составляет ~ 2 мГц, а на широтах $\sim 60^\circ$ — около 3 мГц.

Основным источником энергии резонансных $Pc5$ -колебаний могут быть неустойчивость Кельвина—Гельмгольца на магнитопаузе, а также импульсы динамического давления солнечного ветра или его флуктуации. Магнитозвуковые волны при распространении вглубь магнитосферы могут возбуждать тороидальные колебания (резонансы) на L -оболочке, где частота внешнего источника совпадает с локальной частотой собственных колебаний геомагнитной силовой линии.

Во время магнитных бурь возможно возбуждение квазимонохроматических $Pc5$ -пульсаций одновременно во всём дневном секторе. Такие колебания могут быть результатом генерации полоидальных волн так называемой глобальной моды, т. е. стоячих волн, отражающихся от границы магнитосферы и плазмопаузы. Такие колебания обычно наблюдаются во время очень больших магнитных бурь, когда скорость солнечного ветра достигает огромных значений — до ~ 1000 км/с. Пример такого случая показан на рис. 7. Видно, что во время гигантской магнитной бури 31 октября 2003 г. в дневном секторе Земли геомагнитные пульсации $Pc5$ огромной амплитуды (200...400 нТ) регистрировались одновременно от полярных до низких геомагнитных широт.

Усиление геомагнитных пульсаций $Pc5$ происходит одновременно на всех широтах. Это чётко видно на рис. 8, где приведены два примера вариаций интенсивности $Pc5$ на разных широтах в течение месяца, справа — международные коды обсерваторий. Видно, что интенсификация пульсаций наблюдается одновременно на всех широтах и продолжается в течение нескольких дней. При этом интенсивность колебаний в авроральных широтах (SOD) в 4 раза больше, чем в субавроральных (PAF), а в средних широтах (CZT) — в 4 раза меньше, чем в субавроральных, т. е. от высоких к средним широтам амплитуда $Pc5$ -пульсаций уменьшается больше чем на порядок.

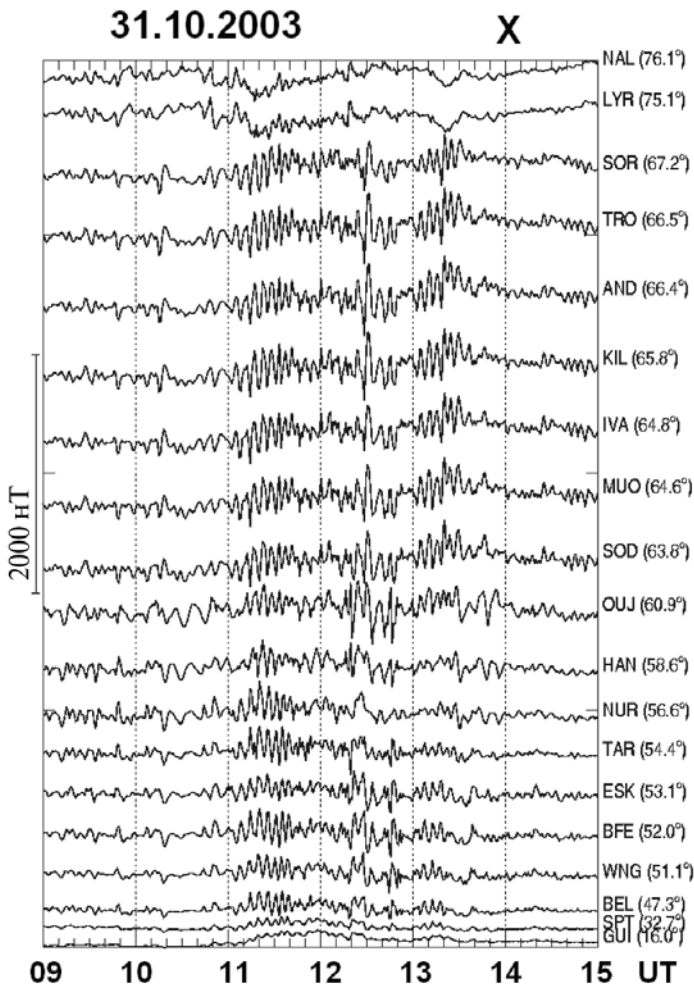


Рис. 7. Глобальные $Pc5$ -пульсации во время гигантской магнитной бури, справа показаны геомагнитные широты используемых станций

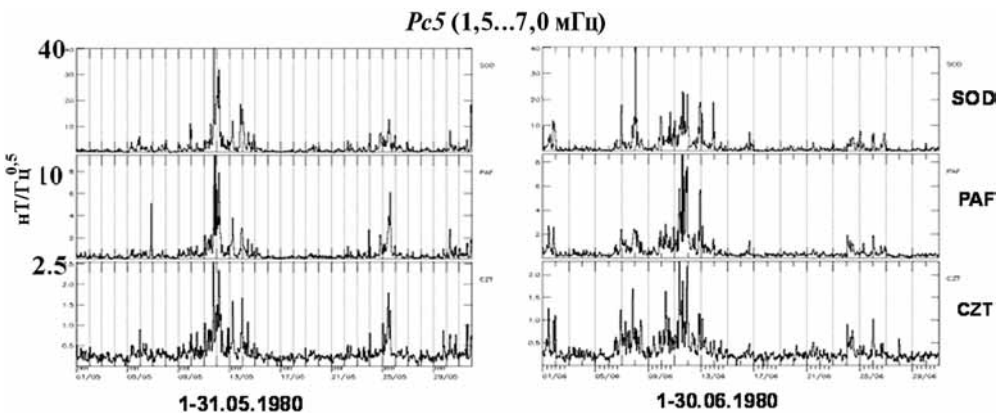


Рис. 8. Пример одновременной интенсификации $Pc5$ -пульсаций на разных широтах

2. ВОЗМОЖНАЯ БИОТРОПНОСТЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

2.1. Экспериментальные результаты

Геомагнитное поле существовало до возникновения жизни на Земле, т.е. органическая эволюция происходила в присутствии магнитного поля. Эволюционные преобразования создали сложную иерархию временной упорядоченности различных биологических ритмов, ключевую роль в создании которых играли квазипериодические вариации окружающей среды, в том числе и вариации геомагнитного поля. В результате эволюции биологические объекты, включая человеческий организм, сформировались как сложные открытые нелинейные системы, состояние которых во многом зависит от изменяющихся условий среды обитания. Естественно предположить, что в результате эволюции живые организмы (за исключением больных особей) должны быть адаптированы к типичным волновым явлениям в магнитосфере Земли, однако нетипичные случаи могут приводить к непредсказуемым эффектам.

Заметим, что наиболее чувствительными к негативному влиянию возмущений космической погоды являются больные организмы. Ещё А. Л. Чижевский в 1933 г. писал: «Мы можем рассматривать больной организм как систему, выведенную из состояния равновесия. Для таких систем достаточно импульса извне, чтобы его равновесие нарушилось». Одним из таких импульсов могут быть внезапное появление биотропных геомагнитных пульсаций или исчезновение типичных колебаний, которые характерны для данного местного времени.

Рассмотрим некоторые результаты исследования возможной биотропности разных типов геомагнитных пульсаций.

Наиболее короткопериодными из дневных регулярных пульсаций (P_c) являются **пульсации P_c1** , которые представляют собой квазисинусоидальные колебания с периодом от 0,2 до 5 с, т.е. близким к периоду сокращений сердечной мышцы человека, поэтому можно предположить [Клейменова, Троицкая, 1992], что пульсации P_c1 могут иметь биотропный эффект. Анализ возможной биотропности этих пульсаций был опубликован в ряде работ [Иванова и др. 2002; Клейменова, Козырева, 2008; Клейменова и др., 2007; Kleimenova et al., 2001, 2007]. Ниже рассмотрим некоторые из результатов этих исследований.

Для изучения возможного негативного влияния P_c1 -пульсаций на сердечно-сосудистые заболевания мы проанализировали ежесуточные данные о вызовах скорой медицинской помощи (без учёта времени вызова) в Москве за три года вблизи максимума солнечной активности (1979–1981). Эти данные исследовались в различных публикациях, наиболее полно в монографии [Бреус, Рапопорт, 2003]. Из банка медицинских данных мы использовали только сведения о вызовах по поводу заболеваний сердечно-сосудистой системы, как наиболее чувствительной к отрицательному воздействию геомагнитных возмущений. Таких вызовов по поводу инфаркта миокарда (ИМ) за 3 года было 85,7 тыс.

Заметим, что данные скорой медицинской помощи имеют ряд временной неоднозначности. Прежде всего, данные медицинской статистики составляются по московскому времени, а геомагнитные данные — по мировому времени. Для Москвы эта разница составляет 3 ч. Следовательно, если выезд скорой медицинской помощи был после 21 часа московского времени, то

этот вызов попадёт в разряд следующего дня для геомагнитных данных. Ночные (00–03 часов по московскому времени) вызовы будут соответствовать геомагнитным данным предыдущего дня, т. е. имеет место неопределённость в одни сутки. В таком случае запаздывание или опережение возможного эффекта может оказаться артефактом. В используемых данных фиксировался только факт вызова скорой медицинской помощи, а точная дата начала заболевания была неизвестна. Кроме этого поставленный врачом скорой медицинской помощи диагноз мог быть неточным и впоследствии изменён.

В качестве меры активности *PcI*-пульсаций использовалась длительность этих колебаний, определённая по данным каталога наблюдений геомагнитных пульсаций *PcI* в геофизической обсерватории Борок (Ярославская область) Института физики Земли РАН (http://www.wdcb.ru/stp/data/catalog_pc/), составленного Э. Т. Матвеевой. Этот каталог содержит данные о времени появления, частоте и амплитуде *PcI*-пульсаций на основе непрерывной аналоговой регистрации.

Для доказательства возможной связи между вариациями числа ИМ и длительностью *PcI* мы рассмотрели случаи аномально больших чисел суточных вызовов скорой медицинской помощи по поводу ИМ. Для этого из всего массива данных были выбраны дни с числом вызовов по поводу ИМ больше 100, что заведомо превышало среднее за три года статистическое значение, суммированное со стандартным отклонением ($78,3 \pm 15,4$). Анализ данных показал, что из 67 таких дней в 46 (69 %) случаях одновременно регистрировалось появление геомагнитных пульсаций *PcI*. Более чем в половине случаев такие дни сопровождалось геомагнитными пульсациями, которые наблюдались два дня подряд — в предшествующий день и текущий. Вычисления показали, что вероятность появления геомагнитных пульсаций *PcI* в зимние месяцы 1979–1981 гг. составляла 0,313, а вероятность аномально большого числа вызовов — 0,066. Если эти события являются независимыми, то вероятность их совместного появления (P) будет равна произведению их вероятностей, т. е. $P = 0,020$. В то же время реальная вероятность случаев одновременной регистрации этих событий составила всего 0,047, что более чем в два раза превышает вероятность их случайного совпадения.

Важно отметить, что, как показал наш анализ, амплитуда *PcI* не играла существенной роли в таком совпадении. Так, за 3 года было зарегистрировано 12 случаев очень интенсивных *PcI* с амплитудой больше 50 пТ, из которых только в одном случае наблюдалось увеличение числа вызовов скорой медицинской помощи по поводу ИМ.

Кроме того были сопоставлены данные о месячной смертности от инфаркта миокарда в Болгарии и месячного числа 15-минутных интервалов с пульсациями *PcI* в обсерватории Борок [Иванова и др., 2002; Kleimenova et al., 2001] за 1970–1995 гг. Результаты такого сопоставления для 1970–1974 гг. показаны на рис. 9. Чётко видно очень хорошее совпадение обеих кривых с максимумом зимой и минимумом летом.

Мы также сопоставили месячные данные вызовов скорой медицинской помощи в Москве и месячные данные о смертности в Болгарии (рис. 10) и получили их хорошее соответствие между собой и с месячной длительностью геомагнитных пульсаций *PcI* в обсерватории Борок. Нижний график на рис. 10 — вариации геомагнитной активности (Кр). Тенденция к подобию медицинских данных и геомагнитной активности заметна лишь для 1981 г.

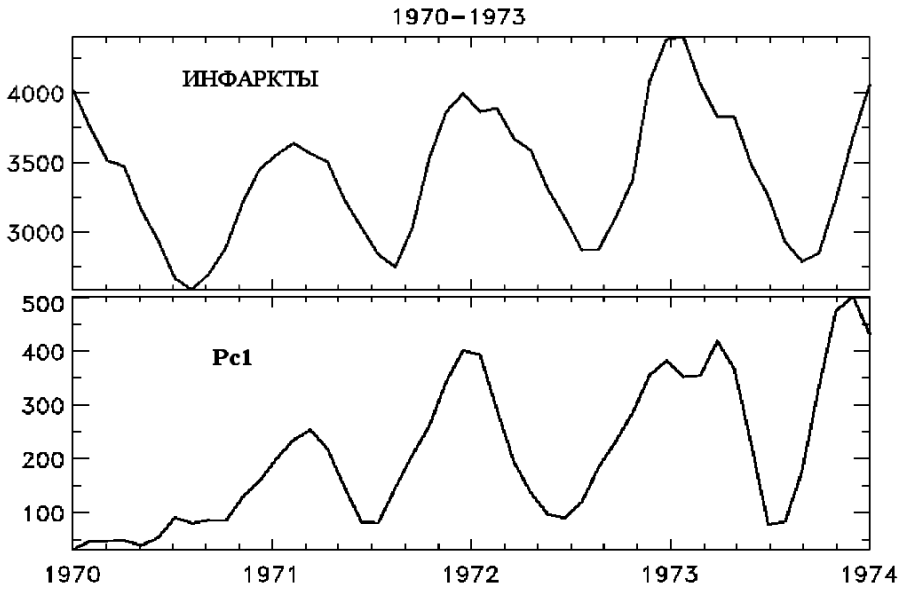


Рис. 9. Сопоставление данных месячной смертности от инфаркта миокарда в Болгарии и длительности геомагнитных пульсаций $Pc1$ в обсерватории Борок

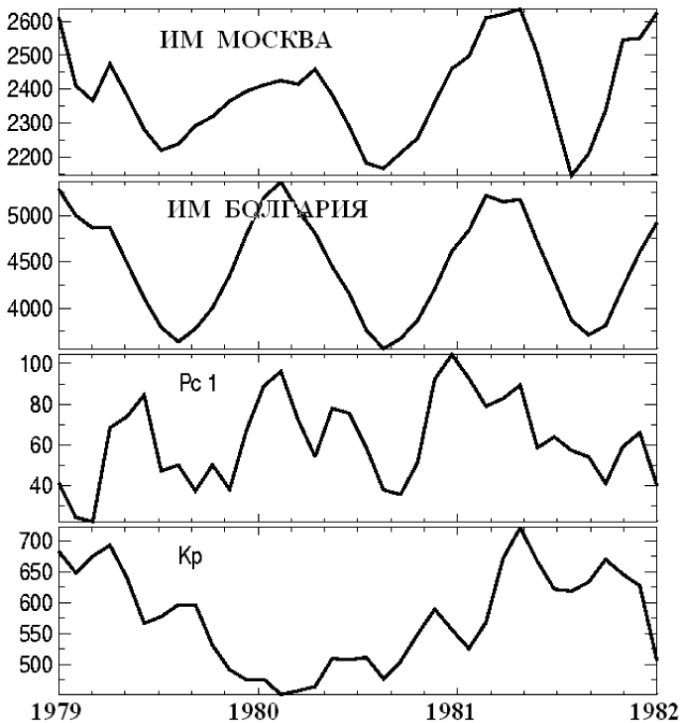


Рис. 10. Сверху вниз сумма месячных значений вызовов скорой медицинской помощи по поводу инфарктов миокарда в Москве, смертности от инфаркта в Болгарии, длительности геомагнитных пульсаций в обсерватории Борок (относительные единицы) и Kp -индекса геомагнитной активности

Хорошо известно, что максимум геомагнитной активности наблюдается в периоды равноденствия (т. е. весной и осенью), а не солнцестояния (лето — зима). Следовательно, логично бы было ожидать, что число случаев обострения сердечно-сосудистых заболеваний и их смертельного исхода будет возрастать именно в периоды равноденствия. Однако видно, что максимум ИМ отмечается в зимний период, что противоречит такому предположению.

Это означает, что геомагнитная активность не является определяющей в сезонном ходе ИМ. При этом нельзя отрицать негативной роли геомагнитных возмущений в развитии ИМ. Так, например, на рис. 10 выделяется чёткий пик числа случаев ИМ как в Москве, так и в Болгарии весной 1981 г., совпадающий с резким возрастанием геомагнитной активности в это время. Такой же пик в увеличении числа случаев ИМ чётко виден и весной 1979 г. Однако значительный рост геомагнитной возмущённости летом 1981 г. не только не проявился в вариациях числа случаев ИМ, более того, именно в это время наблюдался глубокий минимум ИМ как в Москве, так и в Болгарии. По-видимому, существуют какие-то причины, в силу которых магнитные бури зимой оказывают значительно более сильное влияние на сердечно-сосудистую систему, чем в летнее время.

Иногда наблюдается ситуация, когда генерация геомагнитных пульсаций *Pc1* отмечается отдельными сериями в течение трёх и более дней подряд. За 3 года (1979—1981) было обнаружено 19 таких последовательностей. Анализ данных вызовов скорой медицинской помощи в Москве по поводу инфарктов показал, что наибольшее число вызовов, превышающее среднестатистическое значение, отмечалось в первый день появления *Pc1*-пульсаций, а затем число вызовов постепенно уменьшалось. Это можно проинтерпретировать как адаптационную реакцию организма на внешний стресс (привыкание). Заметим, что в летние месяцы было выявлено всего пять таких последовательностей *Pc1*, и все они сопровождались обратной картиной — число вызовов скорой медицинской помощи постепенно увеличивалось, но оставалось ниже среднестатистического уровня. Можно предположить, что реакция организмов на внешнее воздействие различна в зимний и летний периоды.

Другим возможным видом биотропных геомагнитных пульсаций могут быть утренние и дневные **пульсации *Pc5*** ($T=3...8$ мин, $f=2...5$ мГц), которые характеризуется чрезвычайно большими и резкими временными градиентами магнитного поля, что может быть очень важным. Скорость изменения магнитного поля у *Pc5* пульсаций составляет десятки нанотесла в минуту, что на 3 порядка больше, чем это наблюдается в магнитном поле во время умеренной магнитной бури.

Для геофизических целей был разработан специальный индекс планетарной интенсивности этих колебаний [Kozyreva et al., 2007], названный ULF-индексом (для геомагнитных пульсаций в иностранной литературе используется термин ULF — **Ultra Low Frequency**). **Прямое его использование в медико-биологических исследованиях, по-видимому, некорректно, поскольку ULF-индекс характеризует планетарную волновую активность в высоких широтах, а не локальную интенсивность в средних широтах, где проводится подавляющее большинство гелиобиологических исследований.** Поэтому нами была разработана новая методика вычисления часового и суточного индексов локальной активности *Pc5* геомагнитных пульсаций (осреднённое значение амплитуды за выбранный отрезок времени) для отдельно выбранной observa-

тории, наиболее близко расположенной к месту проведения медико-биологических исследований.

По разработанной методике были вычислены значения ULF-индекса для каждого дня 1979–1981 гг. и выполнен анализ возможной связи интенсификации *Pc5*-пульсаций во время магнитных бурь с обострениями сердечно-сосудистых заболеваний по данным вызовов скорой медицинской помощи в Москве. Результаты анализа показали, что восстановительная фаза почти каждой магнитной бури сопровождалась увеличением *Pc5*-пульсаций, а затем на следующий день или через 1–2 дня наблюдалось возрастание числа вызовов скорой медицинской помощи, иногда даже в отсутствие геомагнитных пульсаций *Pc1*. Однако в летние месяцы, во время магнитных бурь, несмотря на усиление *Pc5*- и *Pc1*-пульсаций, увеличения числа вызовов скорой медицинской помощи не отмечалось.

Заметим, что во время больших магнитных бурь возможно появление пульсаций *Pc5* в глобальном масштабе, особенно в послеполуночное время (например, [Клейменова, Козырева, 2005]). Такие пульсации наблюдаются одновременно от авроральных до средних широт с огромными амплитудами. Пример такого случая показан на рис. 7. Безусловно, было бы интересным провести исследование возможной биотропности таких пульсаций.

Анализ среднеширотных наблюдений пульсаций *Pc5* показал, что в сезонном ходе их амплитуд, как и в медицинских данных, наблюдается летний минимум, физического объяснения этому пока не найдено. В то же время каких-либо структурных различий между зимними и летними геомагнитными пульсациями не отмечено. Можно предположить, что возрастание амплитуд геомагнитных пульсаций диапазона *Pc5* может оказывать некоторое отрицательное влияние на ослабленные организмы, но это требует серьёзной экспериментальной проверки.

Дневные *Pc3–Pc4*-пульсации наблюдаются почти ежедневно как в магнитоспокойное, так и в возмущённое время. В ходе эволюции живые организмы должны быть адаптированы к этим пульсациям, не исключено, что *Pc3–Pc4*-пульсации могут быть синхронизаторами некоторых процессов в организмах. В то же время необычным для живых организмов должно быть внезапное исчезновение этих пульсаций, что происходит при определённых условиях в межпланетном магнитном поле. По неопубликованным данным, такие случаи негативно влияли на состояние психиатрических больных, на которых переставали действовать успокаивающие медикаменты.

Кроме того, опыты с цыплятами в инкубаторах с применением экранирования от *Pc3*-пульсаций показали, что по сравнению с контрольной группой, в экранированных инкубаторах появлялись цыплята с различного вида параличами. Эти единичные результаты нуждаются в серьёзной проверке.

Биотропное влияние других типов геомагнитных пульсаций к настоящему времени практически не исследовалось.

Следует заметить, что, поскольку периоды резонансных колебаний определяются геомагнитной широтой, они могут быть одним из характерных параметров окружающей среды в данной точке, т. е. быть привычными для проживающих в этом регионе людей. В таком случае можно предположить, что при переезде людей в места с другими значениями резонансных периодов такое изменение геомагнитного окружения будет оказывать некоторое негативное влияние на больных, т. е. ослабленные, организмы.

2.2. Возможная интерпретация

Поскольку интенсивность геомагнитных пульсаций очень мала по сравнению с величиной постоянного магнитного поля Земли, концепция воздействия естественных электромагнитных полей на живые организмы встречается с серьёзными трудностями. Кажется, что наиболее логичным механизмом является резонансное воздействие, когда частота геомагнитных пульсаций совпадает с собственной частотой в каком-то органе. Возможности резонансного и индукционного воздействия слабых магнитных полей на живые системы рассматривались в обзоре [Птицына и др., 1998]. Но эти механизмы не всегда применимы.

Одним из других возможных механизмов влияния может быть стохастический резонанс в теории переходов, индуцированных шумом (например, [Horsthemke, Lefever, 1984]), в котором слабые сигналы на уровне шума могут играть значительную роль в самоорганизации открытых нелинейных систем, каковыми являются биологические объекты, особенно чувствительные в состоянии неустойчивости. Но применение этой теории в магнитобиологии требует серьёзных исследований.

Представляет интерес и теория параметрического магнитного резонанса в биосистемах, предложенная в работе [Леднев, 1996], в которой рассматривается влияние колебаний магнитного поля на биологические объекты, исходя из представлений о воздействии таких полей на связанные ионы, влияющие на физиологические процессы в клетках.

В последние годы всё большее внимание исследователей привлекают сведения о важной роли гормона мелатонина [Анисимов, 2007; Бреус, Рапопорт, 2003; Комаров и др., 2004; Рапопорт, 2012]. Было установлено, что мелатонин играет ключевую роль в различных физиологических процессах и функциях организма. Изменения продукции мелатонина, строго следующие за изменениями светлого и тёмного времени суток, вызывают суточные и сезонные перестройки в организме человека и животных. По сути, это универсальный адаптивный гормон, который «подстраивает» внутренние часы организма к постоянно меняющимся условиям внешней среды. Роль мелатонина, по-видимому, велика и в сезонном ходе патологии сердечно-сосудистых заболеваний. Согласно выводам работы [Рапопорт, 2012] любые изменения продукции мелатонина, превышающие естественные физиологические колебания, могут привести к рассогласованию как внутренних биологических ритмов организма (внутренний дисинхроноз), так и с ритмами окружающей среды (внешний дисинхроноз), что может сопровождаться различными заболеваниями. В частности, нарушение продукции мелатонина может стать причиной синдрома внезапной смерти.

Синтез мелатонина осуществляется в шишковидной железе, т. е. в эпифизе [Arendt, 1995], и изменения светового освещения является основной причиной суточных вариаций продукции мелатонина. Максимальный уровень мелатонина отмечается в середине ночи (~2...3 MLT), а затем плавно снижается к рассвету до дневного, минимального уровня, который на порядок ниже ночного.

Практически серьёзных исследований влияния на продукцию мелатонина изменений космической погоды, одним из факторов которой являются геомагнитные пульсации, не проводилось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение характеристик геомагнитных пульсаций разных типов позволяет предположить, что пульсации могут быть биотропными. Отдельные экспериментальные результаты подтверждают возможность такого предположения. Однако для окончательного вывода необходимо проведение серьезных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [Анисимов, 2007] *Анисимов В. Н.* Мелатонин. Роль в организме, применение в клинике. СПб: Система, 2007. 40 с.
- [Большакова и др., 1995] *Большакова О. В., Боровкова О. К., Троицкая В. А., Клейменова Н. Г.* Интенсификация геомагнитных пульсаций $Pc4$ в условиях спокойной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1995. Т. 35. № 3. С. 143–145.
- [Бреус, Рапопорт, 2003] *Бреус Т. К., Рапопорт С. И.* Магнитные бури: медико-биологические и геофизические аспекты. М.: Советский спорт, 2003. 192 с.
- [Бреус и др., 1995] *Бреус Т. К., Халберг Ф., Корнелиссен Ж.* Влияние солнечной активности на физиологические ритмы биологических систем // Биофизика. 1995. Т. 40. Вып. 4. С. 737–749.
- [Иванова и др., 2002] *Иванова П., Клейменова Н. Г., Гамбурцев А. Г.* Смертность от инфаркта миокарда в Болгарии // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. С. 561–563.
- [Клейменова, 2007] *Клейменова Н. Г.* Геомагнитные пульсации // Модели космоса / Под ред. Панасюк М. И. М.: МГУ, 2007. Т. 1. С. 511–627.
- [Клейменова, Козырева, 2005] *Клейменова Н. Г., Козырева О. В.* Пространственно-временная динамика геомагнитных пульсаций $Pi3$ и $Pc5$ во время экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 года // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 1. С. 75–83.
- [Клейменова, Козырева, 2008] *Клейменова Н. Г., Козырева О. В.* Магнитные бури и инфаркты: всегда ли бури опасны? // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. № 3. С. 5–24.
- [Клейменова, Троицкая, 1992] *Клейменова Н. Г., Троицкая В. А.* Геомагнитные пульсации как один из экологических факторов среды // Биофизика. 1992. № 37. Вып. 3. С. 429–439.
- [Клейменова и др., 2007] *Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Бреус Т. К., Рапопорт С. И.* Сезонные вариации инфарктов миокарда и возможное биотропное влияние короткопериодных пульсаций геомагнитного поля на сердечно-сосудистую систему // Биофизика. 2007. Т. 52. Вып. 6. С. 1112–1119.
- [Комаров и др., 2004] *Комаров Ф. И., Рапопорт С. И., Малиновская Н. К., Анисимов В. Н.* Мелатонин в норме и патологии. М.: ИД «Медпрактика», 2004. 307 с.
- [Леднев, 1996] *Леднев В. В.* Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных магнитных полей // Биофизика. 1996. Т. 41. С. 224–234.
- [Матвеева, 1987] *Матвеева Э. Т.* Циклическая вариация активности геомагнитных пульсаций $Pc1$ // Геомагнетизм и аэрномия. 1987. Т. 27. № 3. С. 392–395.
- [Матвеева, Троицкая, 1965] *Матвеева Э. Т., Троицкая В. А.* Общие закономерности колебательного режима типа «жемчужин» // Геомагнетизм и аэрномия. 1965. Т. 5. № 6. С. 1078–1084.
- [Плеханов, 1990] *Плеханов Г. Ф.* Основные закономерности низкочастотной электромагнитной биологии. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1990. 188 с.

- [Плясова-Бакунина, Матвеева, 1968] *Плясова-Бакунина Т. А., Матвеева Э. Т.* Связь колебаний типа *Pc1* с магнитными бурями // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. № 1. С. 189–191.
- [Птицына и др., 1998] *Птицына Н. Г., Виллорези Дж., Дорман Л. И., Ючки Н., Тясто М. И.* Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // Успехи физич. наук. 1998. Т. 168. № 7. С. 767–791.
- [Пудовкин и др., 1976] *Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.: ЛГУ, 1976. 271 с.
- [Рапопорт, 2012] *Рапопорт С. И.* Биологические ритмы, мелатонин и его роль в клинике внутренних болезней // Мелатонин: перспективы применения в клинике / Под ред. Рапопорт С. И. М.: ИМА-ПРЕСС, 2012. Р. 40–56.
- [Темурьянц и др., 1992] *Темурьянц Н. А., Владимирский Б. М., Тишкин О. Г.* Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наукова думка, 1992. 188 с.
- [Троицкая, 1953] *Троицкая В. А.* Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли // Докл. АН СССР. 1953. Т. 91. № 2. С. 241.
- [Троицкая, Гульельми, 1969] *Троицкая В. А., Гульельми А. В.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физич. наук. 1969. Т. 97. С. 453–494.
- [Чижевский, 1933] *Чижевский А. Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1933. 439 с.
- [Arendt, 1995] *Arendt J.* Melatonin and the mammalian pineal gland. L.: Chapman and Hall, 1995. 331 p.
- [Borovsky, Denton, 2006] *Borovsky J. E., Denton M.* Differences between CME-driven and CIR-driven storms // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. A07S08. doi: 10.1029/2005JA011447.
- [Breus et al., 1995] *Breus T., Cornelissen G., Halberg F., Levitin A. E.* Temporal associations of life with solar and geophysical activity // Annales Geophysicae. 1995. V. 13. P. 1211–1222.
- [Horsthemke, Lefever, 1984] *Horsthemke W., Lefever R.* Noise-induced Transitions. Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology. Springer-Verlag, Berlin-Tokyo, 1984. 395 p.
- [Kim et al., 2005] *Kim K.-H., Takahashi K., Lee D.-H., Sutcliffe P. R., Yumoto K.* Pi2 pulsations associated with poleward boundary intensifications during the absence of substorms // J. Geophysical Research. 2005. P. 110. A01217, doi:10.1029/2004JA010780.
- [Kirschvink, Gould, 1981] *Kirschvink J. L., Gould J. L.* Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals // Biosystems. 1981. V. 13. P. 181–201.
- [Kleimenova et al., 2001] *Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Ivanova P., Matveeva E. T.* Relationship between the seasonal variations of the infarction mortality in Bulgaria and geomagnetic *Pc1* pulsations // Proc. 24th Annu. Seminar. Physics of Auroral Phenomena. March 2001, Apatity. 2001. P. 144–147.
- [Kleimenova et al., 2007] *Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Breus T. K., Rapoport S. I.* *Pc-1* geomagnetic pulsations as a potential hazard of the myocardial infarction // J. Atmospheric and Terrestrial Physics. 2007. V. 69. P. 1759–1764.
- [Kozyreva et al., 2007] *Kozyreva O., Pilipenko V., Engebretson M. J.* et al. In search of a new ULF wave index: Comparison of *Pc5* power with dynamics of geostationary relativistic electrons // Planetary and Space Science. 2007. P. 755–769.
- [Lipa et al., 1976] *Lipa B. G., Sturrock P. A., Rogot G.* Search for correlation between geomagnetic disturbances and mortality // Nature. 1976. V. 259. N. 5541. P. 302–304.

- [Pilipenko, 1990] *Pilipenko V.A.* ULF waves on the ground and in space // J. Atmospheric and Terrestrial Physics. 1990. V. 52. N. 12. P. 1193–1209.
- [Saito, 1969] *Saito T.* Geomagnetic pulsations // Space Science Reviews. 1969. V. 10. P. 319–412.
- [Troitskaya, 1964] *Troitskaya V.A.* Rapid variations of the electromagnetic field of the Earth // Geophysical Research. 1964. V. 1. N. 19. P. 485–532.
- [Watanabe et al., 1994] *Watanabe Y., Hillman D. C., Otsuka K.* et al. Cross-spectral coherence between geomagnetic disturbance and human cardiovascular variables at non-societal frequencies // Chronobiologia. 1994. V. 21. P. 265–272.

PULSATIONS IN GEOMAGNETIC FIELD AS AN IMPORTANT BIOTROPIC FACTOR OF THE SPACE WEATHER

N. G. Kleimenova^{1,2}

¹ Institute of the Earth Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Space Research Institute Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow, Russia,
e-mail: kleimen@ifz.ru

Geomagnetic pulsations play an important role in the energy transmission in the Solar wind — magnetosphere system. The spectral and seasonal characteristics of different types of the geomagnetic pulsations and their possible bio-efficacy are discussed. The pulsations classification, based on their periods, is given. The daytime pulsations (pulsations continues — *Pc*) are divided into *Pc1* ($T=0.2...5.0$ c), *Pc2* ($T=5...10$ c), *Pc3* ($T=10...45$ c), *Pc4* ($T=45...150$ c), *Pc5* ($T=150...600$ c). The average pulsation amplitudes increase with increasing of the periods. The night-time (pulsations irregular — *Pi*) are divided in *Pi1* ($T=1...40$ c), *Pi2* ($T=40...150$ c) and *Pi3* ($T>150$ c). The most typical day time pulsations are *Pc3–Pc4* types, they are observed practically every day, both during the quiet geomagnetic conditions as well as during magnetic storms.

Apparently, due to life evolution, the living organisms (except sick persons) should be adopted to the typical magnetosphere wave phenomena; however, non-typical events could give an unexpected respond. It is shown that not every magnetic storm is bio-effective, the magnetic storm bio-efficacy does not depend on the storm intensity as well as bio-efficacy of geomagnetic pulsations does not depend on their amplitudes. It is shown that the strongest negative influence of the magnetic storm wave disturbances on the sick organisms is observed in the winter time and in the storm recovery phase.

Some results of negative influence of geomagnetic pulsations on the human organisms are presented. The strongest biological effects could have the *Pc1* pulsations because their frequencies correspond to the frequencies of main heart rhythms. The comparison of data on ambulance calls in Moscow during 1979–1981 years on the occasion of the myocardial infarction (85,700 events) with the observational data catalog of *Pc1* showed that in ~70 % events an abnormal great number of the calls were accompanied by the presence of *Pc1*. The medical data demonstrated their clear season variations with the profound summer minimum and winter maximum. The same result we obtained analyzing the 25 year (1970–1995) statistical monthly data on the death from infarction Bulgaria. The estimated high correlation coefficient (0.84) between Moscow and Bulgarian data suggests their common reason.

Another type of biotrophic pulsations could be *Pc5* type because their very strong amplitude gradients. But, this problem is still not solved. There are no serious investigations of possible biotrophic effects of different types of geomagnetic pulsations, this problem requests the joined forces of geophysical and medical scientists.

Том 1

Часть 2

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА
И ЗДОРОВЬЕ ЛЮДЕЙ В КОСМОСЕ

ОРГАНИЗМ И СРЕДА В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЁТЕ

А. И. Григорьев

Государственный научный центр Российской Федерации —
Институт медико-биологических проблем Российской академии наук
(ГНЦ РФ ИМБП РАН), Москва, Россия, e-mail: grigoriev@imbpru

Человек находится в постоянном взаимодействии с окружающей его средой. Основные факторы внешней среды на Земле, совместимые с нормальной жизнедеятельностью организма, и их параметры изучены достаточно полно. В космических полётах к ним добавляется ряд экстремальных факторов. Одним из них является невесомость, к которой при использовании соответствующих методов и средств профилактики организм может достаточно успешно адаптироваться. Однако такие факторы космической среды как вакуум, низкие температуры, космическая радиация требуют создания специальных средств защиты. Кроме того, для пребывания в космических кораблях, на орбитальных космических станциях и при работе в скафандрах необходимо создание постоянно возобновляемой контролируемой искусственной среды. Это обеспечивает нормальную по химическому составу и физическим параметрам газовую среду, близкую по основным параметрам к атмосфере на Земле. В замкнутом пространстве космических аппаратов члены экипажа подвергаются взаимообмену микрофлоры, которая становится частью биоценоза «человек — микроорганизмы». В дальнейшем по мере включения в системы жизнеобеспечения биологических компонентов (**растений и животных**) среда в космических аппаратах усложнится, что потребует её мониторинга и регулирования. Отсутствие в межпланетных перелётах естественной на Земле суточной ритмики ставит задачу по изучению биоритмологических закономерностей и поиску оптимальной временной организации жизни и работы в космосе.

По мере освоения дальнего космоса организм человека встретится с рядом новых для него факторов — изменённой гравитацией, влиянием гипомангнитного поля, пылевыми бурями (на Марсе), возможным негативным воздействием токсических компонентов пыли и грунта планет.

Важно отметить, что факторы космических полётов действуют на организм не каждый в отдельности, а совместно. При этом особенное значение имеет комбинированное воздействие гипогравитации и космической радиации.

Особое значение в длительных орбитальных и, особенно, в межпланетных полётах имеет космическая радиация с широким спектром корпускулярных и волновых излучений. В этой связи космическая медицина должна решать непростые проблемы защиты космонавтов от солнечных вспышек, галактических космических лучей, исследовать влияние малых доз радиации.

В последние десятилетия биологи и медики проявляют большой интерес к влиянию солнечной активности на здоровье человека. Представляется, что происходящие на Солнце вспышки, вызывающие возмущение магнитного поля Земли, могут оказывать воздействие на психосоматическое состояние экипажей космических экспедиций и требуют детального изучения.

Таким образом, человек в космическом пространстве встречается с множеством воздействующих на него факторов. При этом космическая биология и медицина должны учитывать их значимость, динамику изменений, оценивать риск для здоровья, разрабатывать средства защиты и профилактики.

ORGANISM AND THE ENVIRONMENT IN SPACE FLIGHT

A. I. Grigoriev

Institute of biomedical problems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
e-mail: grigoriev@imbp.ru

Man is in constant interaction with its environment. The main factors of the environment on the Earth that are compatible with the normal functioning of the organism and its parameters are studied well enough. In space flight a number of extreme factors are added to them. One of them is weightlessness, to which, if an appropriate methods and means of preventing are used, the body can adapt quite well. However, factors such as the vacuum of space environment, low temperatures, cosmic radiation, requires special means of protection. In addition, in order to exist in the spacecraft or in orbital space stations and to work in special space suits, it is necessary to create a continuously renewable controlled artificial environment. This is providing the normal chemical composition and physical parameters of the gaseous medium, which is close to the main parameters of the atmosphere on the Earth. In a confined space of spacecraft crew members are exposed to the exchange of micro flora, which becomes part of the biocönose of «human – micro flora organisms.» In the future, due to the inclusion in the life-support systems of biological components (plants and animals), the environment in the spacecraft become more complicated and requires monitoring and regulation.

The absence in interplanetary flights natural for the Earth daily rhythms set the task to study the biorhythmological patterns and finding optimal temporal organization of life and work in space.

As the exploration of deep space will develop, human body can meet with a number of new factors for him — a modified gravity, the influence of hypomagnetic fields, dust storms (on Mars), the possible negative effects of toxic dust and soil components of the planets.

It is important to note that the aforementioned factors of space flight, does not acting on the human body separately from each other. The especially important is the combined effect of hypogravity and cosmic radiation.

In long-term orbital flights and, especially, in the interplanetary flights, cosmic radiation is particular important and it has a wide range of corpuscular and wave components. In this context, space medicine must solve complicated problems protecting astronauts from solar flares, galactic cosmic rays and to investigate the influence of small doses of radiation.

In recent decades, biologists and physicians have shown great interest in the influence of solar activity on human health. It seems that the flares taking place on the Sun, causing the perturbation of the magnetic field of the Earth, may have an impact on the psychosomatic condition of crews on space missions, and require detailed study.

Therefore, a man in space is encountering with many factors affecting him. A space biology and medicine must take into account their importance, the dynamics of changes, to evaluate the health risk and to develop means of protection and prevention.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ НА ДРУГИЕ ПЛАНЕТЫ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА МАРС-500)

Б. В. Морук, А. В. Суворов, М. С. Белаковский, Г. Ю. Васильева

Государственный научный центр Российской Федерации —
Институт медико-биологических проблем Российской академии наук
(ГНЦ РФ ИМБП РАН), Москва, Россия

С 3 июня 2010 г. по 4 ноября 2011 г. на базе ГНЦ РФ-ИМБП РАН под эгидой Роскосмоса и Российской академии наук был проведён уникальный эксперимент с изоляцией на 520 сут международного экипажа, состоящего из 6 человек — представителей России, Европейского космического агентства (ЕКА) и Китая. Этому эксперименту предшествовало широкое обсуждение программы исследований, его целей и задач, а также длительности перелёта, орбиты и того, что ожидает исследователей на поверхности Марса. В этом обсуждении приняли участие представители космических агентств и отдельных стран, а также различных организаций, включая сотрудников ИКИ РАН.

Целью эксперимента явилось изучение взаимодействия в контуре «человек — окружающая среда» и получение экспериментальных данных о состоянии здоровья и работоспособности человека, находящегося в условиях изоляции в герметично замкнутом пространстве ограниченного объёма при моделировании основных отличий и ограничений, присущих марсианскому полёту. К числу основных задач можно отнести: изучение влияния моделируемых условий пилотируемой марсианской экспедиции на здоровье и работоспособность экипажа; отработку организации деятельности экипажа и его взаимодействия с наземным центром управления при моделировании особенностей; отработку принципов, методов и средств контроля за средой обитания; отработку принципов, методов и средств диагностики и прогнозирования состояния здоровья и работоспособности, оказания медицинской помощи, средств сбора, обработки и анализа медицинской и физиологической информации, средств профилактики; апробацию элементов справочно-информационной системы; отработку средств и методов телемедицины для дистанционного контроля за состоянием здоровья человека; апробацию методов и автономных средств психологической поддержки.

Естественно, что в наземном эксперименте с участием испытуемых были смоделированы не все факторы, с которыми столкнётся человек при межпланетном перелёте. Тем не менее, успешное завершение проекта МАРС-500 позволяет с оптимизмом оценивать перспективы и возможности человека для выполнения такой миссии. Полученные уроки будут положены в основу разработки системы медицинского обеспечения будущих длительных автономных полётов, например, на Марс.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших мотивов космической деятельности человечества является стремление расширить масштабы научных исследований и обеспечить получение новых знаний.

Исследование окрестностей собственного «дома» — от Мирового океана до космического пространства — было одним из элементов развития цивилизации.

Изучение Марса поможет в значительной степени прогнозировать развитие Земли, продвинуться в проблеме происхождения жизни. Это — познание окружающего мира.

Надёжность выполнения программы межпланетного полёта и благополучное возвращение экипажа на Землю будет в значительной степени зависеть от сохранения здоровья и работоспособности космонавтов, при этом подходы к организации жизни и деятельности экипажа марсианской экспедиции

будут иными, отличными от орбитальных полётов. Повышенная продолжительность, приводящая к накоплению (кумуляции) эффектов действия факторов космического полёта, увеличению вероятности развития острых и хронических заболеваний, травм; суммарное увеличение времени, свободного от профессиональной деятельности, требует совершенствования средств и методов медицинского обеспечения, организации оптимального и гибкого режима труда и отдыха на различных этапах миссии. Автономность полёта, предполагающая невозможность прекращения миссии по медицинским показаниям и оказания космонавтам экстренной медицинской и психологической помощи, в том числе невозможность замены членов экипажа, диктует нам необходимость высокой степени прогнозирования медицинских рисков на основе полноценного обобщения данных наземных и полётных исследований, наличия у экипажа эффективных средств для оказания специализированной медицинской помощи, а также необходимость создания и использования бортового медицинского (медико-инструментального) центра с развитой системой телемедицины [Газенко и др., 1990; Гончаров и др., 2001; Орлов и др., 2012]. На основе ранее проведённых исследований [Гущин, Пустынникова, 2001; Виноходова и др., 2001; Tomi, 2001] можно предположить, что постоянство состава экипажа в течение сверхдлительного полёта приведёт или к увеличению вероятности межличностных конфликтов, или, напротив, к увеличению эффективности совместной групповой деятельности для лучшего выполнения программы полёта.

Принципиально новые полётные операции, в частности работа на поверхности Марса, а также изменение конфигурации космической станции, появление автоматизированных рабочих мест и новых функциональных помещений, — всё это определяет обязательность наземной тренировки посадки на Марс и деятельности на его поверхности, разработки надёжных средств контроля за состоянием физиологических систем во время выхода на поверхность Марса [Суворов, 2012; Цыганков, Дёмин, 2012], создание бортовых стендов тренировки и поддержания навыков операторской деятельности в различных условиях с оценкой физиологической эффективности, разработку и реализацию новейших психофизиологических средств оптимизации взаимодействия в системах человек — машина, принципов эргономики, технического и художественного дизайна при компоновке отсеков и рабочих зон [Зинченко, Мунипов, 1979]. Задержка прохождения сигнала, скорости и объёма операционально-информационного обмена между экипажем и наземными службами, жёстко ограниченные информационные ресурсы обуславливают необходимость их совершенствования на борту для компенсации информационного дефицита и ограниченных социальных контактов. Лимитированные ресурсы жизнеобеспечения приводят к разработке специальных средств учёта потребляемых ресурсов, необходимых для обеспечения нормальной жизнедеятельности экипажа.

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель эксперимента — изучение взаимодействия в контуре человек — окружающая среда и получение экспериментальных данных о состоянии здоровья и работоспособности человека, находящегося в условиях изоляции в герметично

замкнутом пространстве ограниченного объёма при моделировании основных отличий и ограничений, присущих марсианскому полёту.

При проведении исследований для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение влияния моделируемых условий пилотируемой марсианской экспедиции на здоровье и работоспособность экипажа;
- отработка организации деятельности экипажа и его взаимодействия с наземным центром управления при моделировании особенностей, присущих марсианскому полёту;
- отработка принципов, методов и средств контроля и мониторинга среды обитания;
- отработка принципов, методов и средств контроля, диагностики и прогнозирования состояния здоровья и работоспособности, оказания медицинской помощи, средств сбора, обработки и анализа медицинской и физиологической информации, средств профилактики;
- апробация элементов справочно-информационной системы;
- отработка средств и методов телемедицины для дистанционного контроля за состоянием здоровья человека;
- апробация методов и автономных средств психологической поддержки;
- оценка современных технологий систем и средств обеспечения жизнедеятельности и защиты человека.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с задачами проекта МАРС-500 была подготовлена и выполнена программа научных исследований в 14-, 105- и 520-суточной изоляции в гермообъёме.

В исследовании с 520-суточной изоляцией приняли участие шесть здоровых мужчин-добровольцев — представителей России, ЕКА, Китая, — признанных годными по состоянию здоровья и давших добровольное информированное согласие на участие в эксперименте в соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). Протоколы исследований были одобрены этическим комитетом по каждому пункту в соответствии с принципами Хельсинкской декларации.

Добровольцы находились в изоляции в течение всего периода эксперимента. Средний возраст обследуемых составил 32 года (от 27 до 38 лет).

Задачи эксперимента решались включением в научную программу эксперимента исследований, позволяющих прямым или косвенным образом получить ответы на поставленные вопросы, связанные с особенностью и условиями проведения марсианской экспедиции (большая продолжительность; высокая степень автономности, что предполагает самоконтроль всей жизнедеятельности экипажа, включая контроль состояния здоровья, психологического состояния и работоспособности; длительное пребывание экипажа в условиях социальной изоляции, ограниченного пространства и отрыва от земных условий жизни; высокая степень ответственности за успех миссии в сочетании со значительным риском). Приоритет был отдан исследованиям, которые направлены на решение проблем медико-биологического обеспечения полёта человека на Марс.

Во время 520-суточной изоляции проведено 106 исследований. Периодичность исследований составляла 30...60 дней, в зависимости от поставленных задач. В проекте принимали участие исследовательские группы из России и 15 зарубежных стран. Перед началом исследований была проведена серия тренировок, длительность которых составила 30...60 сут, и дан подробный инструктаж с целью выработки у добровольцев устойчивого навыка работы с экспериментальными методиками (рис. 1, 2). Деятельность экипажа по выполнению научных исследований во время периода изоляции была оценена положительно.

Содержание и общий объём проведённых исследований представлен в таблице.

Структура научных исследований,
проводимых во время 520-суточной изоляции

Направление исследований	Количество экспериментов			Общее количество
	Россия	ЕКА	Китай	
Клинико-физиологические и физиологические	17	3	6	26
Психологические и психофизиологические	17	7	3	27
Биохимические, иммунологические и биологические	24	3	7	34
Микробиологические и санитарно-гигиенические	7	1	—	8
Операционно-технологические	10	1	—	11
Общее количество	74	15	16	106

Эксперимент проводился на базе медико-технического комплекса (МТК). Экспериментальные модули (рис. 3), входящие в состав МТК, предназначены для проведения экспериментов с участием испытуемых в условиях искусственно регулируемой среды обитания.

Медико-технический комплекс включал в себя следующие системы и установки:

- экспериментальные установки (модули) — ЭУ-50, ЭУ-100, ЭУ-150 и ЭУ-250;
- имитатор марсианской поверхности (ИМП);
- скафандровая;
- наземный центр управления экспериментом;
- система обеспечения жизнедеятельности (СОЖ) экспериментальных модулей;
- инженерные системы корпуса (кондиционирования, энергоснабжения, холодоснабжения, пожаротушения, пожарной сигнализации и т. д.).

Параметры среды в отсеках, определяющие физиологически комфортное соотношение основных компонентов газовой среды и их общее давление, соответствовали российскому стандарту «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате» [ГОСТ..., 1995].

Суточная калорийность рационов питания составляла 2500...3020 ккал. Водопотребление добровольцев не ограничивалось и составляло 1500...2000 мл жидкости в сутки.



Рис. 1. Работа испытателя с растениями в оранжерее



Рис. 2. Проведение испытателями исследований физической работоспособности

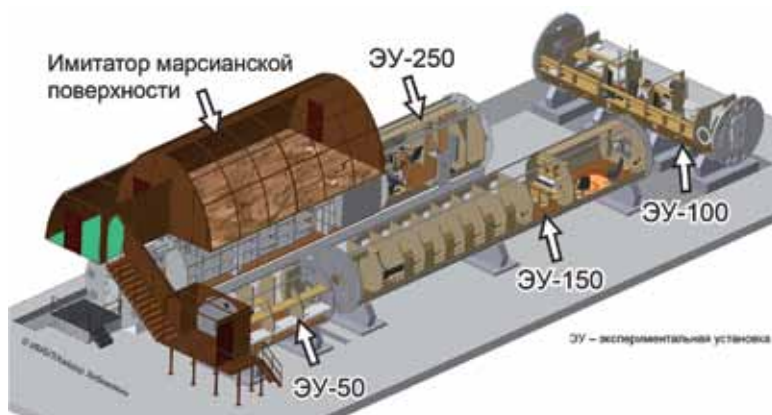


Рис. 3. Схема медико-технического комплекса

Адекватность предлагаемых норм содержания пищевых веществ и энергетическая ценность экспериментальных рационов потребностям организма человека была подтверждена при проведении в ГНЦ РФ-ИМБП РАН многочисленных модельных экспериментов, а также при оценке пищевого статуса космонавтов в условиях реальных длительных полётов на орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции (МКС).

При разработке рационов питания для экипажа эксперимента МАРС-520 учитывали результаты, полученные при обеспечении питанием испытателей в проведённом ранее исследовании со 105-суточной изоляцией. Разработанные для использования в данном эксперименте рационы по содержанию необходимых организму человека пищевых веществ соответствовали принятым физиологическим нормам для контингентов, чья профессиональная деятельность по энерготратам относится к категории средней тяжести. Пищевой состав рационов отвечал рекомендациям ВОЗ, а также согласованным российско-американским нормам по пищевому составу рационов питания для экипажей Международной космической станции. В представленных фирмами-изготовителями сопроводительных документах на продукты имелись все необходимые сведения об их пищевом составе, микробиологической и токсикологической безопасности и гарантийных сроках хранения. На разных этапах эксперимента было использовано 279 наименований продуктов.

Общая масса размещённого в объекте запаса продуктов составила 6450 кг, из них 3500 кг — масса продуктов для первых 250 сут эксперимента и 2950 кг — для последующих 270 сут.

3. ЭТАПЫ ПЕРИОДА ИЗОЛЯЦИИ

Основными особенностями отдельных этапов 520-суточного эксперимента с изоляцией, моделирующего пилотируемый полёт к Марсу, были:

- «полёт» по спиральной траектории в поле тяготения Земли — 2–50-е сут эксперимента (использование всех видов связи, включая голосовую);
- «полёт» по гелиоцентрической орбите до окрестности Марса — 51–200-е сут эксперимента (возрастающее время прохождения радиосигнала Земля — межпланетный комплекс от 8 до 193 с, исключение голосовой связи между наземным центром управления и экипажем, переход на регламентированную электронную пакетную связь два раза в сутки);
- «полёт» по спиральной траектории в поле тяготения Марса («скрутка») — 201–246-е сут эксперимента (возрастающее время прохождения радиосигнала Земля — межпланетный комплекс от 193 до 281 с, наземный центр управления и экипаж используют регламентированную электронную пакетную связь два раза в сутки);
- «полёт» по околомарсианской орбите со спуском экипажа взлетно-посадочного модуля на поверхность планеты (рис. 4) и его последующим возвращением на межпланетный комплекс — 247–278-е сут эксперимента (время прохождения радиосигнала Земля–межпланетный комплекс от 281 до 389 с, разделение экипажа на две самостоятельные изолированные группы; имитация выходов на поверхность Марса группы



Рис 4. Работа испытателей на «поверхности Марса»

- из двух испытателей; использование телефонной связи между экипажем взлетно-посадочного модуля и тремя членами экипажа, находящимися в макете марсианского комплекса; экипаж взлетно-посадочного модуля подвергается 5-суточному карантину; после завершения карантина экипаж взлетно-посадочного модуля переходит в межпланетный комплекс; центр управления и экипаж используют регламентированную электронную пакетную связь два раза в сутки);
- «полёт» по спиральной траектории в поле тяготения Марса («раскрутка») — 279–319-е сут эксперимента (время прохождения радиосигнала Земля – межпланетный комплекс от 389 до 573 с, центр управления и экипаж используют регламентированную электронную пакетную связь два раза в сутки);
 - «полёт» по гелиоцентрической орбите до окрестности Земли — 320–470-е сут эксперимента (возрастание времени прохождения радиосигнала Земля – межпланетный комплекс от 573 до 736 с на 351-е сут с последующим уменьшением до 0 с, центр управления и экипаж используют регламентированную электронную пакетную связь два раза в сутки);
 - «полёт» по спиральной траектории в поле тяготения Земли — 471–520-е сут эксперимента (использование всех видов связи, включая голосовую).

4. НАУЧНАЯ НОВИЗНА, РЕЗУЛЬТАТЫ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Научная новизна исследования состоит в том, что на основании данных, полученных при многостороннем изучении возможных эффектов воздействия отдельных моделируемых факторов сверхдлительной межпланетной экспедиции,

проведён комплексный анализ физиологической и психологической адаптации организма здоровых добровольцев к условиям 520-суточной изоляции в гермообъеме с изменённой газовой средой. Проведённое исследование имеет и практическую ценность, так как позволяет определить и предложить показатели для формирования прогностических критериев получения объективной информации о состоянии организма человека на различных этапах межпланетного полёта.

В ходе эксперимента было показано, что участие в 520-суточном эксперименте с пребыванием в условиях изоляции в гермообъеме (медико-техническом комплексе) не имело неблагоприятных последствий для здоровья членов экипажа. Эксперимент позволил разработать рекомендации по системе ежедневного, углублённого ежемесячного и экспертного медицинского контроля с использованием телемедицинских методов обследования, диагностики и прогнозирования состояния здоровья экипажа, разработать стоматологическую укладку для оказания специализированной помощи при заболеваниях зубов и слизистой полости рта, определить набор оборудования и медикаментов для оказания реанимационной помощи и необходимый состав отоларингологического и офтальмологического инструментария, средств и методов лабораторной диагностики и лечебной аппаратуры для длительных экспедиций [Воронков и др., 2012; Ковачевич, Рукавишников, 2012].

Для более правильной организации психологической поддержки экипажа в процессе эксперимента была создана и функционировала единая группа психологов [Шевченко и др., 2012], включавшая представителей ИМБП и Европейского космического агентства, которая проводила анализ психологического состояния экипажа и вырабатывала согласованные рекомендации, при этом психологическую поддержку европейским членам экипажа обеспечивал психолог ЕКА, российской части экипажа — психолог ИМБП, китайского участника эксперимента — психолог ИМБП совместно с представителями Китая. Группой проводилось совместное формирование блоков новостей (на русском, английском, китайском языках), включая новости по науке, космонавтике, технике, спорту и т. п., с учётом интересов и запросов всех членов экипажа.

Использование критериев ранней диагностики и прогнозирования неблагоприятных психологических ситуаций позволило применять средства профилактики на самых ранних этапах и не допустить нервно-психических расстройств человека, развития конфликтной ситуации в группе, дезорганизации деятельности целого экипажа и его членов. Экипаж функционировал как единое целое. Не было отмечено разделения экипажа на группы по языковой принадлежности. Конфликтных ситуаций внутри экипажа не наблюдалось. Отношения носили доброжелательный характер. Уровень работоспособности экипажа был высоким, психическая астенизация и утомление членов экипажа находились в допустимых пределах.

По результатам исследований в проекте МАРС-500 был сформулирован ряд принципов, направленных на совершенствование системы группового психологического отбора и подготовки экипажа с учётом основных ограничений, присущих пилотируемой межпланетной экспедиции [Шевченко, 2012].

Известно, что в реальном межпланетном космическом полёте условия для хранения продуктов питания и возможности технических средств для приготовления пищи на борту космического корабля будут весьма ограничены,

но апробированная в проекте система питания с применением максимально подготовленных к употреблению продуктов с большими гарантийными сроками хранения с рациональным содержанием незаменимых пищевых компонентов и их соотношение способствовали сохранению здоровья испытателей [Агуреев, Сидоренко, 2012].

Предложенная и испытанная в проекте система физических тренировок (рис. 2), необходимая для сохранения и поддержания физической активности позволила поддерживать высокий уровень работоспособности и выносливости членов экипажа [Фомина и др., 2012].

В проекте МАРС-500 с участием добровольцев-испытателей были смоделированы не все факторы космического полёта, с которыми столкнётся человек при межпланетной экспедиции. Тем не менее успешное завершение эксперимента позволяет с оптимизмом оценивать перспективы и возможности человека для выполнения такой миссии. Полученные результаты будут положены в основу дальнейших исследований для разработки системы медико-психологического обеспечения и усовершенствования систем жизнеобеспечения сверхдлительных межпланетных полётов.

ЛИТЕРАТУРА

- [Агуреев, Сидоренко, 2012] *Агуреев А. Н., Сидоренко Л. А.* Разработка и апробация системы обеспечения питанием экипажа проекта МАРС-500 // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): Сб. материалов. М., 2012. С. 5.
- [Виноходова и др., 2001] *Виноходова А. В., Быстрицкая А. Ф., Еськов К. Н.* Изучение влияния особенностей межгруппового взаимодействия на межличностные отношения и групповую эффективность в условиях длительной изоляции) // Модельный эксперимент с длительной изоляцией: проблемы и достижения. М.: Слово, 2001. С. 114.
- [Воронков и др., 2012] *Воронков Ю. И., Тихонова Г. А., Кузьмин М. П.* и др. Медицинская экспертная оценка здоровья испытателей-добровольцев в экспериментах с длительной изоляцией // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 16.
- [Газенко и др., 1990] *Газенко О. Г., Григорьев А. И., Егоров А. Д.* Медицинские исследования по программе длительных пилотируемых полётов на орбитальном комплексе «Салют-7» – «Союз-Т» // Космич. биология и авиакосмич. медицина. 1990. Т. 24. № 2. С. 9–15.
- [Гончаров и др., 2001] *Гончаров И. Б., Орлов О. И., Попова И. И.* и др. Применение телемедицинских технологий для обеспечения экипажей замкнутых объектов (по результатам эксперимента SFINCSS-99) // Модельный эксперимент с длительной изоляцией: проблемы и достижения. М.: Слово, 2001. С. 531.
- [ГОСТ..., 1995] ГОСТ №Р 50804-95. ИПК Издательство стандартов. 1995.
- [Гущин, Пустынникова, 2001] *Гущин В. И., Пустынникова Ю. М.* Некоторые проблемы психического взаимодействия при моделировании длительных полётов // Модельный эксперимент с длительной изоляцией: проблемы и достижения. М.: Слово, 2001. С. 85.
- [Зинченко, Мунипов, 1979] *Зинченко В. П., Мунипов В. Н.* Основы эргономики. М.: Изд-во МГУ, 1979. 244 с.

- [Ковачевич, Рукавишников, 2012] *Ковачевич И. В., Рукавишников И. В.* Система неотложной медицинской помощи в 520-суточном эксперименте, моделирующем полёт к Марсу // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 30.
- [Орлов и др., 2012] *Орлов О. И., Баевский Р. М., Пугачёв В. И.* и др. Телемедицинские технологии в долговременных медико-экологических исследованиях по проекту МАРС-500 // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 47.
- [Суворов и др., 2012] *Суворов А. В., Дьяченко А. И., Попова Ю. А.* и др. Комплексная оценка кардиореспираторной системы человека // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 62.
- [Фомина и др., 2012] *Фомина Е. В., Чернова М. В., Лысова Н. Ю., Уськов К. В.* Профилактика негативных эффектов изоляции посредством физических упражнений // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 67.
- [Цыганков, Дёмин, 2012] *Цыганков О. С., Дёмин Е. П.* Моделирование деятельности экипажа на поверхности в эксперименте МАРС-520 // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 69.
- [Шевченко, 2012] *Шевченко О. И.* Структура психологического отбора и подготовки экипажей в проекте МАРС-500 // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 74.
- [Шевченко и др., 2012] *Шевченко О. И., Кузнецова Е. П., Волосюк Ю. А., Волошин О. В.* Организация психологической поддержки в проекте «Марс-500» // Международ. симп. по результатам экспериментов, моделирующих пилотируемый полёт на Марс (МАРС-500): сб. материалов. М., 2012. С. 74.
- [Tomi, 2001] *Tomi L.* The role of cross-cultural factors in long-duration international space mission: lesson from the SFINCSS study // Модельный эксперимент с длительной изоляцией: проблемы и достижения. М.: Слово, 2001. С. 132.

SIMULATION OF MANNED SPACE FLIGHTS TO OTHER PLANETS (ON THE EXAMPLE OF MARS-500)

B. V. Morukov, A. V. Suvorov, M. S. Belakovskiy, G. Y. Vassilieva

State Scientific Center of Russian Federation — Institute of Biomedical Problems
of the Russian Academy of Sciences (SSC RF-IBMP RAS)

An important stage in space exploration and bringing closer the era of interplanetary manned expeditions was MARS-500 project — a series of experiments, conducted from 2008 till 2011 in SSC — Institute of biomedical problems of RAS jointly with foreign partners with the support of the Russian academy of sciences and Roscosmos.

Reliability of performance of an interplanetary flight program and safe returning of the crew will depend in significant degree on preservation of health and working capacity of cosmonauts. The article deals with the issues of approach to the organization of long-term interplanetary flights, in particular, of the Martian flight, and also factors, effecting the crew of such expedition. The aim of the experiment was studying of interaction in the counter “human — environment” and obtaining of the experimental data about the state of health and

working capacity of humans, staying in conditions of isolation in pressurized confined environment during simulation of the main differences and limitations, typical for the Martian flight.

According to the tasks of MARS-500 project, the program of scientific investigations in 14-, 105- and 520-day isolation in pressurized environment was prepared and implemented.

In the investigation with 520-day isolation 6 healthy men-volunteers participated, that had been considered fit on the state of health and who had given voluntary informed consent on participation in the experiment according to WHO recommendations. The experiment was conducted at the premises of the medical-technical facility, meant for conduction of experiments with participation of investigators in conditions of artificially regulated habitat.

The food rations on the content of necessary for the human organism nutrients complied with the accepted physiological norms for contingents, whose professional activity on energy expenditure refers to the category of medium gravity. The food composition complied with the recommendations of the World health organization (WHO), and also agreed upon Russian-American norms on the food composition of the food rations for ISS crews. The daily caloricity of the food rations was 2500...3020 kcal. Water consumption of the volunteers was not limited and was 1500...2000 ml of liquid daily.

On the basis of the data, received during multisided studying of possible effects of the influence of separate simulated factors of over-long interplanetary expedition, complex analysis was conducted of physiological and psychological adaptation of healthy volunteers' organism to the conditions of 520-day isolation in pressurized environment with changed gas media. The conducted investigation has an important practical significance, as it allows to determine and propose indices for forming of prognostic criteria for obtaining of objective information about the state of human organisms at different stages of an interplanetary flight.

СПЕЦИФИКА ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО РИСКА ПРИ ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ В ПОЛЁТЕ

И. Б. Ушаков, В. М. Петров, А. В. Шафиркин

Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ ИМБП РАН), Москва, Россия, e-mail: petrov@imbp.ru; vpetrov2009@yandex.ru

В работе рассмотрены основные источники радиационной опасности при осуществлении межпланетных полётов, специфические дозовые функционалы, наиболее адекватно описывающие процессы формирования радиационного поражения и восстановления организма в условиях, когда космонавты подвержены сложному радиационному воздействию как по составу, так и пространственно-временному характеру распределения доз. В ней представлены величины радиационных рисков в процессе полёта, а также суммарного в течение жизни с учётом отдалённых неблагоприятных последствий. Рассматриваются основные неопределённости в расчётных величинах радиационного риска с позиции возможной его недооценки. В условиях межпланетного полёта в период максимума солнечной активности (СА) за толщинами защиты космического корабля в пределах 1...20 г/см² алюминия дополнительный радиационный риск в процессе полёта может составить от 55 до 14 % от демографического риска за тот же промежуток времени (демографический риск смертности для когорты данного возраста). С увеличением толщины защиты этот радиационный риск значительно снижается. При реальных значениях толщины защиты радиационного убежища (РУ) — от 10 до 20 г/см² — радиационный риск в процессе полёта снижается с 20 до 14 % от демографического. Дальнейшее увеличение толщины защиты радиационного убежища в предположении гипотетической минимальной толщины защиты обитаемых модулей 1 г/см² не изменяет величину радиационного риска из-за преобладающего вклада ГКЛ в суммарную обобщённую дозу. Величины радиационного риска для космонавтов в процессе орбитальных полётов на станции «Мир» и Международной космической станции (МКС) в периоды максимума и минимума солнечной активности оцениваются равными от 3,8 до 5,6 % от демографического риска соответственно.

Оценки суммарного радиационного риска в течение всей жизни космонавтов являются значительно более высокими. Суммарный радиационный риск представляет собой увеличение смертности к 70 годам, вызванное облучением, и включает опухоли и другие причины повышенной смертности. В работе представляются результаты вычислений суммарного радиационного риска для космонавтов в течение жизни и оценки возможного сокращения средней предстоящей продолжительности жизни (СППЖ) на основе обобщённой дозы, вычисленной после длительных межпланетных полётов с использованием математических выражений, вытекающих из модели радиационной скорости смертности млекопитающих после радиационных воздействий. Также представляются оценки риска развития опухолей в течение жизни. Анализируются зависимости упомянутых выше неблагоприятных отдалённых радиационных последствий от длительности полёта, толщины защиты космического аппарата, цикла солнечной активности и возраста космонавтов в начале космической деятельности.

Вычисления суммарного радиационного риска в течение жизни космонавтов показали, что он не зависит от их возраста и в 20...30 раз превышает риск в процессе полёта. Суммарный радиационный риск в течение жизни космонавтов в 3...8 раз превышает оценки риска опухолей. Изучение отдалённых последствий у выживших в Японии в результате атомных бомбардировок и эпидемиологические данные (обследования работников, связанных с профессиональным облучением) показали увеличение с поглощённой дозой риска смертности, не связанной с канцерогенезом. Имело место повышение смертности из-за сердечно-сосудистых и неврологических заболеваний, развития нарушений кровообращения и повышение частоты инсультов.

ВВЕДЕНИЕ

При осуществлении межпланетного полёта на экипаж будут оказывать воздействие все источники космической радиации: галактические космические лучи (ГКЛ), солнечные космические лучи (СКЛ), радиационные пояса Земли (РПЗ) при сборке и раскрутке корабля и вторичные нейтроны. Характер воздействия — потоки атомных ядер со спектром линейной передачи энергии (ЛПЭ) до 10^4 кэВ/мкм, энергией до 10^{19} эВ, режимом облучения — комбинированное: хроническое, фракционированное, подострое. Суточные значения доз могут варьировать в широких пределах от единиц миллизиверт в сутки до 10 Зв/сут. При этом радиобиологический эффект может модифицироваться влиянием других неблагоприятных факторов полёта. Естественно, что для корректной оценки опасности и для моделирования её в наземных условиях следует учитывать перечисленные выше особенности облучения в космосе.

В связи с требованием высоконадёжного обеспечения радиационной безопасности человека в межпланетном полёте возникает необходимость максимально точной оценки последствий соответствующего облучения человека. На современном этапе развития космонавтики в связи с существенным увеличением длительности полётов и сложности выполняемых полётных программ значительно возрастают требования к обеспечению безопасности экипажей, в том числе и в плане обеспечения «медицинской» безопасности. Естественным путём решения этой проблемы является нормирование воздействия неблагоприятных факторов космического полёта, основанное на оценке возможных эффектов этого воздействия, проявляющихся как в процессе полёта, так и после его завершения. Мероприятия, выполняемые на этапе создания и последующей эксплуатации космического аппарата в полёте и направленные на соблюдение этих нормативов, составляют техническую и организационную компоненты безопасности полёта. Однако основой для них являются всё же нормативы, учитывающие, с одной стороны, требование обеспечения выполнения программы полёта (польза) и, с другой стороны, — ограничение вероятности нарушения здоровья и жизни космонавтов (риск). Подходы к решению этой проблемы рассматривались в литературе, и в дальнейшем изложении мы воспользуемся количественными оценками некоторых регламентируемых величин, представленными в работе [Ковалёв, 1976]. Подчеркнём, что эти оценки приведены в качестве примера, дающего представление о масштабе возможных значений предлагаемых нормативов. Реальные значения нормативов должны устанавливаться, по-видимому, исходя из большого количества социальных, технических и экономических факторов, компетентными органами и, возможно, для каждого класса космических полётов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКА

При разработке концепции радиационной опасности и методов расчёта радиационного риска для космических полётов, как мы полагаем, необходимо, в частности, учитывать:

- сложный по составу и качеству спектр воздействующих источников ионизирующих излучений;

- соматические эффекты и нарушение работоспособности, вызванные ионизирующей радиацией;
- восстановительные процессы в организме, поскольку имеет место длительный характер облучения от разных источников ионизирующих излучений с различной мощностью дозы;
- различный характер макропространственного распределения дозы по телу от различных источников излучений в космическом пространстве и на борту корабля;
- изменение радиочувствительности организма в процессе полёта, поскольку радиационное воздействие осуществляется на различных этапах адаптированности организма к нерадиационным факторам полёта (невесомость, изменённая газовая среда, изоляция, психологический стресс, гипомагнитная среда и др.).

Рассмотрим с учётом изложенного смысловое содержание основной величины — «радиационный риск», которая используется для оценки опасности. Эта величина должна давать меру вредных эффектов, обусловленных некоторым определённым радиационным воздействием на организм. С этой точки зрения важно проанализировать смысловые акценты, вкладываемые в это понятие, и возможные его модификации, связанные с особенностями применения в целях оценки радиационной опасности в космическом полёте.

С учётом рассмотренных выше концептуальных, научных и методических сторон вероятностной оценки поражения организма ионизирующими излучениями можно предложить следующее определение радиационного риска, предполагая, что эта величина, прежде всего, должна способствовать решению проблемы обеспечения радиационной безопасности.

Радиационный риск — это количественная мера радиационной опасности, определяемая увеличением вероятности смерти индивидуума в течение рассматриваемого отрезка времени, обусловленной специфическими неблагоприятными последствиями облучения, проявляющимися на всех уровнях организации — от клеточного до организменного, в течение всего рассматриваемого периода.

Наряду с указанными выше неблагоприятными последствиями (радиационным риском) могут рассматриваться и другие обобщённые критерии, связанные с нанесением ущерба здоровью человека. В качестве меры этого ущерба может быть выбрано, например, сокращение средней предстоящей продолжительности жизни.

Рассмотрим эти чрезвычайно важные для оценки возможных последствий облучения и установления количественных нормативов безопасности две величины: обобщённый индивидуальный риск R_1 и обобщённый ущерб здоровью G_1 [Дёмин и др., 1991]. Первый даёт суммарную вероятность смерти за установленное время T и определяется выражением

$$R_1(a, H_E) = \int \Phi(a+t, H_E) [h_c(t, H_E) + kh_3(t, H_E)] dt, \quad (1)$$

где t — время, отсчитываемое от момента облучения индивидуума в возрасте a ; h_c и h_3 — плотность «чистых» вероятностей смерти и заболевания, обусловленных данным воздействием; $\Phi(a+t)$ — вероятность человеку в возрасте a дожить до возраста $a+t$ при отсутствии радиационного воздействия.

Вероятность $\Phi(a+t)$ определяется через вероятность $H'(t)$ индивидуума дожить до заданного момента времени и число равно отношению $H'(a+t)/H'(a)$. Коэффициенты k сопоставляют риск смерти и заболевания, так что выражение в скобках в (1) можно рассматривать как обобщённую плотность вероятности смерти к моменту t после облучения индивидуума дозой H_E (по существу, как некоторый эквивалент выражения (1)). Под обобщённым ущербом здоровью понимают математическое ожидание сокращения предстоящей жизни T_d . С использованием введённых выше обозначений оно определится выражением

$$T_D = \int h_{n,r}(t, H_E) dt. \quad (2)$$

Можно показать [Быков, Дёмин, 1991], что сокращение продолжительности жизни $\Delta T(a, H_E)$ индивидуума, облучённого мгновенной дозой H_E в возрасте a , даётся выражением

$$G_1(a, H_E) = \Delta T(a, H_E) = \frac{1}{H_n(a)} \int_0^{\infty} H_n(a+t) H_r(t, H_E) dt. \quad (3)$$

Аналогичным образом может быть учтено сокращение продолжительности жизни, вызванное различными, связанными с облучением неспецифическими заболеваниями. В этом случае потерянное в результате заболевания (без летального исхода) время переводится на время сокращения предстоящей жизни умножением на соответствующий переводной коэффициент K [Быков, Дёмин, 1991]. Сопоставление выражений (1) и (3) показывает, что они различаются структурой, но входящие в них зависимости одинаковы. Поэтому выбор величин, характеризующих радиационную опасность, не оказывает особого влияния на пути их получения.

Радиационный риск — традиционная величина, используемая для оценки степени радиационного поражения человека, облучённого ионизирующим излучением. В наземной практике он определяется вероятностью смерти, обусловленной радиобиологическими последствиями облучения. Такой подход обусловлен, прежде всего, возможностью регулировать процесс облучения человека в нормальных условиях работы и существовать в соответствии с режимом его работы.

В условиях радиационной аварии человек может быть эвакуирован с полным исключением дальнейшего облучения. В космическом полёте большинство из этих факторов нарушаются. Члены экипажа космического аппарата облучаются постоянно в течение всего полёта в диапазоне малых доз хронического облучения, исключить облучение в течение полёта не представляется возможным, радиационная обстановка в космосе имеет стохастический характер, поскольку солнечные протонные события (СПС), эквивалентные по характеру наземным радиационным авариям, являются нормальным компонентом радиационной обстановки в космосе, однако уровни воздействия от протонов при СПС могут быть существенно более высокими.

Кроме того, в космическом полёте появляется дополнительный компонент радиационного риска — увеличение вероятности гибели за счёт нарушения операторской деятельности, связанной с радиационным поражением центральной нервной системы. Этот фактор совместно с риском от детерминированных эффектов может играть существенную роль при оценке

радиационного риска в процессе полёта. Для оценки радиационного риска, адекватного упомянутому выше «наземному» риску, необходимо учитывать стохастические эффекты, включая весь комплекс индуцированных облучением соматических проявлений, а также генетический риск.

Рассмотрим, как количественно оценивается радиационный риск в космическом полёте. В отличие от характера радиационного воздействия на Земле, которое в основном обусловлено излучениями с низким значением ЛПЭ и является в большинстве случаев равномерным, радиационное воздействие в условиях космического полёта на орбите и вне магнитосферы Земли характеризуется сложным составом излучений и их энергетического спектра, простирающегося от нескольких килоэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт, которые различаются в значительной степени по своей биологической эффективности. Это воздействие обусловлено как детерминированными источниками излучения, включающими ГКЛ и РПЗ, так и стохастическим воздействием корпускулярного излучения при развитии солнечных протонных событий (СПС). Солнечные космические лучи характеризуются значительной неравномерностью распределения доз как по глубине тела, так и во времени. Максимальная радиационная нагрузка может приходиться на различные фазы полёта и состояния адаптированности организма космонавтов к факторам полёта, что определяет возможное снижение радиационной устойчивости космонавтов к острым радиационным воздействиям во время СПС. В соответствии с рекомендациями, изложенными в [ГОСТ 25645 201-83..., 1984], радиационное воздействие следует оценивать на основе «обобщённой» дозы H , для вычисления которой использовать рассчитываемые значения среднетканевых доз от различных источников в космическом полёте и ряд коэффициентов, учитывающих различное качество излучения, характер распределения дозы во времени и пространственное распределение дозы по телу:

$$H_{\text{б}} = \sum_{i=1}^n \bar{D}_i \text{КК}_i \text{КВ}_i \text{КР}_i, \quad (4)$$

где H — обобщённая доза; \bar{D} — среднетканевая поглощённая доза; КК_i — коэффициент качества излучения, определяемый на основе регламентированной его зависимости от ЛПЭ; КВ_i — коэффициент времени — временной неравномерности радиационного воздействия, учитывающий влияние мощности дозы и характер распределения дозы во времени на радиобиологический эффект, приводящий эффекты протяжённых и фракционированных воздействий к однократному острому облучению; КР_i — коэффициент распределения дозы, учитывающий характер распределения дозы по телу и приводящий эффекты неравномерного облучения к условиям равномерного радиационного воздействия.

Нами проведена дальнейшая разработка обобщённого дозиметрического функционала — обобщённой дозы H [Шафиркин, Григорьев, 2009; Shafirkin et al., 2002]. Поскольку выход непосредственных, ближайших радиационных эффектов в процессе полёта с одной стороны, а также возможных неблагоприятных отдалённых последствий — с другой, связан с формированием патологии в существенно различных критических системах организма, отличающихся временем развития поражения, его локализацией, скоростью протекания

восстановительных процессов, значение обобщённой дозы следует вычислять отдельно на основе своего набора коэффициентов соответственно для ближайших эффектов H_B и отдалённых последствий H_O . Кроме того, специфические условия космического полёта, когда кроме ионизирующих излучений на космонавтов воздействуют перегрузки, невесомость, гиподинамия, длительное психологическое напряжение, требуют также введения коэффициентов модификации (КМ) радиационного воздействия из-за нерадиационных факторов.

Поэтому в окончательном виде обобщённые дозы применительно к оценке радиационного риска ближайших эффектов в процессе полёта и риска отдалённых неблагоприятных последствий вычисляли с использованием двух самостоятельных выражений для H_B и H_O :

$$\begin{aligned} H_B &= \left(\sum_{i=1}^n \bar{D}_i \text{КК}_{Bi} \text{КВ}_{Bi} \text{КР}_{Bi} \right) \text{КМ}_B, \\ H_O &= \left(\sum_{i=1}^n \bar{D}_i \text{КК}_{Oi} \text{КВ}_{Oi} \text{КР}_{Oi} \right) \text{КМ}_O. \end{aligned} \quad (5)$$

В работах [ГОСТ 25645.219-90..., 1991; Шафиркин, 1998; Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин, Федоренко, 1998] проанализированы результаты экспериментальных исследований и ряд модельных представлений для определения значений коэффициентов, входящих в выражение (5), с целью вычисления значений обобщённых доз. Обобщение данных по относительной биологической эффективности излучений с различной величиной ЛПЭ по отношению к ближайшим радиобиологическим проявлениям подробно рассмотрено в работе [Шафиркин, Федоренко, 1998]. В ней на основе анализа цитогенетических эффектов на клеточном уровне, глубины изменений в радиочувствительных тканях: кроветворной, желудочно-кишечном эпителии, эпидермисе, — а также выживаемости экспериментальных животных проведено сравнение действия протонов, ускоренных многозарядных ионов и нейтронов с воздействием стандартных видов излучений. Это дало возможность оценить максимальные значения коэффициентов относительной биологической эффективности (ОБЭ) и установить их зависимость от ЛПЭ. Было получено, что максимальные значения коэффициентов ОБЭ-излучений с различными значениями ЛПЭ для ближайших эффектов, связанных с развитием первичной лучевой реакции, с возможным поражением критических тканей в остром периоде, таких как костный мозг, ЖКТ, кожа и др., являются в несколько раз меньшими, чем значения КК_O , установленные на основе отдалённых эффектов в нормативных документах [ГОСТ 25645.218-90..., 1991; Радиационная..., 1978].

Таким образом, на основе изложенного, оценки риска ближайших неблагоприятных эффектов сочетанного воздействия излучений ГКЛ, РПЗ и СКЛ на космонавтов в случае использования нормативных зависимостей КК_O от ЛПЭ [Шафиркин, 1998; Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин, Федоренко, 1998] будут несколько завышенными, что вполне допустимо с целью сохранения хорошей работоспособности космонавтов в процессе полёта (имеется некоторый запас). В то же время, что касается отдалённых эффектов,

то использование этих зависимостей может привести к недооценке реальной опасности в отношении сохранения здоровья космонавтов в отдалённом послеполётном периоде.

Действительно, максимальные значения $КК_0$ в нормативных документах не превышают 20 при высоких ЛПЭ, хотя в целом ряде более поздних работ получены существенно большие значения коэффициентов ОБЭ. Так, в отчёте Научного комитета ООН по действию атомной радиации 2000 г. Генеральной Ассамблеи ООН значения коэффициентов ОБЭ для нейтронов спектра деления на основе цитогенетических исследований культуры лимфоцитов человека равны от 34 до 53, а по индукции опухолей — от 16 до 59 [Источники..., 2002]. При изучении структурных нарушений в коре головного мозга у крыс, а также при определении частоты помутнений хрусталика и развития катаракт у мышей получены для малых доз значения коэффициентов ОБЭ в диапазоне от 50 до 100 [Абросимова и др., 2000; Федоренко, 2006; Шафиркин и др., 1998]. Это потребует в будущем пересмотра нормативной зависимости $КК_0$ от ЛПЭ в сторону их увеличения, что приведёт к несколько большим значениям радиационного риска, представленным в настоящей работе, и некоторому возможному увеличению толщины защиты бортовых отсеков основного модуля марсианского корабля (МК).

При оценке опасности воздействия на космонавтов протонов СКЛ и РПЗ мы на основе анализа большого количества радиобиологических исследований на ускорителях протонов [Рыжов, 1982; Федоренко, 2006; Шафиркин, Федоренко, 1998] обоснованно считали, что вполне доказана полная качественная и количественная идентичность радиобиологических эффектов воздействия протонов и гамма-излучения ^{60}Co и ^{137}Cs . Это продемонстрировано по тяжести развития острой лучевой болезни, вероятности гибели млекопитающих, их продолжительности жизни, по характеру и глубине изменений в различных органах и тканях, по частоте и характеру цитогенетических нарушений в клетках животных и человека. Поэтому в отношении воздействия на космонавтов протонов РПЗ и СКЛ с энергией более 30 МэВ коэффициенты ОБЭ, как и значения коэффициентов $КК_Б$ и $КК_0$, могут быть приняты равными 1,0.

Для разработки модели формирования радиационного поражения организма с учётом восстановительных процессов в 1966 г. в Институте медико-биологических проблем Минздрава СССР была осуществлена постановка специального 14-летнего эксперимента по гамма-облучению большой партии собак в эквивалентных дозах и временном режиме, которые моделировали возможный характер радиационного воздействия на космонавтов при полёте на Марс (рис. 1а и б). Результаты изучения изменений в различных системах организма в процессе облучения и в отдалённом периоде после его прекращения, а также сокращение продолжительности жизни собак представлены в работах [Григорьев и др., 1986; Шафиркин, Григорьев, 2009].

Для определения значений коэффициентов $КВ_Б$ была разработана модель эффективной остаточной дозы $D_{эф}$, определяющая закономерности формирования радиационного поражения на уровне организма с учётом восстановительных процессов, при протяжённых облучениях с различным характером распределения дозы во времени. Как правило, при снижении мощности дозы и увеличении длительности облучения эффективность радиационного поражения организма снижается значительно, и величины коэффициентов вре-

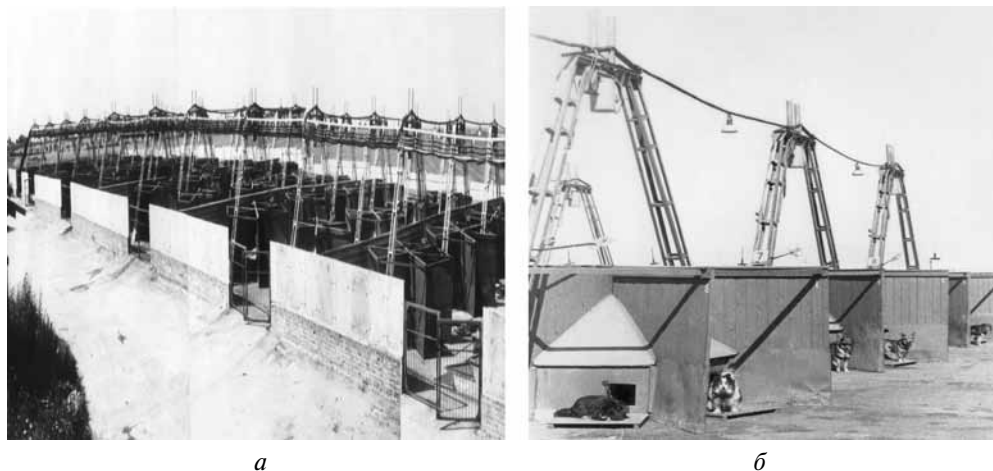


Рис. 1. Установки, моделирующие характер радиационного воздействия: *а* — экспериментальные площадки для хронического облучения собак (общий план); *б* — вольеры «звездочка» с размещенной над ними гамма-установками «Люстра»

менной неравномерности KV_B могут уменьшаться в 2...5 раз по сравнению с острыми кратковременными радиационными воздействиями. Это в литературе показано при действии гамма-излучения, но относится и к воздействию СКЛ на космонавтов в условиях стохастически распределённых во времени СПС различной мощности [Шафиркин, 1998; Шафиркин, Григорьев, 2009].

Приведение эффектов неравномерного облучения в результате воздействия СПС на космонавтов к равномерному в меньшей дозе может быть осуществлено с помощью разработанной модели равноценной дозы G на основе обеспечения равной доли сохранённых стволовых кроветворных клеток в условиях неравномерного и равномерного облучений [ГОСТ 25645.219-90..., 1991; Шафиркин, Григорьев, 2009]. Равноценная доза, согласно определению из материалов ГОСТа представляет собой дозу равномерного облучения, которая вызывает одинаковую глубину поражения стволовых кроветворных клеток в костном мозге, как и среднетканевая доза при неравномерном распределении доз по скелету стандартизованного антропоморфного фантома, представляющего модель тела человека в случае развития СПС.

Коэффициент модификации KM_B в дозовом выражении был в большинстве экспериментальных исследований по комбинированному действию радиации и нерадиационных факторов, присущих космическому полёту, менее 1. Это являлось свидетельством положения о неспецифическом действии различных факторов, при котором происходит активация защитных сил организма и повышение устойчивости к ряду экстремальных воздействий, в том числе и к облучению в летальном диапазоне доз [Шафиркин, Григорьев, 2004, 2009]. При предварительном действии тяжёлой физической нагрузки, жёсткой гипокинезии, значительном повышении температуры было отмечено утяжеление радиобиологических эффектов и коэффициент модификации KM_B в дозовом выражении был больше 1, но не превышал значения 1,3. Поскольку нами выше показано, что KK_B космических излучений применительно к ближайшим в процессе полёта негативным эффектам реально в несколько раз ниже, чем значения KK_O , согласно нормативной зависимости KK

от ЛПЭ, и у нас имеется некоторый коэффициент запаса, то при вычислении значений обобщённых доз H_B и оценках радиационного риска в полёте принимали значение KM_B равным 1.

Был вычислен, с использованием вышеуказанных данных, радиационный риск для случая полёта к Марсу в космических кораблях с различной толщиной защиты. В работах [Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин и др., 1999; Shafirkin et al., 2002] подробно представлены алгоритмы расчётов обобщённых доз от ГКЛ и СКЛ и проведены оценки радиационного риска в процессе межпланетных, длительностью до трёх лет, полётов, проводимых в период максимума СА, за различными толщинами защиты радиационного убежища из алюминия.

Как показали расчёты, значения радиационного риска R_{rad} в процессе межпланетных полётов являются сравнительно малыми по величине и линейно увеличиваются с увеличением длительности полёта. Эти зависимости для космонавтов в возрасте 40 лет для различных толщин защиты радиационного убежища КА из алюминия могут быть выражены следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} R_{rad} &= 6,50 \cdot 10^{-3} T \text{ при } X_{py} = 1 \text{ г/см}^2, \\ R_{rad} &= 3,45 \cdot 10^{-3} T \text{ при } X_{py} = 5 \text{ г/см}^2, \\ R_{rad} &= 2,32 \cdot 10^{-3} T \text{ при } X_{py} = 10 \text{ г/см}^2, \\ R_{rad} &= 1,70 \cdot 10^{-3} T \text{ при } X_{py} = 20 \text{ г/см}^2, \\ R_{rad} &= 1,55 \cdot 10^{-3} T \text{ при } X_{py} = 50 \text{ г/см}^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где T — длительность полёта в годах; X_{py} — толщина защиты радиационного убежища.

Следует заметить, что демографический риск R_{dem} за год для мужчин в возрасте 40 лет по данным для периода 1993–1996 гг. составлял $1,18 \cdot 10^{-2}$. По отношению к нему радиационный риск в полёте за толщинами 1; 5; 10 и 20 г/см² защиты составляет 55; 29; 20 и 14 %. При значительном увеличении толщины защиты радиационного убежища до 50 г/см² радиационный риск уменьшается незначительно, поскольку подавляющий вклад в его величину даёт воздействие ГКЛ, а вклад от СКЛ уже является пренебрежимо малым.

Оценки показали, что радиационный риск в процессе полёта существенно зависит от возраста космонавтов. Этот риск для 50-летнего космонавта более чем в 3 раза превышает риск для 30-летнего. Зависимость абсолютных значений риска за полёт от возраста может быть представлена следующим соотношением:

$$R_{rad}(T_O) = R_{rad}(40) \exp[0,062(T_O - 40)], \quad (7)$$

где T_O — возраст космонавтов, годы.

В то же время можно отметить, что отношение радиационного риска за полёт к демографическому риску остаётся постоянным и зависит не от возраста и длительности полёта, а только от толщины защиты радиационного убежища. Поэтому при анализе различных вариантов защиты КА и степени опасности при проведении полёта следует в большей степени ориентироваться не на абсолютные, а на относительные значения радиационного риска.

Величины радиационного риска для космонавтов в процессе орбитальных полётов на станции «Мир» и Международной космической станции (МКС) в периоды максимума и минимума солнечной активности (СА) были оценены равными от 3,8 до 5,6 % от демографического риска соответственно

[Шафиркин, Григорьев, 2009]. Полученные величины радиационных рисков в процессе полёта за защитой 5 г/см^2 в соответствии с классификацией, представленной в работах [Ковалёв, 1976; Шафиркин, 2001], могут быть отнесены к сравнительно невысоким уровням риска и рассматриваться как вполне приемлемые. Значительно более опасными представляются нам величины суммарного радиационного риска в течение всей жизни космонавтов.

СУММАРНЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ РИСК ДЛЯ КОСМОНАВТОВ ЗА ВСЮ ЖИЗНЬ ПОСЛЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПОЛЁТА К МАРСУ

Как указывалось выше, при нормировании радиационных воздействий на космонавтов необходимо также учитывать вероятность и тяжесть отдалённых неблагоприятных радиобиологических проявлений. Среди них следует определить, прежде всего, возможное увеличение возрастных коэффициентов смертности и увеличение общего риска гибели за оставшийся период жизни от всех причин, а также оценить возможное сокращение средней продолжительности предстоящей жизни. Кроме того, следует также учесть связанное с радиационным воздействием увеличение риска развития опухолевых заболеваний и возможной смертности по этой причине за весь период жизни космонавтов.

Вычисление суммарного радиационного риска, включающего риск смертности от опухолей и не канцерогенный риск в результате развития отдалённых радиационных нарушений в различных системах организма, проводили на основе разработанной модели радиационной скорости смертности млекопитающих [Шафиркин 1999; Шафиркин, Григорьев, 2009], которая определяет закономерное снижение с возрастом объёма компенсаторных резервов организма $Q(t)$ и увеличение значений коэффициентов смертности $\mu(t)$ в результате ускорения процессов старения при радиационных воздействиях.

Согласно этой модели после радиационного воздействия в возрасте t_0 в обобщённой дозе H_0 выражения для изменения суммарного объёма компенсаторных резервов организма $Q(t-t_0)$ и коэффициентов смертности млекопитающих $\mu^{\text{рад}}(t-t_0)$ в зависимости от возраста имеют следующий вид:

$$Q(t-t_0) = Q_0 \exp[-\lambda_0(t-t_0) - BH_0], \quad (8)$$

$$\mu^{\text{рад}}(t-t_0) = \mu(t_0) \exp[\lambda_0(t-t_0) + BH_0], \quad (9)$$

где λ_0 — параметр, определяющий скорость снижения компенсаторных резервов во времени и увеличение значений коэффициентов смертности от возраста в процессе обычного процесса старения, а член BH_0 характеризует влияние дополнительного радиационного фактора на изменение указанных показателей в зависимости от обобщённой эквивалентной дозы H_0 .

Как отмечалось выше, в качестве дозиметрического критерия для определения опасности воздействия космических излучений на членов экипажей космических аппаратов и проведения оценок суммарного радиационного риска следует использовать обобщённую дозу H_0 применительно к оценке отдалённых эффектов, которая позволяет привести сложный характер облучения в космическом полёте к условиям стандартного радиационного воздействия.

В соответствии с уравнением (5) эта доза может быть установлена на основе значений эквивалентной среднетканевой дозы, суммарно накопленной

за весь период полёта (D_f). Как отмечалось выше, при использовании метода Монте-Карло рассчитывались значения среднетканевых доз ГКЛ и СКЛ для каждой реализации полёта, и определялось среднее значение за 10^4 историй. При вычислении обобщённых доз H_O принимали значение коэффициента пространственной неравномерности радиационного воздействия KP_O равным 1,0, предполагая максимально опасным с точки зрения прогноза отдалённых последствий случай равномерного облучения. Значение коэффициента модификации радиационного воздействия KM_O также принималось равным 1,0, поскольку в настоящее время имеется недостаточное количество экспериментальных данных о модифицирующем действии нерадиационных факторов, присущих космическому полёту, в отношении утяжеления отдалённых радиационных последствий.

При расчётах величин обобщённых доз H_O учитывали также снижение эффективности протяжённых облучений вследствие восстановительных процессов при действии излучений. Для этих целей вводили коэффициент временной неравномерности радиационного воздействия KB_O , характеризующий снижение эффективности протяжённых радиационных воздействий в отношении развития отдалённых радиобиологических проявлений, равный обратному значению коэффициента редукции, введённому национальной комиссией радиологической защиты США [Guidance..., 1989]. При этом принимался во внимание анализ данных об эффективности радиационных воздействий с различной мощностью дозы при действии излучений с различным значением ЛПЭ в отношении отдалённых последствий, которые рассмотрены в работах [Федоренко, 2006; Шафиркин, 1998; Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин, Федоренко, 1998].

Отдалённые эффекты, связанные с возможным сокращением продолжительности жизни, также значительно модифицируются при снижении мощности дозы, за счёт развития компенсаторных и восстановительных процессов на уровне организма. Анализ большого числа экспериментов на разных млекопитающих при протяжённом и фракционированном их облучении протонами и гамма-излучением с дозой за сутки менее 2 сЗв показал, что эффективность такого радиационного воздействия снижается более чем в 4 раза. **Примерно в 4 и более раз возрастают дозы, приводящие к гибели 50 % животных при протяжённых воздействиях, по сравнению с острым кратковременным воздействием.** Сокращение продолжительности жизни на единицу дозы также снижается в этой пропорции [Григорьев и др., 1986; Шафиркин, 1998; Шафиркин, Григорьев, 2009]. Поэтому при расчётах обобщённых доз H_O от протонов СКЛ и РПЗ значения среднетканевых доз могли бы быть уменьшены в 4 раза. **С учётом вышеуказанного мы, тем не менее, с целью верхней оценки опасности воздействия протонов использовали несколько меньшее снижение значений коэффициентов KB_O для расчётов обобщённой дозы H_O при несколько более высоких уровнях доз за сутки (см. уравнение (5)).**

С учётом этих данных было принято, что при воздействии протонов СКЛ с мощностью дозы выше 20 сЗв коэффициент редукции не использовался, и значение коэффициента KB_O принималось равным 1,0. В случае меньших мощностей доз в пределах 2...20 сЗв, коэффициент редукции принимался равным 2,0 (коэффициент временной неравномерности радиационного воздействия $KB_O = 0,5$).

При облучении с мощностью дозы ниже 2 сЗв коэффициент редукации был более обоснован и принимался равным 4,0 (коэффициент эффективности радиационного воздействия $KV_0 = 0,25$). Снижение эффективности радиационного воздействия в 4 раза при излучениях с низкими значениями ЛПЭ и малыми значениями мощности дозы обосновано нами ранее при анализе эффектов сокращения продолжительности жизни млекопитающих в работах [Григорьев и др., 1986; Шафиркин, Григорьев, 2009; Shafirkin et al., 2002].

В противоположность этому, при воздействии излучений с высокой ЛПЭ (нейтроны, ускоренные многозарядные ионы) восстановительные процессы на клеточном уровне практически блокированы и не отмечалось снижения эффективности воздействия при уменьшении мощности дозы. Отсутствовали проявления восстановительных процессов на клеточном уровне в отношении развития ближайших радиационных проявлений при кратковременном облучении (длительностью менее 5 сут). Кроме того, отдалённые эффекты, обусловленные воздействием излучения с высоким ЛПЭ, не модифицируются мощностью дозы при хроническом облучении [Григорьев и др., 1986; Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин, Федоренко, 1998]. В связи с этим при оценке воздействия на космонавтов ГКЛ их эффективность принималась максимальной и приравнивалась к острому облучению ($KV_0 = 1$).

Из демографических данных известно, что зависимость коэффициентов смертности от возраста для людей может быть в общем виде представлена уравнением Гомперца – Мейкхема: $\mu(t) = A + \mu(0) \exp(\lambda_0 t)$. Для оценки характера изменения выживаемости когорты населения с начальным возрастом 25 лет можно использовать экспоненциальную зависимость $\mu(t) = \mu(0) \exp(\lambda_0 t)$ [Шафиркин, Венедиктова, 1999; Шафиркин, Григорьев, 2009]. Анализ зависимости коэффициентов смертности от возраста для мужского населения нашей страны за период 1993–1996 гг. показал, что значение параметра λ_0 для этой зависимости оказалось равным 0,062 (1/год), а значение $\mu(0)$ составило $9,0 \cdot 10^{-4}$ (1/год).

Как свидетельствуют данные экспериментальных исследований на животных и в полном соответствии с моделью радиационной скорости смертности млекопитающих (см. уравнение (9)), после облучения в некотором возрасте t_0 , в дозе H_0 кривые, определяющие зависимость логарифмов коэффициентов смертности от возраста, увеличиваются с этого момента на величину BH_0 . С учётом вышеизложенного и в соответствии с уравнением (9) можно представить выражение для зависимости коэффициентов смертности для человека от возраста после радиационного воздействия в обобщённой дозе H_0 :

$$\mu^{\text{рад}}(t) = \mu(0) \exp[\lambda_0 t + BH_0] = \mu(t) \exp(BH_0). \quad (10)$$

В работах [Шафиркин, Венедиктова, 1999; Шафиркин, Григорьев, 2009; Shafirkin et al., 2002] обосновано также значение коэффициента B в уравнениях (9), (10) для описания характера изменения зависимости коэффициентов смертности от возраста $\mu^{\text{рад}}(t)$ применительно к человеку, которое составило 0,36 (1/Зв). В этих же работах на основе модели радиационной скорости смертности млекопитающих с использованием указанных выше зависимостей коэффициентов смертности от возраста для человека представлены математические выражения для расчётов суммарного радиационного риска в течение жизни космонавтов и возможного сокращения их продолжительности

жизни после завершения межпланетных полётов различной продолжительности. В этих работах выражение, описывающее вероятность выживания в отдалённом периоде к возрасту T для когорты в возрасте t_0 при отсутствии радиационного воздействия, аналогично функции дожития, используемой в демографических исследованиях:

$$V(T) = \exp \left\{ - \int_{t_0}^T \mu(t) dt \right\} = \exp \left\{ - \int_{t_0}^T \mu(0) \exp(\lambda_0 t) dt \right\} = \exp \left\{ - \frac{\mu(t_0)}{\lambda_0} [\exp(\lambda_0(T - t_0)) - 1] \right\}. \quad (11)$$

Функция дожития после радиационного воздействия в дозе H_O может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} V^{\text{рад}}(T) &= \exp \left\{ - \int_{t_0}^T \mu^{\text{рад}}(t) dt \right\} = \exp \left\{ - \exp(BH_O) \int_{t_0}^T \mu(0) \exp(\lambda_0 t) dt \right\} = \\ &= \exp \left\{ - \frac{\mu(t_0)}{\lambda_0} \exp(BH_O) [\exp(\lambda_0(T - t_0)) - 1] \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mu(t_0) = \mu(0) \exp(\lambda_0 t_0)$.

На основе выражений (11) и (12) определялся дополнительный суммарный риск смертности (к возрасту T), обусловленный действием радиационного фактора в отдалённом пострadiационном периоде:

$$R^{\text{рад}}(T) = V(T) - V^{\text{рад}}(T). \quad (13)$$

Верхний предел интегрирования в этих уравнениях был принят равным 70 годам.

Сокращение средней предстоящей продолжительности жизни, обусловленное радиационным воздействием, может быть вычислено из уравнения

$$\Delta T^{\text{рад}} = T - T^{\text{рад}}, \quad (14)$$

где T и $T^{\text{рад}}$ — величины средней предстоящей продолжительности жизни без воздействия радиации и при облучении в дозе H_O .

Выражения для определения этих величин имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} T &= \int_{t_0}^{\infty} V(t) dt, \\ \bar{T}^{\text{рад}} &= \int_{t_0}^{\infty} V^{\text{рад}}(t) dt = \int_{t_0}^{\infty} \exp \left\{ - \frac{\mu(t_0)}{\lambda_0} \exp(BH_O) [\exp(\lambda_0(T - t_0)) - 1] \right\} dT. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, на основании представленных выше соотношений, вытекающих из модели радиационной скорости смертности млекопитающих, удаётся прогнозировать в зависимости от дозы характер трансформации кривых, определяющих зависимость коэффициентов смертности человека от возраста, и оценивать суммарный дополнительный радиационно обусловленный риск его смертности для любого определённого периода жизни.

На рис. 2а и б в качестве примера представлены расчётные значения суммарного радиационного риска и возможного сокращения средней предстоящей продолжительности жизни для космонавтов после завершения межпланетного

полёта к Марсу в зависимости от длительности полёта и толщины радиационного убежища из алюминия в грамм на сантиметр в квадрате. Для сравнения рассмотрен гипотетический случай максимального снижения величины радиационного риска, когда толщина защиты $X_{\text{БО}}$ равна 50 г/см^2 алюминия.

Верхняя расчётная кривая соответствует гипотетической минимальной толщине бортовых отсеков космического корабля $X_{\text{БО}}$ равной 1 г/см^2 . При этом отсутствует специальное радиационное убежище $X_{\text{РУ}} = 0$. В условиях возможности организации РУ и с увеличением толщины его защиты суммарный радиационный риск в течение жизни, как и возможное сокращение СППЖ, значительно снижаются. При толщине защиты $X_{\text{РУ}} = 20 \text{ г/см}^2$ вклад излучения СКЛ в формирование обобщённой дозы и риск неблагоприятных отдалённых последствий практически нивелируется. Он обусловлен только воздействием ГКЛ. Величина суммарного радиационного риска при длительности полёта 2 года составит 8 %, а сокращение СППЖ — на 2,5 года.

Таким образом, применение РУ с толщиной защиты $10...20 \text{ г/см}^2$ вещества позволяет значительно снизить радиационный риск даже при минимальной гипотетической толщине защиты $X_{\text{БО}}$ (1 г/см^2 алюминия). Дальнейшее увеличение толщины защиты РУ не является эффективным. При расчёте, когда толщина защиты бортовых отсеков равна 50 г/см^2 , величина суммарного радиационного риска снижается не очень сильно с 8 до 4 %, а сокращение СППЖ будет меньшим всего на 1,3 года, но такая защита МК рассмотрена лишь гипотетически. Как будет показано ниже, пока планируется толщина защиты бортовых отсеков МК в пределах $15...20 \text{ г/см}^2$ алюминия.

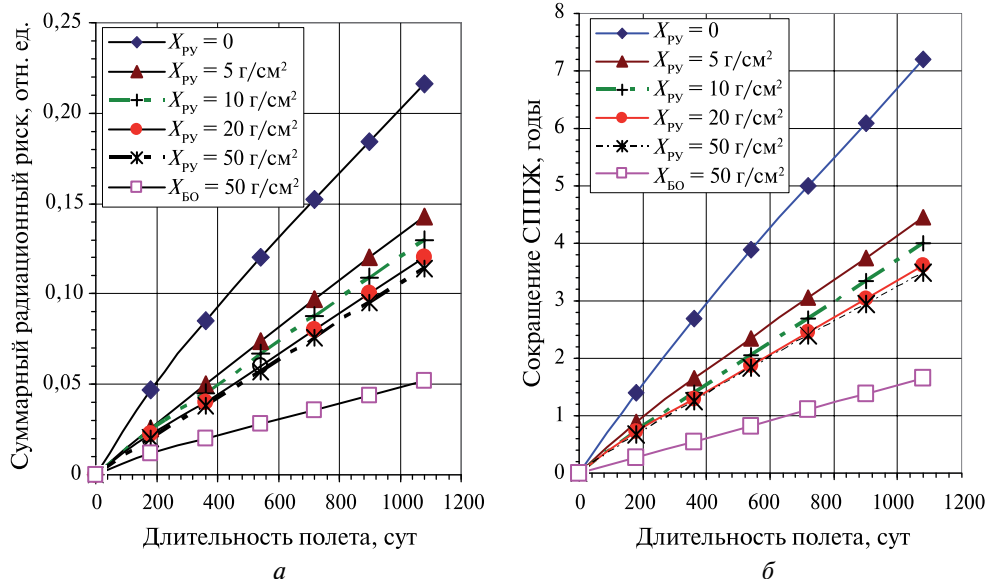


Рис. 2 Расчётные значения суммарного радиационного риска (а) и возможного сокращения средней предстоящей продолжительности жизни (б) для космонавтов после завершения межпланетного полёта к Марсу в зависимости от длительности полёта и толщины радиационного убежища $X_{\text{РУ}}$, $X_{\text{БО}}$ из алюминия, г/см^2 [Шафиркин, Венедиктова, 1999; Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин и др., 2007; Shafirkin et al., 2002]

В результате расчётов методом Монте-Карло дозовых нагрузок на космонавтов при осуществлении двухлетнего межпланетного полёта в период максимума СА при различной толщине защиты РУ ($X_{\text{РУ}} = 1 \dots 20 \text{ г/см}^2$) и минимальной толщине защиты БО ($X_{\text{БО}} = 1 \text{ г/см}^2$) и рассмотрении 10^4 реализаций историй полёта получены частотные распределения возможных среднетканевых доз во время полёта [Шафиркин и др., 2007].

На основе этих частотных распределений среднетканевых доз можно заключить, что наиболее вероятное значение среднетканевой эквивалентной дозы находится в пределах 35...70 сЗв. В то же время среднетканевая доза 250 сЗв, при которой возможно серьёзное нарушение работоспособности и жизнеспособности организма, может иметь место при значениях толщины защиты 1; 5; 10 и 20 г/см² с вероятностями 0,1; 0,008; 0,002 и 0,0004.

При толщине защиты 1 г/см² с очень высокой вероятностью возможны реализации событий, при которых среднетканевые дозы соответствуют летальному диапазону доз. Даже при максимальной толщине защиты радиационного убежища 20 г/см² с вероятностью 1 % возможно превышение предельных уровней облучения космонавтов, регламентированных нормативным документом, утверждённым в 2004 г. [Методические..., 2004]. Однако реальные значения обобщённых доз, учитывающие вклад СКЛ, будут значительно ниже, так что суммарный радиационный риск к 70 годам не будет превышать установленного для орбитального полёта нормативного значения 10 %. При толщине защиты РУ 10 и 20 г/см² алюминия вероятность реализаций полёта с радиационным риском более 10 % составит 10 и 3 %, соответственно.

В работах [Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин и др., 2007] представлены возможные значения сокращения средней продолжительности предстоящей жизни космонавтов и частоты их превышения после осуществления данного межпланетного полёта. Анализ вероятности сокращения СППЖ после завершения рассматриваемого космического полёта при тех же значениях толщины защиты РУ показал, что соответствующие наиболее вероятные его значения варьируют в интервале 2,5...5 лет. Столь большое и социально значимое сокращение СППЖ как 3 года может быть превышено при толщинах защиты РУ менее 10 г/см² с вероятностью, превышающей 10 %. Относительно приемлемой толщиной защиты радиационного убежища может быть 20 г/см² алюминия, при которой риск сокращения СППЖ больше трёх лет составит 3 %, а четырёх лет — 1 %.

Кроме интегральных оценок неблагоприятных отдалённых последствий, таких как суммарный радиационный риск в течение жизни космонавтов и величина сокращения СППЖ, с использованием полученных величин среднетканевых эквивалентных доз от источников космических излучений были проведены оценки пожизненного риска развития канцерогенных опухолей у космонавтов разных возрастов при осуществлении межпланетных полётов на Марс различной продолжительности за различными толщинами защиты МК [Шафиркин, Венедиктова, 2000; Шафиркин, Григорьев, 2009]. При этом предполагали, что все органы космонавтов подвергаются воздействию в одинаковой дозе, соответствующей суммарной среднетканевой эквивалентной дозе за полёт.

На рис. 3 приведены значения суммарного радиационного риска, рассчитанного на основе представленных ранее материалов, и риска развития опухолей в зависимости от возраста космонавтов на начало межпланетного

полёта (рассматривается межпланетный полёт в период максимума солнечной активности, продолжительностью 2 года при толщине защиты бортового отсека космического аппарата, равной 30 г/см^2). Для канцерогенного риска представлены максимальная и минимальная оценки, без учёта и с учётом коэффициента редукации дозы, учитывающего снижение эффективности радиационного воздействия при малых значениях мощности дозы.

Как видно из данных, представленных на рисунке, суммарный радиационный риск для космонавтов в результате всех причин гибели в течение всей жизни (к 70 годам) существенно превышает риск развития опухолей, особенно для лиц старших возрастных групп. Риск развития опухолей для космонавтов, начинающих полёт в возрасте 25 лет, составляет большую часть суммарного радиационного риска. В то же время для космонавтов, начинающих свою профессиональную деятельность в возрасте 50 лет, он в 3,7...8,9 раз ниже. Расчёты показывают, что суммарный радиационный риск в течение жизни почти в 20 раз превышает оценки радиационного риска в процессе полёта, он не зависит от возраста космонавтов и почти на порядок превышает риск развития опухолей для старших возрастных групп космонавтов.

Учитывая вышеуказанное, суммарный радиационный риск в течение жизни космонавтов, а также возможное сокращение средней предстоящей продолжительности жизни являются наилучшими интегральными показателями для вопросов нормирования и для оценки опасности радиационного воздействия, которое имеет место в условиях длительных космических полётов. Поэтому именно эти величины следует принимать за основу при разработке нормативных документов, ограничивающих уровни облучения космонавтов при осуществлении этих полётов. Именно эти величины определили предельный уровень дозы 1 Зв для космонавтов за весь период их деятельности в последнем нормативном документе, касающемся длительных орбитальных космических полётов [Методические..., 2004].

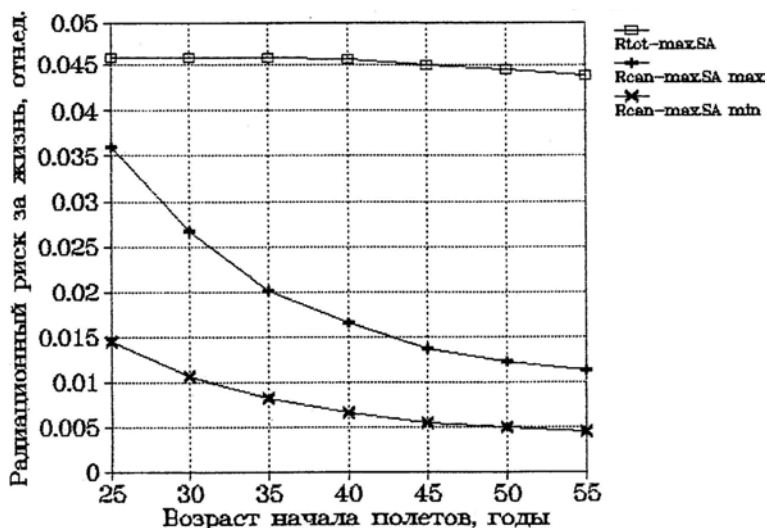


Рис. 3. Суммарный радиационный риск и риск развития опухолей в течение жизни для космонавтов различного возраста после завершения двухгодичного межпланетного полета, осуществляемого в период максимума СА ($X_{\text{Б0}} = 30 \text{ г/см}^2$)

Исходя из представленных выше соотношений, вытекающих из модели радиационной скорости смертности млекопитающих (уравнения (8) и (9)), для изменения величин суммарного объёма компенсаторных резервов организма и коэффициентов смертности после радиационных воздействий, а также для расчётов радиационного риска (уравнения (11)–(15)) необходимо учитывать популяционные особенности когорты населения страны, по отношению к которой проводится расчёт, поскольку для оценки опасности может быть использована модель относительного радиационного риска. Это позволяет в сравнительных оценках опасности учитывать популяционные особенности населения страны, осуществляющей запуск экипажа в полёт. Функции дожития для мужчин России определяется состоянием здоровья населения России. Для периода 1993, 1996 и 2005 гг. для вычисления функции дожития использовали, как отмечалось выше, следующие значения параметров: $\mu(0)=9,0 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_0=0,062$ (1/год). Состояние здоровья мужчин в США и Японии существенно лучше. Продолжительность жизни мужчин в этих странах на 15...17 лет больше. **Зависимость коэффициентов смертности от возраста для мужского населения США в возрастах 25 лет и выше описывается следующими параметрами $\mu(0)=1,0 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_0=0,0837$ (1/год), а для населения Японии $\mu(0)=5,0 \cdot 10^{-5}$; $\lambda_0=0,0885$ (1/год).** Для астронавтов Европейского союза параметры в среднем близки к параметрам для астронавтов США. При расчётах радиационного риска более правильно выбирать значения верхнего предела в интеграле (уравнения (11) и (12)), соответствующие приблизительно средней продолжительности жизни. В этом случае выживаемость когорты мужчин в возрастах 30...50 лет $V(T)$ будет близка к значению 0,5 и величины радиационного риска могут быть определены с более высокой точностью. Мы в своих расчётах, представленных выше, выбирали значение верхнего предела в интеграле для космонавтов России — 70 лет [Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин, Коломенский, 2008; Shafirkin et al., 2002].

С учётом изложенного, на рис. 4 показаны рассчитанные значения суммарного радиационного риска для космонавтов России, астронавтов США и Японии в возрасте 40 лет в зависимости от величины обобщённой дозы при значениях верхнего предела в интеграле для космонавтов России 65 и 70 лет, а для астронавтов США и Японии — 75 лет. При этом функции дожития $V(T)$ оказывались близкими к значению, равному 0,5, и величина радиационного риска определяется наиболее чётко.

Как видно из данных, представленных на рисунке, суммарный радиационный риск линейно зависит от величины обобщённой дозы в рассматриваемом интервале доз. Максимальная оценка суммарного радиационного риска для космонавтов России составляет 13 % на 1 Зв. Близкое значение риска в расчёте на 1 Зв обобщённой дозы имеет место и для американских астронавтов — 12,5 %, а для астронавтов Японии он не превышает 11 %.

Близкие оценки радиационного риска представлены в докладе американских исследователей Колумбийского университета [Geard et al., 2006]. В этой работе авторы сообщают об очень высокой частоте выхода хромосомных aberrаций в клетках сосудистого эндотелия при сравнительно небольших дозах гамма-излучения (1 Гр), что может способствовать в отдалённом периоде развитию нарушений в системе кровообращения, в том числе мозгового кровообращения, и обуславливать более высокий риск развития неопухолевой отдалённой патологии.

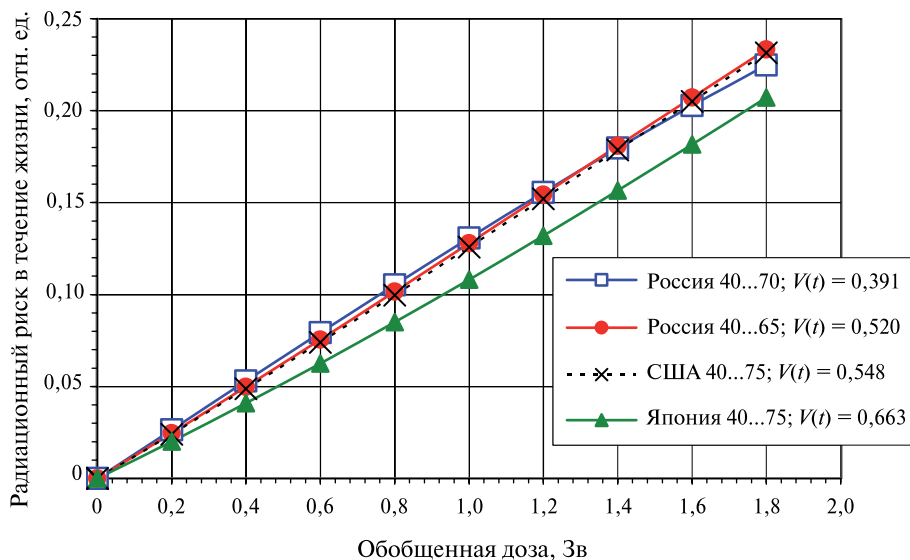


Рис. 4. Зависимость суммарного радиационного риска для космонавтов России, астронавтов США и Японии в возрасте 40 лет от величины обобщенной дозы

Авторы исследования оценивают суммарный радиационный риск для жителей Хиросимы и Нагасаки за счёт канцерогенеза, а также дегенеративных изменений в коре головного мозга, нарушений в системе кровообращения, увеличения сердечно-сосудистых заболеваний и др., равным 14 % на 1 Зв.

Конечно, космонавты и астронавты по своему здоровью и социальному статусу находятся на более высоком уровне, чем в среднем по стране. Для них величина радиационного риска будет меньше. Но для целей максимальной оценки радиационной опасности и обеспечения большего уровня радиационной безопасности мы использовали более строгую оценку радиационного риска 13 % в расчёте на 1 Зв. Эта оценка представлена нами ранее в работах [Shafirkin et al., 2002; Шафиркин, Григорьев, 2009; Шафиркин, Коломенский, 2008].

В приведённых выше расчётах были рассмотрены варианты космических экспедиций на Марс и обратно с использованием двигательного комплекса, состоящего из модулей большой и малой тяг, включающего жидкостной реактивный двигатель и ядерно-энергетическую двигательную установку. В этом случае выведение марсианского корабля на марсианскую орбиту происходит достаточно быстро, и вкладом протонов и электронов от РПЗ можно было пренебречь.

В ряде других проектов предусматривается использование сравнительно простых экологически чистых электрореактивных двигателей малой тяги с использованием солнечной энергии. Комплекс с использованием почти 400 двигателей имеет высокую надёжность и минимальную массу. Его проще, чем какой-либо другой, собрать на околоземной орбите. Несмотря на увеличение продолжительности экспедиции, которая может составить от 730 до 900 дней, эта концепция марсианской экспедиции обладает основным главным преимуществом — высокой вероятностью благополучного возвращения экипажа [Горшков, 2006; Дудкин и др., 2000; Шафиркин,

Коломенский, 2008]. В этом случае, однако, происходит медленная в той или иной степени раскрутка марсианского корабля (МК) и следовало учесть вклад от протонов внутреннего и внешнего РПЗ в суммарную среднетканевую и обобщённую дозы. Как показали расчёты [Шафиркин, Коломенский, 2008], за возможной реальной защитой КА в диапазоне $10...30 \text{ г/см}^2$ обобщённые дозы от РПЗ будут заключены в диапазоне от 30 до 18 сЗв. При меньшем времени нахождения КА в РПЗ в случае использования двигателя с большей энерговооружённостью значения обобщённых доз снизятся в 1,67 раза и составят от 18 до 11 сЗв. **Добавочный вклад от РПЗ в величину суммарного радиационного риска для космонавтов в случае медленной раскрутки при толщинах защиты бортовых отсеков от 10 до 30 г/см² составит от 3,8 до 2,1 % соответственно, а в случае более быстрой раскрутки в РПЗ с увеличением мощности двигателей — от 2,2 до 1,2 %.**

В соответствии с данными работ [Дудкин и др., 1991; Сакович, Семёнов, 2005] средняя толщина защиты марсианского корабля составляет $\sim 15 \text{ г/см}^2$ при условии, что оборудование равномерно располагается по поверхности космического корабля. При реально возможном распределении толщины защиты от 10 до 30 г/см² суммарные обобщённые дозы от ГКЛ и РПЗ в случае полёта 900 сут и медленной раскрутки в РПЗ составят 85 и 58 сЗв соответственно. Оцениваемые значения суммарного радиационного риска от этих детерминированных источников только за полёт окажутся равными 11 и 7,5 %. Для толщины защиты КА 15 г/см^2 вклад в величину суммарного риска от СКЛ не превысит 1 %, а, учитывая то, что во время СПС космонавты могут находиться в более защищённых отсеках, вклад СКЛ будет заметно меньше 1 %.

На рис. 5 представлены суммарные значения радиационного риска для космонавтов России от ГКЛ и РПЗ после завершения полёта к Марсу в период максимума СА продолжительностью 730 и 900 дней в случае использования электрических двигателей малой тяги для максимальной и минимальной энерговооружённости [Шафиркин, Коломенский, 2008]. Из данных этой работы, представленных на рис. 5, можно видеть, что суммарный радиационный риск в максимальном случае 900-суточного полёта с минимальной скоростью раскрутки в РПЗ при толщинах бортовых отсеков марсианского корабля 10; 15; 20; 25 и 30 г/см² составит 12,5; 10,7; 9,4; 8,3 и 7,5 %, а сокращение продолжительности жизни 4,2; 3,6; 3,1; 2,8 и 2,5 года соответственно. В случае использования двигателей с более сильной тягой, энерговооружённостью 0,0001 и при длительности полёта 730 дней суммарный радиационный риск будет заметно снижен. При рассмотренных выше толщинах защиты он составит 9,2; 8,0; 7,0; 6,1 и 5,7 %. При средней защите бортовых отсеков КА $X_{\text{БО}} = 15 \text{ г/см}^2$ суммарный радиационный риск уменьшится приблизительно на 2,5 %, а величина СППЖ составит 2,5 года, вместо 3,1 лет.

Следует, однако, учитывать, что в марсианскую экспедицию будут отобраны космонавты, имеющие значительный опыт длительных орбитальных полётов, которые в течение также длительного периода проходят медицинские обследования, в том числе неоднократные рентгенологические обследования. Таким образом, к моменту отбора космонавтов к марсианской экспедиции величина суммарной накопленной эквивалентной дозы космонавтов составит около 30 сЗв, и суммарный риск до полёта уже может быть оценён равным 4 %, а величина СППЖ составит 1,3 года.

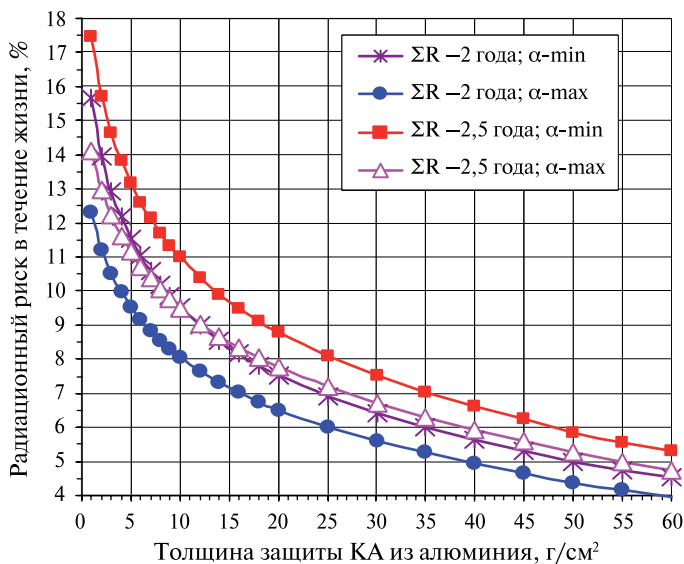


Рис. 5. Суммарные значения радиационного риска ΣR для космонавтов России от ГКЛ и РПЗ после завершения полета к Марсу в период максимума СА продолжительностью 730 и 900 дней в случае использования электрических двигателей малой тяги с максимальной (α -max) и минимальной (α -min) энерговооруженностью

При полёте к Марсу длительностью 900 сут с использованием электрических двигателей малой тяги с энерговооружённостью 0,00006 и представленного среднего варианта распределения защиты КА, равного 15 г/см^2 , итоговый суммарный риск в течение жизни космонавта составит около 15 %, а возможное сокращение продолжительности жизни — около 5 лет. Это в 1,5 раза превышает предельное значение риска для космонавтов за всю профессиональную деятельность, согласно методическим указаниям применительно к орбитальным полётам [Методические..., 2004].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше материалы дают представление о масштабе радиационной опасности для экипажа межпланетной экспедиции в результате её выполнения, который выражен в количественных значениях радиационного риска в процессе полёта и в течение всей жизни. Результаты расчётов риска для различных конструкторских вариантов создания радиационной защиты экипажа позволяют оценивать влияние на уровень радиационной безопасности космонавтов оптимального использования имеющихся на борту масс вещества и выбора периода осуществления полёта.

Приведённые значения сокращения средней продолжительности предстоящей жизни демонстрируют реальный ущерб космонавту, наносимый воздействием радиации в результате полёта. Наряду с оценками радиационного риска эта величина позволяет более полно представить количественную характеристику радиационной опасности, учитывающую, к тому же, возраст космонавтов на начало полёта и предысторию его облучения в процессе

профессиональной деятельности. Представленные выше характеристики радиационной опасности, безусловно, должны быть учтены при разработке и создании системы радиационной безопасности межпланетной экспедиции, разработке радиационных лимитов, регламентирующих облучение экипажа во время её проведения.

ЛИТЕРАТУРА

- [Абросимова и др., 2000] *Абросимова А. Н., Шафиркин А. В., Федоренко Б. С.* Вероятность развития помутнений хрусталика и образования зрелых катаракт при действии излучений с различными значениями ЛПЭ // *Авиакосмич. и экологич. медицина.* 2000. Т. 34. № 3. С. 33–41
- [Быков, Дёмин, 1991] *Быков А. А., Дёмин В. Ф.* Ущерб здоровью населения от радиационного воздействия: анализ и оценка // *Радиационная безопасность и защита АЭС.* 1991. Вып. 13.
- [Горшков, 2006] *Горшков Л.* // *Московия.* 2006. № 10.
- [ГОСТ 25645. 201-83..., 1984] ГОСТ 25645. 201-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полёте (БРЭКАКП). Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1984.
- [ГОСТ 25645.218-90..., 1991] ГОСТ 25645.218-90. БРЭКАКП. Зависимость коэффициента качества космических излучений от линейной энергии. М.: Госстандарт СССР, 1991.
- [ГОСТ 25645.219-90..., 1991] ГОСТ 25645.219-90 БРЭКАКП. Модель учёта влияния пространственной неравномерности радиационного воздействия на обобщённый радиобиологический эффект. М.: Госстандарт СССР, 1991.
- [Григорьев и др., 1986] *Григорьев Ю. Г., Попов В. И., Шафиркин А. В., Антипенко Ж. Б.* Соматические эффекты хронического гамма-облучения. М.: Энергоатомиздат, 1986. 196 с.
- [Дёмин и др., 1991] *Дёмин В. Ф., Сидоренко В. А., Шевелев Я. В.* Социально-экономические критерии и показатели безопасности ядерной энергетики // *Радиационная безопасность и защита АЭС.* 1991. Вып. 13.
- [Дудкин и др., 1991] *Дудкин В. Е., Ковалёв Е. Е., Коломенский А. В.* и др. Оценки радиационной защиты при пилотируемом полёте к Марсу // *Атомная энергия.* 1991. Т. 71. С. 351–353.
- [Дудкин и др., 2000] *Дудкин В. Е., Коломенский А. В., Крючков В. П., Сакович В. А.* Радиационная защита экипажа пилотируемой экспедиции на Марс. Предварительный проект пилотируемой экспедиции на Марс. Т. 12. Ч. 5. Проект МНТЦ № 1172. Центр М. В. Келдыша, 2000.
- [Источники..., 2002] *Источники и эффекты ионизирующих излучений: Отчёт НКДАР ООН-2000.* 2002. Т. 1.
- [Ковалёв, 1976] *Ковалёв Е. Е.* Радиационный риск на земле и в космосе. М.: Атомиздат, 1976. 255 с.
- [Методические..., 2004] *Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2004. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полётах (ОО-КОКП-2004).* М., 2004.
- [Радиационная..., 1978] *Радиационная защита. Рекомендации МКРЗ.* Публикация 26. М.: Атомиздат, 1978. 87 с.
- [Рыжов, 1982] *Рыжов Н. И.* Биологическое действие ускоренных тяжёлых заряженных частиц. Дис. ... докт. мед. наук. М.: ИМБП МЗ СССР, 1982.

- [Сакович, Семёнов, 2005] Сакович В. А., Семёнов В. Ф. Радиационная безопасность при пилотируемом полёте на Марс. Концепция // Атомная энергия. 2005. Т. 99. Вып. 4. С. 301–310.
- [Федоренко, 2006] Федоренко Б. С. Радиобиологические эффекты корпускулярных излучений. Радиационная безопасность космических полётов. М.: Наука, 2006. 187 с.
- [Шафиркин, 1998] Шафиркин А. В. Исследование эффективности протяжённых радиационных воздействий в зависимости от мощности дозы и длительности облучения на основе реакции организма и отдельных его систем в ближайшем пострадиационном периоде // Авиакосмич. и экологич. медицина. 1998. Т. 32. № 3. С. 44–49.
- [Шафиркин, 1999] Шафиркин А. В. Модель радиационной скорости смертности млекопитающих, определяющая отдалённые последствия радиационного воздействия в различных дозах // Авиакосмич. и экологич. медицина. 1999. Т. 33. № 4. С. 64–69.
- [Шафиркин, 2001] Шафиркин А. В. Развитие концепции приемлемого риска // Инженерная физика. 2001. № 4. С. 32–37.
- [Шафиркин, Венедиктова, 1999] Шафиркин А. В., Венедиктова В. П. Суммарный радиационный риск для космонавтов к концу их профессиональной деятельности и за всю жизнь при осуществлении межпланетных и орбитальных космических полётов // Авиакосмич. и экологич. медицина. 1999. Т. 33. № 5. С. 57–64.
- [Шафиркин, Венедиктова, 2000] Шафиркин А. В., Венедиктова В. П. Радиационный риск образования злокачественных опухолей у космонавтов за период их жизни в результате осуществления межпланетного и орбитальных космических полётов // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2000. Т. 34. № 1. С. 14–21.
- [Шафиркин, Григорьев, 2004] Шафиркин А. В., Григорьев Ю. Г. Формализованные оценки степени модификации эффектов ионизирующей радиации при дополнительном воздействии ряда факторов на Земле и в условиях космического полёта // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2004. Т. 38. № 4. С. 14–20.
- [Шафиркин, Григорьев, 2009] Шафиркин А. В., Григорьев Ю. Г. Межпланетные и орбитальные полёты. Радиационный риск для космонавтов. Радиобиологическое обоснование. М.: Экономика, 2009. 639 с.
- [Шафиркин, Коломенский, 2008] Шафиркин А. В., Коломенский А. В. Радиационные условия и радиационный риск для космонавтов при полёте на Марс с использованием электродвигателей малой тяги // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2008. Т. 42. № 4. С. 55–62.
- [Шафиркин, Федоренко, 1998] Шафиркин А. В., Федоренко Б. С. Обоснование зависимости коэффициентов качества излучений от ЛПЭ применительно к оценке ближайших радиобиологических эффектов // Авиакосмическая и экологическая медицина, 1998. Т. 32. № 2. С. 4–9.
- [Шафиркин и др., 1999] Шафиркин А. В., Венедиктова В. П., Коломенский А. В., Петров В. М., Шуришаков В. А. Алгоритм для расчёта радиационного риска в процессе осуществления межпланетных космических полётов // Авиакосмич. и экологич. медицина. 1999. Т. 33. № 3. С. 56–62.
- [Шафиркин и др., 2007] Шафиркин А. В., Коломенский А. В., Петров В. М. Обеспечение радиационной безопасности при осуществлении пилотируемой экспедиции на Марс с учётом расчётных значений рисков превышения доз за защитой // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2007. Т. 41. № 4. С. 39–48.
- [Geard et al., 2006] Geard C. R., Jenkins-Baker G., Grabham P. et al. Human endothelial cells in 2 D and 3-D system. Noncancer effects and space-related radiations // 4th Intern.

- Workshop on Space Radiation Research and 17th Annu. NASA Space Radiation Health Investigators Workshop. Dubna. 2006. P. 34–35.
- [Guidance..., 1989] Guidance on radiation received in space activities. Recommendation of the national council on radiation protection and measurements NCRP: Report N. 98. 7910 Woodmont Avenue / Bethesda. MD. 20814, 1989.
- [Shafirkin, Petrov, 2002] *Shafirkin A. V., Petrov V. M.* Estimation of cosmonaut's radiation hazard during long term space missions on the basis of a generalized dosimetric functional // Advances in Space Research. 2002. V. 30. N. 4. P. 995–998.
- [Shafirkin et al., 2002] *Shafirkin A. V., Petrov V. M., Kolomensky A. V., Shurshakov V. A.* Lifetime total radiation risk of cosmonauts for orbital and interplanetary flights // Advances in Space Research. 2002. V. 30. N. 4. P. 999–1003.

PARTICULARITY OF RADIATION RISK APPLICATION FOR ESTIMATING HAZARD OF SPACE RADIATION IMPACT DURING THE FLIGHT

I. B. Ushakov, V. M. Petrov, A. V. Shafirkin

State Scientific Center of Russian Federation — Institute of Biomedical Problems
Russian Academy of Sciences (SSC RF-IBMP RAS), Moscow, Russia

In this work will be shown for condition interplanetary flight in maximum phase of solar activity (SA), at the spacecraft shielding thicknesses 1...20 g/cm² Al, that radiation risk during the flight may be as high as 55 to 14 % of demographic risk for the same time (the demographic risk is the mortality rate for population at a given age). As spacecraft shielding thickness increases this radiation risk greatly reduces. At the real spacecraft shielding thicknesses from 10...20 g/cm² Al, that radiation risk during the flight reduce from 20 to 14 % of demographic risk. Further increase in the radiation shelter shielding thickness (X_{sr}) and minimum habitat module shielding thickness ($X_{hmsr} = 1 \text{ g/cm}^2$) does not change these values, because of the predominating contribution of GCR in total generalized dose. The values of radiation risk for cosmonauts for orbital flights on Mir station and International space station (ISS) was assessed as 3.8 to 5.6 % from the demographic risk respectively for space flight in phases maximum and minimum SA.

Assessments of total radiation risk (TRR) over the entire lifetime for cosmonauts proved to be significantly higher. The total radiation risk is an increase of the mortality up 70 years age caused by radiation exposure, tumor and all other death causes included. In this paper presents results of calculation of total radiation risk for cosmonauts over their lifetimes and assessments of possible shortening of life expectancy (LS) on the base of generalized doses calculated for cosmonauts after a long term interplanetary cosmic flights and orbital space missions on Mir station and ISS with the use of mathematical expressions coming from the model of change mortality rate of mammals after irradiation. Tumor risk assessments for cosmonauts over lifetime after flights are also given.

Dependences of the delayed radiation consequences mentioned above on flight duration, spacecraft shielding thicknesses, solar activity period and cosmonauts' age is analyzed. Calculations of TRR over the entire lifetime for cosmonauts have shown that TRR does not depend on the age and is 20...30 times as high as that during flight. TTR over the lifetime of the cosmonauts is 3...8 times exceeds the estimate of tumor risk. Studies of A-bomb survivors, and epidemiological data (diseases in radiation workers are larger than for other fields of work) show an increase in non-cancer mortality with radiation dose. There are deaths from cardiovascular and neurovascular diseases, blood-circulation abnormalities and insult of brain.

ANALYSIS OF THE SPACE RADIATION DOSES IN THE EXTRA VEHICULAR ENVIRONMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

T. P. Dachev

Space and Technology Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia Bulgaria, e-mail: tdachev@bas.bg

The space weather and the connected with it ionizing radiation was recognized as a one of the main health concern to the International Space Station (ISS) crew. Estimation the effects of radiation on humans in ISS requires at first order accurate knowledge of the accumulated by them absorbed dose rates, which depend of the global space radiation distribution and the local variations generated by the 3D surrounding shielding distribution. The R3DE (Radiation Risks Radiometer-Dosimeter (R3D) for the EXPOSE-E platform on the European Technological Exposure Facility (EuTEF) worked successfully outside of the European Columbus module between February 2008 and September 2009. Very similar instrument named R3DR for the EXPOSE-R platform worked outside Russian Zvezda module of ISS between March 2009 and August 2010. Both are Liulin type, Bulgarian build miniature spectrometers-dosimeters. They accumulated about 5 million measurements of the flux and absorbed dose rate with 10 seconds resolution behind less than 0.41 g cm^{-2} shielding, which is very similar to the Russian and American space suits [Anderson et al., 2003; Benton et al., 2006; Shurshakov et al., 2009] average shielding. That is why all obtained data can be interpreted as possible doses during Extra Vehicular Activities (EVA) of the cosmonauts and astronauts. The paper first analyses the obtained long-term results in the different radiation environments of: Galactic Cosmic Rays (GCR), inner radiation belt trapped protons in the region of the South Atlantic Anomaly (SAA) and outer radiation belt (ORB) relativistic electrons. The large data base was used for development of an empirical model for calculation of the absorbed dose rates in the extra vehicular environment of ISS at 359 km altitude. The model approximate the averaged in a grid empirical dose rate values to predict the values at required from the user geographical point, station orbit or area in geographic coordinate system. Further in the paper it is presented an intercomparison between predicted by the model dose rate values and data collected by the R3DE/R instruments and NASA Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) during real cosmonauts and astronauts EVA in the 2008–2010 time interval including large relativistic electrons doses during the magnetosphere enhancement in April 2010. The model was also used to be predicted the accumulated along the orbit of ISS galactic cosmic rays and inner radiation belt dose for 1 orbit (1.5 hours) and 4 consequences orbits (6 hours), which is the usual EVA continuation in dependence by the longitude of the ascending node of ISS. These predictions of the model could be used by space agencies medical and other not specialized in the radiobiology support staff for first approach in the ISS EVA time and space planning.

1. INTRODUCTION

The radiation field around the ISS is complex, composed by galactic cosmic rays (GCR), trapped radiation of the Earth radiation belts, solar energetic particles, albedo particles from Earth's atmosphere and secondary radiation produced in the shielding materials of the spacecraft and in biological objects.

1.1. Galactic cosmic rays

The dominant radiation component in near Earth space environment are the galactic cosmic rays (GCR) modulated by the solar activity. The GCR are charged particles that originate from sources beyond our solar system. They are thought be accelerated

at the highly energetic sources like neutron star, black holes and supernovae within our Galaxy. GCR are the most penetrating of the major types of ionizing radiation. The distribution of GCR is believed to be isotropic throughout interstellar space. The energies of GCR particles range from several tens up to 10^{12} MeV·nucleon⁻¹. The GCR spectrum consists of 98 % protons and heavier ions (baryon component) and 2 % electrons and positrons (lepton component). The baryon component is composed of 87 % protons, 12 % helium ions (alpha particles) and 1 % heavy ions [Simpson, 1983]. Highly energetic particles in the heavy ion component, typically referred to as high Z and energy (HZE) particles, play a particularly important role in space dosimetry [Benton, Benton, 2001]. HZE particles, especially iron, possess high-LET and are highly penetrating, giving them a large potential for radiobiological damage [Kim et al., 2011]. Up to 1 GeV, the flux and spectra of GCR particles are strongly influenced by the solar activity and hence shows modulation which is anti-correlated with solar activity.

1.2. Trapped radiation belts

Radiation belts are the regions of high concentration of the energetic electrons and protons trapped within the Earth's magnetosphere. There are two distinct belts of toroidal shape surrounding Earth where the high energy charged particles get trapped in the Earth's magnetic field. Energetic ions and electrons within the Earth's radiation belts pose a hazard to both astronauts and spacecraft. The inner radiation belt, located between about 0.1 to 2 Earth radii, consists of both electrons with energies up to 10 MeV and protons with energies up to ~100 MeV. The outer radiation belt (ORB) starts from about 4 Earth radii and extends to about 9...10 Earth radii in the anti-sun direction. The outer belt mostly consists of electrons whose energy is not larger than 10 MeV. The electron flux may cause problems for components located outside a spacecraft (e.g. solar cell degradation). They do not have enough energy to penetrate a heavily shielded spacecraft such as the ISS wall, but may deliver large additional doses to astronauts during extra vehicular activity [Dachev et al., 2009, 2012a, b]. The main absorbed dose inside the ISS is contributed by the protons of the inner radiation belt. The South-Atlantic Anomaly (SAA) is an area where the radiation belt comes closer to the Earth surface owing to a displacement of the magnetic dipole axes from the Earth's center. The daily average SAA doses reported by [Reitz et al., 2005] inside of the ISS vary in the range 74...215 $\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$ for the absorbed dose rates and in the range 130...258 $\mu\text{Sv}\cdot\text{d}^{-1}$ for the averaged equivalent daily dose rates.

1.3. Solar Energetic Particles (SEP)

The SEP are mainly produced by solar flares, sudden sporadic eruptions of the chromosphere of the Sun. High fluxes of charged particles (mostly protons, some electrons and helium and heavier ions) with energies up to several GeV are emitted by processes of acceleration outside the Sun. The time profile of a typical SEP starts off with a rapid exponential increase in flux, reaching a peak in minutes to hours. The energy emitted lies between 15 and 500 MeV·nucleon⁻¹ and the intensity can reach $104\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$. Electrons with energies of ~0.5 to 1 MeV arrive at Moon, usually traveling along interplanetary field lines, within tens of minutes to tens of hours.

Protons with energies of 20 to 80 MeV arrive within a few to ~10 hours, although some high energy protons can arrive in as little as 20 minutes. SEP are relatively rare and occur most often during the solar maximum phase of the 11-year solar cycle. In the years of maximum solar activity up to 10 flares can occur, during the years of minimum solar activity only one event can be observed on average [Lantos, 1993].

The radiation field at a location, either outside or inside the spacecraft is affected both by the shielding and surrounding materials [Badhwar et al., 1998; Benton, Benton, 2001; NCRP, 2002]. Dose characteristics in LEO depend also on many other parameters such as the solar cycle phase, spacecraft orbit parameters, helio and geophysical parameters.

Recently the radiation environment inside and outside of ISS has been studied with various arrangements of radiation detectors. The paper first analyses the obtained long-term results in the different radiation environments of: Galactic Cosmic Rays (GCR), inner radiation belt trapped protons in the region of the South Atlantic Anomaly (SAA) and outer radiation belt (ORB) relativistic electrons. The dose rates and fluxes was measured in 2008–2009 by the R3DE active dosimeter, mounted in EXPOSE-E facility outside the Columbus module of ISS and by the R3DR active dosimeter in EXPOSE-R facility outside the Russian Zvezda module of the ISS.

2. INSTRUMENTATION

The (Radiation Risks Radiometer-Dosimeter (R3D) R3DE and R3DR instruments (Figure 1) are successors of the Liulin-E094 instrument, which was part of the experiment Dosimetric Mapping-E094 headed by Dr. G. Reitz that was placed in the US Laboratory Module of the ISS as a part of Human Research Facility of Expedition Two Mission 5A.1 in May–August, 2001 [Reitz et al., 2005; Dachev et al., 2002, 2006; Nealy et al., 2007; Wilson et al., 2007; Slaba et al., 2011].

The experiments with the R3DE/R spectrometers were performed after successful participations to ESA Announcements of Opportunities, led by German colleagues Gerda Horneck and Donat-P. Häder [Horneck et al., 1998]. The spectrometers were mutually developed with the colleagues from the University in Erlangen, Germany [Streb et al., 2002; Häder, et al., 2009]. The R3DE instrument for the EXPOSE-E facility on the European Technological Exposure Facility (EuTEF) worked outside of the European Columbus module of the ISS between 20th of February 2008 and 1st of September 2009 with 10 seconds resolution behind less than 0.4 g·cm⁻² shielding.

The R3DR spectrometer was launched inside of the EXPOSE-R facility (Figure 2) to the ISS in December 2008 and was mounted at the outside platform of Russian Zvezda module of the ISS. The first data were received on March 11, 2009. Until 27th of January 2011 the instrument worked almost permanently with 10 seconds resolution.

The exact mounting locations of the both instruments are seen in Figure 3. The Figure is discussed comprehensively in the data analysis part of the paper.

R3DE/R instruments was a low mass, small dimensions automatic devices that measures solar radiation in 4 channels and ionizing radiation in 256 channels. The 4 solar UV and visible radiations photodiodes are seen in the center of the Figure 1, while the silicon detector is behind the aluminum box of the instrument; that is why is not seen in the picture. It is situated above the 4 photodiodes.



Figure 1. External view of R3DE instrument. R3DR instrument is with very similar external view



Figure 2. External view of the EXPOSE-R facility. The R3DR instrument was situated inside of the red oval. EXPOSE-E facility was with very similar external view

They are Liulin type energy deposition spectrometers [Dachev et al., 2002]. The four optical channels use 4 photodiodes with enhanced sensitivity in the following ultraviolet (UV) and visible ranges: UV-A (315...400 nm), UV-B (280...315 nm), UV-C (<280...nm) and Photosynthetic Active Radiation (PAR) (400...700 nm). They are constructed as filter dosimeters and measure the solar UV irradiance in W/m^2 . Additional measurements of the temperature of UV photodiodes are performed for more precise UV irradiance assessments. The size of the aluminum box of the R3DR instrument is $76 \times 76 \times 34$ mm.

The block diagram of the instruments is shown in Figure 4. Two microprocessors control the ionizing and the solar radiation circuitry, respectively, and the data are transmitted by standard serial interface of RS422 type through the EXPOSE-E/R facilities to the telemetry of Columbus module or Russian segment of the ISS. The photodiodes and the silicon detector are placed close to the preamplifiers to keep the noise level low. The signals from the solar radiation channels and the temperature sensor are digitized by a 12 bit A/D converter. The analysis of these data is performed by the University of Erlangen, Germany (<http://www.zellbio.nat.uni-erlangen.de/forschung/lebert/index.shtml>).

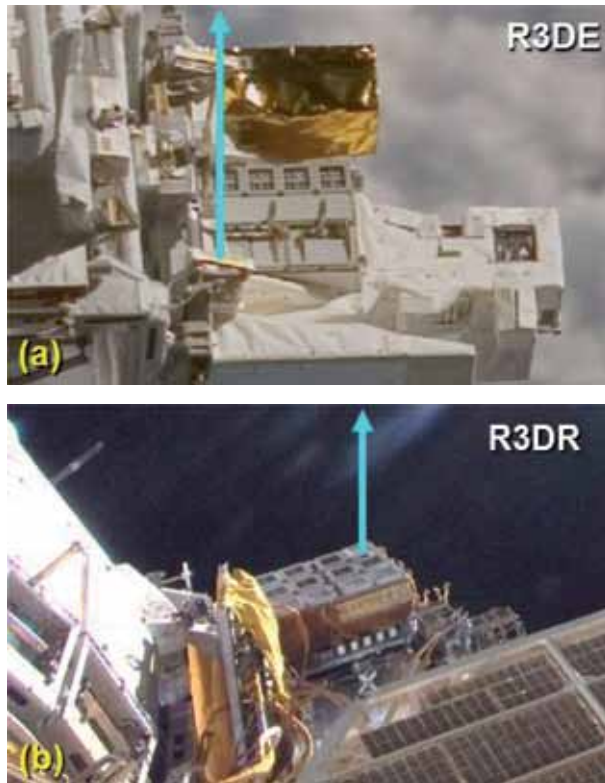


Figure 3. Real photographs of the mounting positions of the EXPOSE-E/R facilities. The bases of the arrows show the exact places of R3DE/R instruments

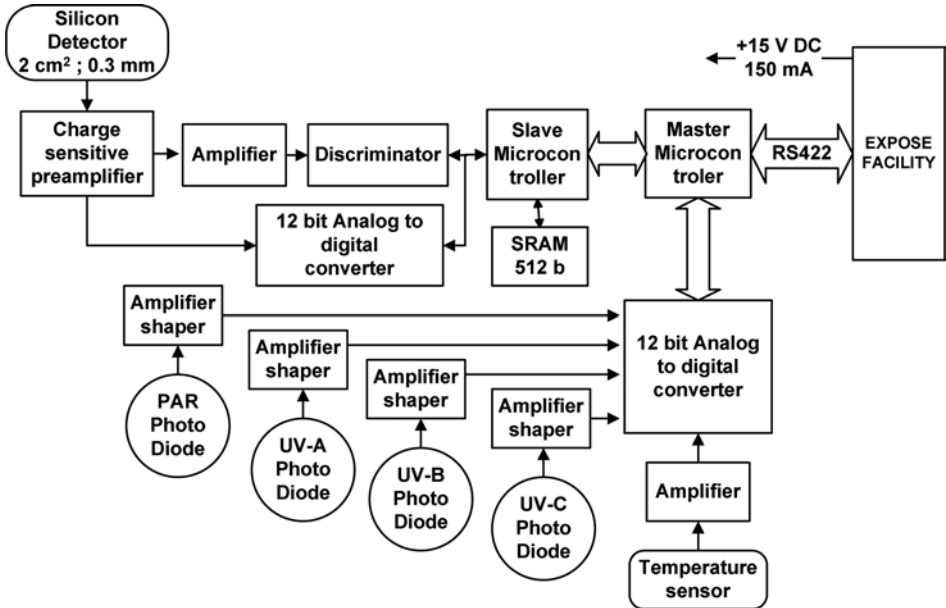


Figure 4. Block diagram of the R3DE/R instruments

The ionizing radiation is monitored using a semiconductor PIN diode detector (2 cm^2 area and 0.3 mm thick). Its signal is digitized by a 12 bit fast A/D converter after passing a charge-sensitive preamplifier. The deposited energies (doses) are determined by a pulse height analysis technique and then passed to a discriminator. The amplitudes of the pulses $A[V]$ are transformed into digital signals, which are sorted into 256 channels by a multi-channel analyzer. At every exposure time interval one energy deposition spectrum is collected. The energy channel number 256 accumulates all pulses with amplitudes higher than the maximal level of the spectrometer of 20.83 MeV . The methods for characterization of the type of incoming space radiation are described in [Dachev, 2009].

The “System international (SI)” determination of the dose is used, in order to calculate the doses absorbed in the silicon detector. SI determines that the dose is the energy in Joules deposited in one kilogram. The following equation is used:

$$D[GY] = K \sum_{i=1}^{256} (EL_i) [J] / MD [\text{kg}], \quad (1)$$

where K is a coefficient; MD — the mass of the solid state detector in [kg]; EL_i is the energy loss in Joules in channel i . The energy in MeV is proportional to the amplitude A of the pulse $EL_i [\text{MeV}] = A [\text{V}] / 0.24 [\text{V}/\text{MeV}]$. $0.24 [\text{V}/\text{MeV}]$ is a coefficient depending on the used preamplifier and sensitivity of it used.

The construction of the R3DE/R boxes consists of 1.0 mm thick aluminum shielding in front of the detector. The total shielding of the detector is formed by additional internal constructive shielding of 0.1 mm copper and 0.2 mm plastic material. The total external and internal shielding before the detector of R3DR device is $0.41 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$. The calculated stopping energy of normally incident particles to the detector is 0.78 MeV for electrons and 15.8 MeV for protons [Berger et al., 2012]. This means that only protons and electrons with energies higher than the above mentioned could reach the detector.

3. DATA ANALYSIS

3.1. Global distribution

Figure 5 presents the global view on the R3DE dose rate, flux and energy data for the time period between 21/10/2008 and 24/02/2009. The ISS altitude for this period varies between 364 and 375 km . The first 2 panels contain $786,380$ measurements of the flux in the upper panel and of the absorbed dose rate in the panel below. On the Figure 5a except the global map of the flux the isolines of the L value [McIlwain, 1961; Heynderickx et al., 1996a] at the altitude of the ISS are also presented with red dashed lines. It is seen that the lines of equal flux in the north and south high latitude regions follow very well the L -shell isolines as expected. The place and area of the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAA) is well seen by the last close isoline of 0.26 Gauss on Figure 5c. Because of relative low magnetic field strength in the SAA the protons in the inner radiation belt penetrated deeper in the upper atmosphere and reach the altitude of the station forming large maximums of the flux and dose respectively. Both the flux and dose rate maximums was displaced from the magnetic field minimum in South-East direction, while the dose rate maximum goes even further to the same direction.

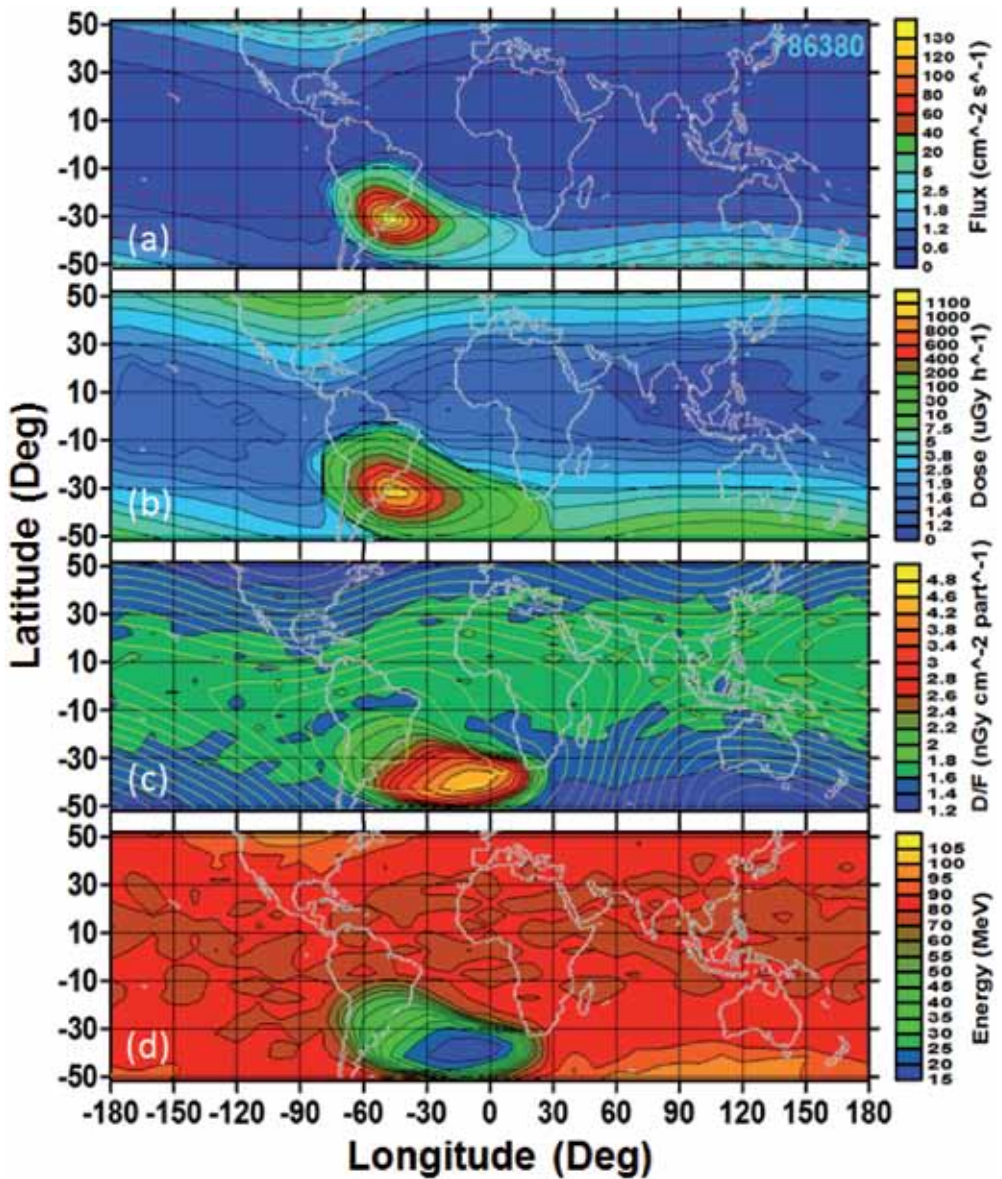


Figure 5. Global distribution of the R3DE dose rate, flux, D/F ratio and incident energy data in the period 21 October 2008 – 24 February 2009

On the Figure 5c the global distribution of the dose to flux ratio (D/F) in $\text{nGy}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{particle}^{-1}$ is presented. 247 277 measurement points was used. D/F ratios larger than $1 \text{ nGy}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{particle}^{-1}$ was selected and plotted. It is seen that the ratio form a maximum with D/F value greater than $4 \text{ nGy}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{particle}^{-1}$ in the South-East edge of the anomaly. The global distribution of the calculated from the D/F ratio incident energy of the arriving to the detector inner radiation belt protons [Heffner, 1971; Dachev, 2009] was presented at the Figure 4d and as expected form a minimum at the places of the dose to flux ratio maximum in the Figure 4c.

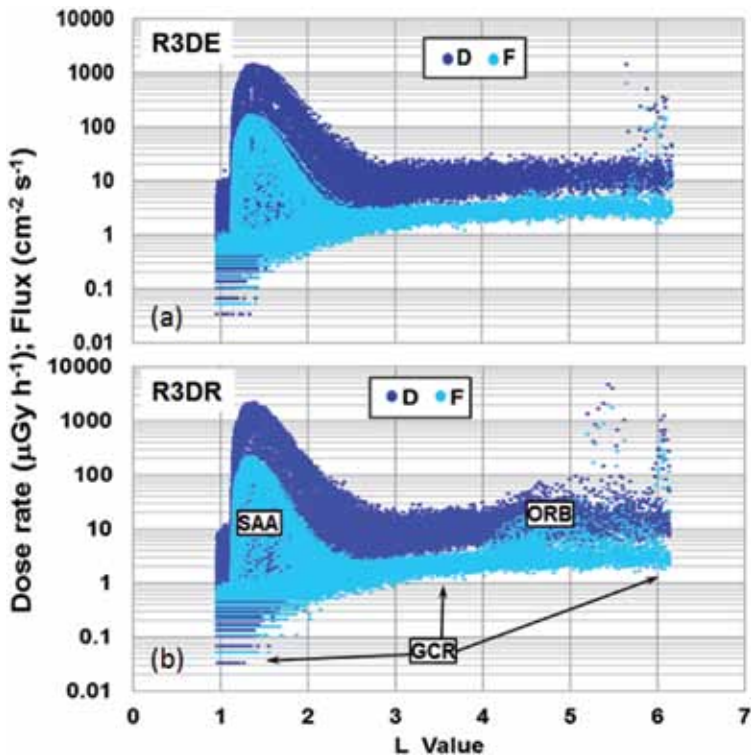


Figure 6. Comparison of the dose rate and flux data measured with 10 s resolution by the R3DE/R instruments in the period 10–20 April 2009

The center of the 15...20 MeV protons maximum is with coordinates 15° W, 38° S. This result is controversial than the AP-8 MIN [Vette, 1991; Heynderickx et al., 1996b] predictions, which show the place of the maximum almost at same latitude but at about 38° west longitude.

The GCR dose and flux global distribution is presented in the Figures 5a and b with all areas outside the SAA region. It forms wide minimum close to the geomagnetic equator and rise toward the magnetic poles in both hemispheres (For more information please look Figure 6). For the regions outside the SAA the calculated values for the dose to flux ratio and for the incident energies presented in the Figures 5c and d are not valid because of the small statistics in the spectra.

3.2. R3DE/R data comparison

Figure 6 presents in 2 panels the dose rate (black (dark blue) points) and flux data (gray (sky blue) points) obtained in the 10–20 April 2009 time interval as measured with 10 s resolution by the R3DE/R instruments. The bottom panel (Figure 6b) contain data from the R3DR instrument, while the top panel (Figure 6a) contain data from the R3DE instrument.

Three different radiation sources are easily distinguished visually from the data presented in both panels. The major amount of measurements with more than 7000 points per day is concentrated in the zone of GCR, which is seen as area with many

points in the lower part of the panels in L-values range between 0.9 and 6.2. The covered dose rate range is between 0.03 and 15...20 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$. The lowest rates are close to the magnetic equator ($L < 1.5$), while the highest are at high latitudes ($L > 4$) equatorwards from both magnetic poles.

The maximum of the inner radiation belt protons observed in the region of the SAA is seen in the left side of the panels with dose rates between 10 and 1250 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ from R3DR instrument (Figure 6b), while the maximum from R3DE instrument is smaller and reach 1100 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (Figure 6a).

The reason of R3DR SAA dose rates being higher than the R3DE dose rates is seen in Figure 3. The 2 photographs on Figure 3 presented the surrounding of the R3DE and R3DR instruments on ISS. As mentioned before, R3DE was located at the top of the EuTEF platform outside the European Columbus module. In Figure 3a, the lower end of the heavy arrows pointing “up” (along the Earth radius) in the R3DE photograph shows the exact place of the instrument. It is seen that it was surrounded by different constructive elements of the EuTEF platform and Columbus module, which produced additional shielding of the instrument against the SAA flux of 30...100 MeV protons. The R3DR position presented in Figure 3b shows that this instrument was far from the Zvezda module at the end of the EXPOSE-R facility and was practically shielded only from below.

The wide maximum observed on Figure 6b for L-values between 3.5 and 6.2 was connected with the registration of rare sporadic relativistic electrons precipitations (REP) generated in the outer radiation belt [Wrenn, 2009; Dachev et al., 2009, 2012a, b]. Here the R3DR maximum of dose rate reached value of about 5000 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$. This large dose is deposited by electrons with energies above 0.78 MeV. The R3DE ORB maximum was also lower and “thinner” than the R3DR maximum. The reason was same as the described above for the SAA maximum.

Figure 7 presents the result of comparison of the daily GCR dose rates for the period between 12 March and 20 June 2009 as measured by the R3DE/R instruments. The daily GCR dose rate was obtained by averaging of 5000...8200 measurements per day (7024 in average) with 10 s resolution at all latitudes in the altitudinal range 353...361 km above the Earth. Both data sets are situated in the bottom of the Figure and follow slowly decreasing with time trend, which can be associated with the decreasing altitude of the ISS from 360 down to 353 km. This trend is in opposite direction than the expected increase of the GCR dose rates with the increase of the Oulu Neutron monitor (NM) count rate shown with quadrats above the two dose rates curves. The Oulu NM count rate increase because of the decrease of solar activity in the end of the 23rd solar cycle. The decreasing solar activity leads to decrease of the amount and speed of solar wind and respectively decrease of the embedded magnetic field strength, which couldn't deflect effectively the GCR entering in the solar system.

The shapes of the dose rate curves are also strongly affected by the L value of the place where the averaged values was obtained. This is well seen when a comparison is made between the mean L curve in the top of the Figure 7 with the two daily dose rate curves in the bottom. L values are presented according to the right scale of the Figure. As expected there is almost positive correlation between them.

The difference between R3DE and R3DR dose rate data is about 10 $\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$ during the whole period of about 3 months. Relatively small part of this difference is produced by the additional dose rate produced by secondary particles in the heavily shielded R3DE instrument but another mechanism have to be found to be described

the difference. This will be subject of another more precise investigation with use of theoretical models.

In the bottom part of Figure 8 are shown the average daily dose rates obtained in the region of the SAA as measured by the R3DE/R instruments. The daily SAA dose rate was obtained by averaging of 400...500 measurements per day with 10 s resolution at all latitudes in the altitudinal range 357...361 km above the earth. In the top part of the figure the maximal observed per each day dose rates in $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ are presented. It is well seen that both curves of hourly and daily dose rates obtained by R3DR instrument are higher than the R3DE dose rates for the whole time interval between 12 March and 20 June 2009. The reason was already discussed in the presentation of Figure 6.

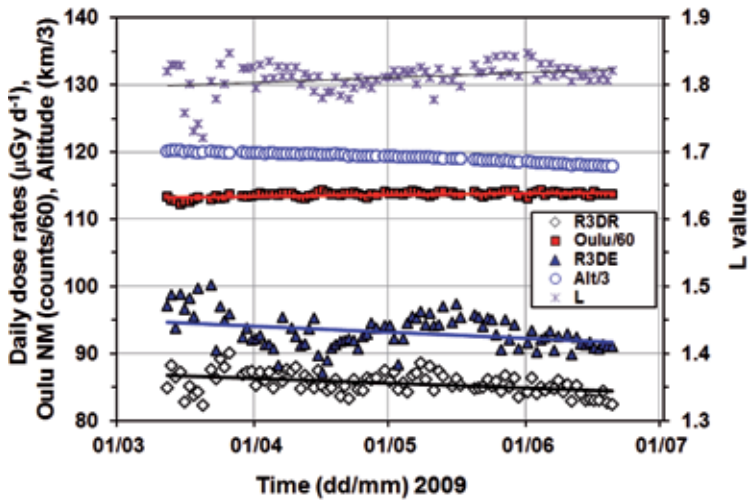


Figure 7. Comparison of the daily GCR dose rates measured simultaneously by the R3DE/R instruments in 2009

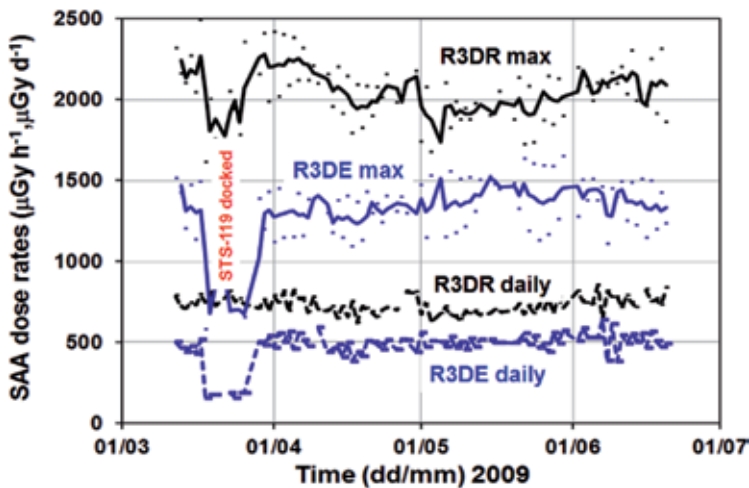


Figure 8. Comparison of the daily SAA dose rates measured simultaneously by the R3DE/R instruments in 2009

The strong depletion in the maximum dose rates in the left side of the Figure 8 was generated by the additional shielding, which USA Space Shuttle 78 tons body on his mission STS-119 provided to both instruments when it was docked with the ISS [Dachev et al., 2011a].

Figure 9 shows moving averaged dose rates inside the ORB as measured by the R3DE/R instruments. The daily, average ORB dose rate over the whole period from R3DR is $4.9 \mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$, while the daily, average ORB dose rate over the whole period from R3DE is about 3 times smaller — $1.7 \mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$. The reason for the smaller dose rates measured by R3DE instrument is same as already described for the SAA dose rates.

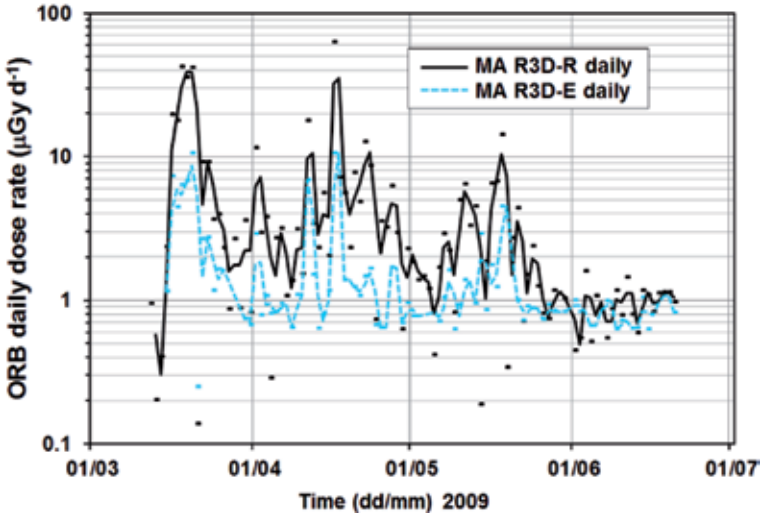


Figure 9. Comparison of the daily ORB dose rates measured simultaneously by the R3DE/R instruments in 2009

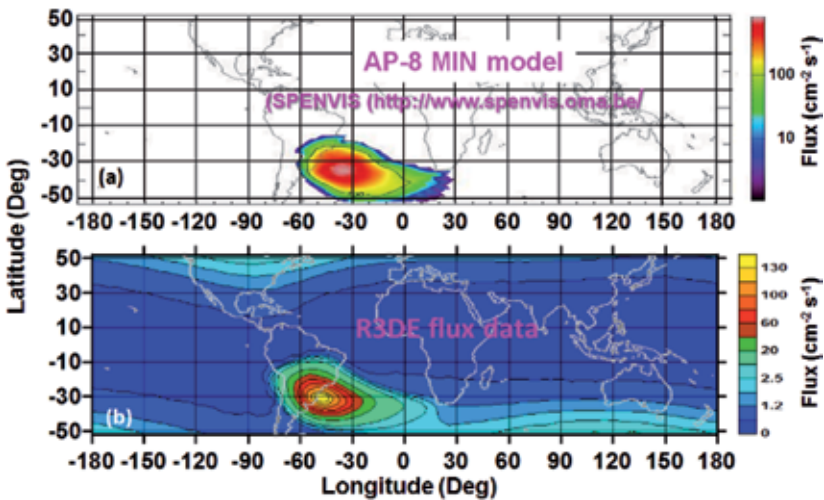


Figure 10. Comparison of the global distribution of the R3DE flux data in the period 21 October 2008 – 24 February 2009 with the AP-8 MIN model

Table 1 summarizes the results of the observations made simultaneously by the R3DE/R instruments on ISS in 2009. The table practically presented by numbers the observations presented on Figures 6–10.

Table 1. Comparison of the hourly and daily dose rates measured simultaneously by the R3DE/R instruments in 2009

Parameter	Average R3DR	Average R3DE	Comments
SAA parameter			
Hourly averaged absorbed dose rate (>500 meas. per day) ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	352	296	R3DR > R3DE
Daily averaged absorbed dose rate (in Si) ($\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$)	537	426	R3DR > R3DE
GCR parameter			
Hourly averaged absorbed dose rate (>6000 meas. per day) ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	3.39	3.79	R3DE > R3DR
Daily averaged absorbed dose rate (in Si) ($\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$)	81.40	91.10	R3DE > R3DR
ORB parameter			
Hourly averaged absorbed dose rate (no limit) ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	98.0	42.0	R3DR > R3DE
Daily averaged absorbed dose rate (in Si) ($\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$)	76.0	8.6	R3DR > R3DE

3.3. Empirical model for calculation of the absorbed dose rates in the extra vehicular environment of ISS at 359 km altitude

Figure 10 presents comparison of the global distribution of the R3DE flux data in the period 21 October 2008 – 24 February 2009 with the AP-8 MIN model. Figure 10b presented same data as shown in the Figure 5a. Figure 10a was created using the available in SPENVIS (<http://www.spennis.oma.be/>) AP-8 MIN model [Vette, 1991]. The model is calculated for the epoch of 1970, for the minimum of the solar activity at altitude of 359 km and for protons with energy larger than 15.8 MeV. It is seen that the external oval of the data and the model are similar but the coordinates of the R3DE SAA was at -50° west longitude -30° south latitude. These values are in comparison with AP-8 MIN moved with -12° (0.3° per year) to the west and with 2° (0.05° per year) to the north and coincided relatively well with the values obtained by [Wilson et al., 2007]. Another big difference between the model and the experimental data is seen for the value of the flux central location. The predicted by the model values were much higher than the observed. This can be explained by the fact that the R3DE SAA flux data are obtained in the end of the 2008 and beginning of 2009, which was in the period of extremely low solar activity not observed before and respectively not included in the AP-8 MIN model.

The large data base obtained by the R3DE instrument was used for development of an empirical model for calculation of the absorbed dose rates from GCR and inner radiation belt protons in the extra vehicular environment of ISS at 359 km altitude. The model approximate the averaged in a grid empirical dose rate values to predict

the values at required from the user geographical point, station orbit or area in geographic coordinate system [Bankov et al., 2010]. The model is valid for the location of R3DE instrument outside the ISS at the EXPOSE-E platform behind $0.41 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ shielding. These predictions of the model could be used by space agencies medical and other not specialized in the radiobiology support staff only for first rough approach in the ISS EVA time and space planning.

Figure 11 contains 2 panels. In the upper panel (Figure 11a) the global distribution of the R3DE averaged dose rates (in $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) data obtained in the period 21 October 2008–24 February 2009 was presented, while the lower panel (Figure 11b) presented the result of the calculated by the model global distribution of the dose rates. It is seen that both pictures are very similar and this verify that the model predicted well the dose rates in the areas of predominated inner belt energetic proton of the SAA region and areas of predominated GCR outside SAA in equatorial, middle and high latitudes.

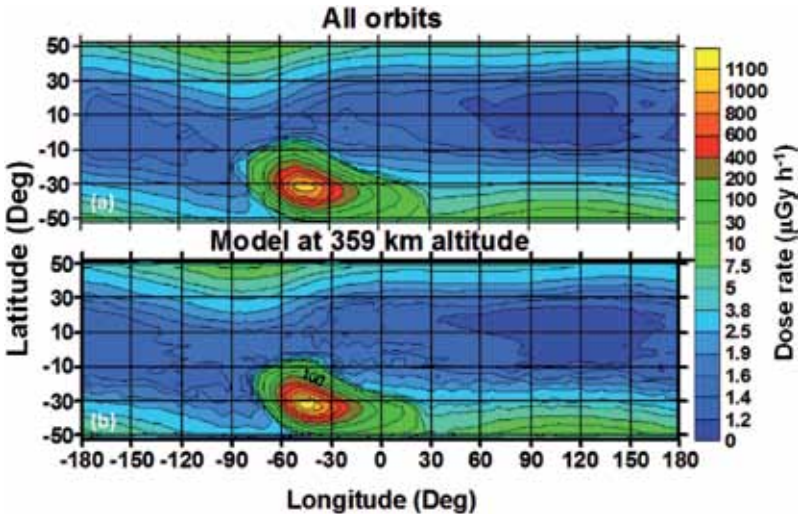


Figure 11. Comparison of the global distribution of the R3DE dose rate data in the period 21 October 2008 – 24 February 2009 with the predicted by the empirical model data

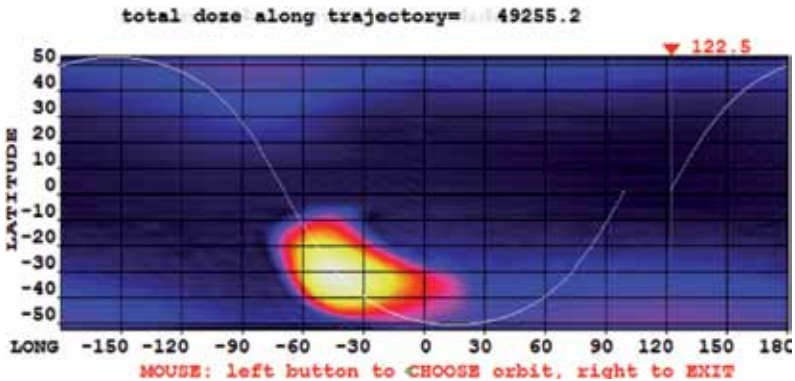


Figure 12. Example of the graphical output from the ORBIT model for an orbit with ascending node equal to 122.5°

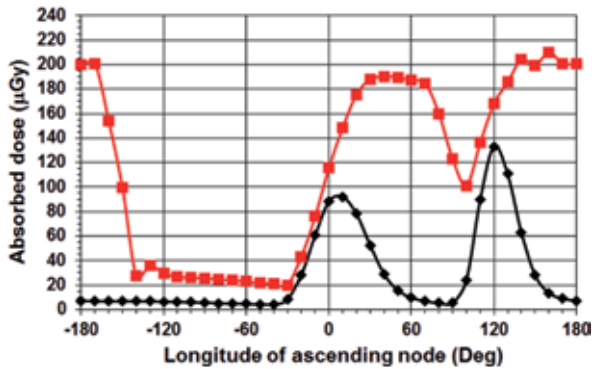


Figure 13. Predicted by the model accumulated along the orbit absorbed dose for 1 orbit (~1.5 hours) (curve with diamonds) and 4 consequences orbits (~6 hours) (curve with squares)

The empirical model is available online from the following 2 links: http://www.stil.bas.bg/dwp/R3DE_POINT_model.zip and http://www.stil.bas.bg/dwp/R3DE_ORBIT_model.zip. Both links allowed the possible user of the model to obtain for each model a compressed (ZIP) application (exe file), which directly in the computer of the user perform the calculation and present the result. The first link is for the so named “POINT” model, which calculated and presented the dose rate result (in $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) for a point with geographic coordinates inside of the set of coordinates with following limits: $-52^\circ < \text{Latitude} < 52^\circ$, $-180^\circ < \text{Longitude} < 180^\circ$. To be calculated the dose it is necessary the obtained value to be divided by 360.

The second link is for the so named “ORBIT” model, which calculated and presented the summarized dose rate result (in $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) along an orbit of the ISS, which ascending node is in the limit of $-180^\circ < \text{Longitude} < 180^\circ$. The step along the orbit is equal to 10 s and is same as the R3DE time interval for 1 measurement. Figure 12 presented one example of the graphical output from the “ORBIT” model for an ISS orbit with ascending node equal to 122.5° . The ascending node can be choosing by the user with movement of one arrow in the program and with pushing of the left mouse button. In the upper part after the label “total dose along trajectory” the calculated summarized dose rate is shown. To be calculated the dose it is necessary the obtained value to be divided by 360. Except the graphical output the model created automatically (in the directory where the model is) a text file with the following name “ORB_DOZ.TXT”. The file contains 4 columns: Lat. (deg), Long. (deg), Dose rate ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) and the Accumulated till the moment dose rate ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$). If you use the model please reference [Bankov et al., 2010], available online at <http://www.stil.bas.bg/FSR2009/pap144.pdf>.

Figure 13 presents the predicted by the model accumulated along the orbit absorbed dose for 1 orbit (~1.5 hours) (curve with diamonds) and 4 consequences orbits (~6 hours) (curve with squares). The model was run with a longitudinal step of 10° for both cases. It is seen that for 1 orbit case the most dangerous ascending node is this crossing the equator at 120° East longitude when a total accumulated dose along the orbit of $139 \mu\text{Gy}$ is predicted. The 4 orbit case was choose because usual EVA duration is about 6 hours i.e. 4 orbits. The most dangerous ascending node for this case are this crossing the equator in the interval 140° East longitude to 170° West longitude when a total accumulated doses of about $200 \mu\text{Gy}$ are predicted.

3.5. Analysis of data collected by different instruments during real cosmonauts and astronauts EVA in the 2009–2010

3.5.1. Analysis of the dose rates and doses obtained during EVA 2 of Expedition 18 on March 10, 2009. Example with predominant SAA crossings

Figure 14 purposes was: first to be shown the dose rate dynamics observed by R3DE and NASA TEPC http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/TEPC.html during the EVA 2 of Expedition 18 on March 10, 2009 between 16:22 and 21:11 for 4 h and 49 m and second to be compared the measured with R3DE instrument dose rates with the predicted by the model values.

Figure 15 supported the observations made on Figure 14 with actual information of the ground tracks of the ISS orbit during the EVA over the global maps of the R3DE measured dose rate and energy presented previously on Figure 5. The orbit numbers (1, 2 and 3) shown in Figure 14a corresponds to the numbers on Figure 15a. Also the measured values of the proton energy are shown, which according to Figure 15b increased from orbit number 1 to orbit number 3.

On Figure 14a the moving average (with period of 6 points (1 minute resolution)) of the dose rate measured by R3DE outside ISS behind less than $0.41 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ is presented. The labels on Figure 14a presents the measured at the detector of the R3DE proton energy at the positions of the maximums, while Figure 15b presented the global map and it is identical than the Figure 5d. Very similar data with 1 minute resolution was plotted on Figure 14b but from NASA TEPC situated inside ISS at physical location “SM-327”. Data was taken by <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/server> [Zapp, 2011]. Unfortunately we haven’t found what is the exact shielding of the TEPC at that location but we consider that the shielding is much higher than the R3DE shielding. On Figure 14c was presented the calculated by the empirical model dose rates along the orbits of ISS. It is necessary to be mentioned that the 3 curves on Figure 14 coincided relatively very well by the values and shape each other.

The 3 main maximums seen on Figures 14a and b was created during the ISS crossings of the inner radiation belt high energy proton zone in the region of the SAA. R3DE dose rates maximums reached about $1000 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ for orbits 2 and 3 and only $250 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ for orbit number 1. The TEPC SAA maximums for orbits 2 and 3 are much smaller, while the SAA maximum for orbit 1 was completely missing. This feature can be explained by the R3DE measured proton energies shown on Figure 14a and 15b where the proton energy for orbit number 1 at the detector of the R3DE was the smallest of all 3 and reach only 18 MeV. This proton energy wasn’t enough for penetration of the larger shielding at the TEPC location inside ISS and that is why the maximum there is missing.

The maximums, which reached up to $9.5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ in R3DE and TEPC data on Figure 14a and b are connected with the crossings of the high latitude GCR regions in the both hemispheres, while the local minimums with dose rates around $1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ and below corresponds to the magnetic equator crossings. It is remarkable that the GCR TEPC dose rate data was always higher than the R3DE dose rates. Part of this higher exposition can be attributed to the additional dose rate created by secondary particles generated in the ISS walls. Another part is connected with the fact that TEPC having smaller sensitivity ($1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) than R3DE overestimate the dose rates.

Table 2 presents the statistics for the total accumulated doses during the EVA 2 of Expedition 18 on March 10, 2009 between 16:22 and 21:11 for 4 h and 49 m.

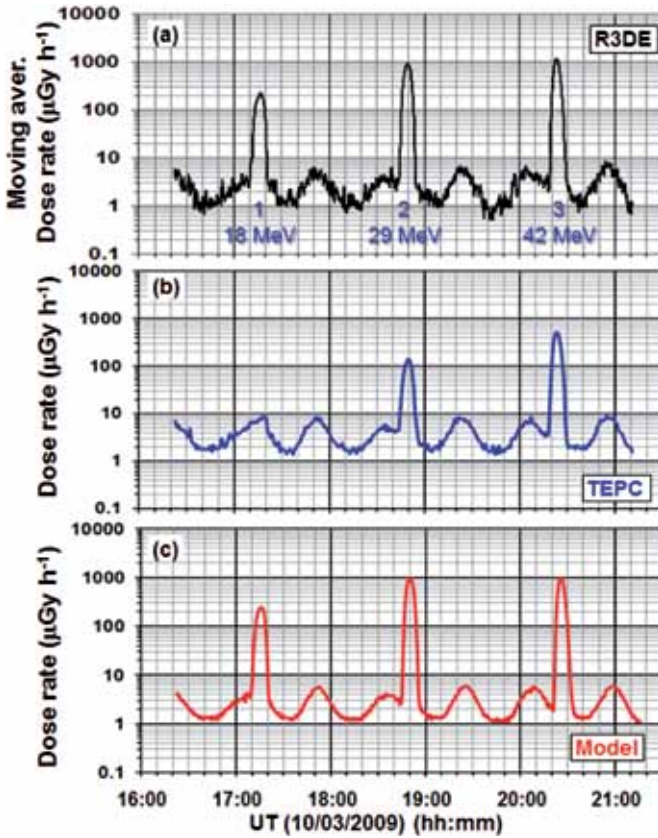


Figure 14. The dose rate dynamics observed by R3DE and NASA TEPC during the EVA 2 of Expedition 18 on March 10, 2009 between 16:22 and 21:11 for 4 h and 49 m. Measured data was compared with the model predictions

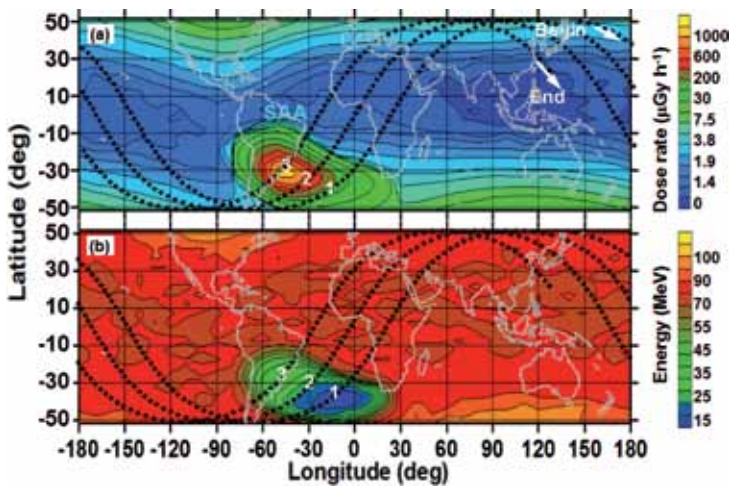


Figure 15. Global maps of the R3DE measured dose rate and energy with the ground tracks of the ISS during the EVA shown on Figure 14. The numbers (1,2 and 3) in the region of the SAA corresponded to the number of SAA crossings seen on Figure 14

Also the results of the separation of the doses accumulated by 2 different radiation sources — Protons in the inner radiation belt seen the region of SAA and GCR at low and high latitudes outside SAA. The values for the R3DE and model doses was obtained using same periods along the orbit of ISS as the available information for the “Dominant radiation source at given time” in the <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> server files. The R3DE ambient dose equivalent rates are calculated using the procedure described in [Spurny, Dachev, 2003].

Table 2. Statistics of the measured and predicted doses in different locations during the EVA 2 of Expedition 18 on March 10, 2009

Parameter	R3DE	TEPC	Model	Comments
Total accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	191/268	72/154	187	R3DE > TEPC
SAA accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	180/241	56/97	176	R3DE > TEPC
GCR accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	11/27	16/57	11	TEPC > R3DE

The analysis of the Table 2 shows: 1) the SAA absorbed and equivalent doses predominate in the total doses for both instruments and the model; 2) the R3DE SAA absorbed doses was about 3 times higher than the TEPC doses because much smaller shielding of the R3DE detector; 3) the TEPC GCR absorbed and equivalent doses was higher than the R3DE doses. The possible reasons was discussed earlier; 4) there was very good coincidence between the measured by the R3DE and predicted by the model doses.

3.5.2. *Analysis of the dose rates and doses obtained during EVA 1 of STS-119 on March 19, 2009. Example with mixed SAA and outer radiation belt (ORB) relativistic electron precipitation (REP) crossings*

Figures 16 and 17 form another pair of very similar content to the Figures 14 and 15. The 3D background of Figure 17 is identical to Figure 4 of [Dachev et al., 2012b] and presents the geographical distribution of the data for the period 1 April – 7 May 2010 when intensive REP was observed in the outer radiation belt region. The geographic longitude and latitude are on the X and Y axes, respectively. The white (white blue) curves represent equal McIlwain’s L -parameter values [McIlwain, 1961; Heynderickx et al., 1996a] at the altitude of the ISS. The closed line in the eastern Hemisphere represents $L = 1$. Other open lines rise with values 1.5, 2.5, 3.5 and 4.5 from the equator toward the poles. The dose rate is in the 3rd dimension and the values are colour coded by the logarithmic scale bar shown at the right side of the graphic. The dose rate values presented are obtained by averaging of the rough data in longitude/latitude squares 1° in size.

The REP regions was parts of the ORB and are seen in both hemispheres as bands of high dose rate values in the range $3.5 < L < 4.5$. The GCR dose rate values are also well seen in Figure 17 as enhanced bands with values between 0.5 and $10 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ equatorwards from the REP bands. The averaged L value distributions of the dose rates of the three major radiation sources are as follows: (1) GCR minimum average dose rate value is about $1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L = 1$.

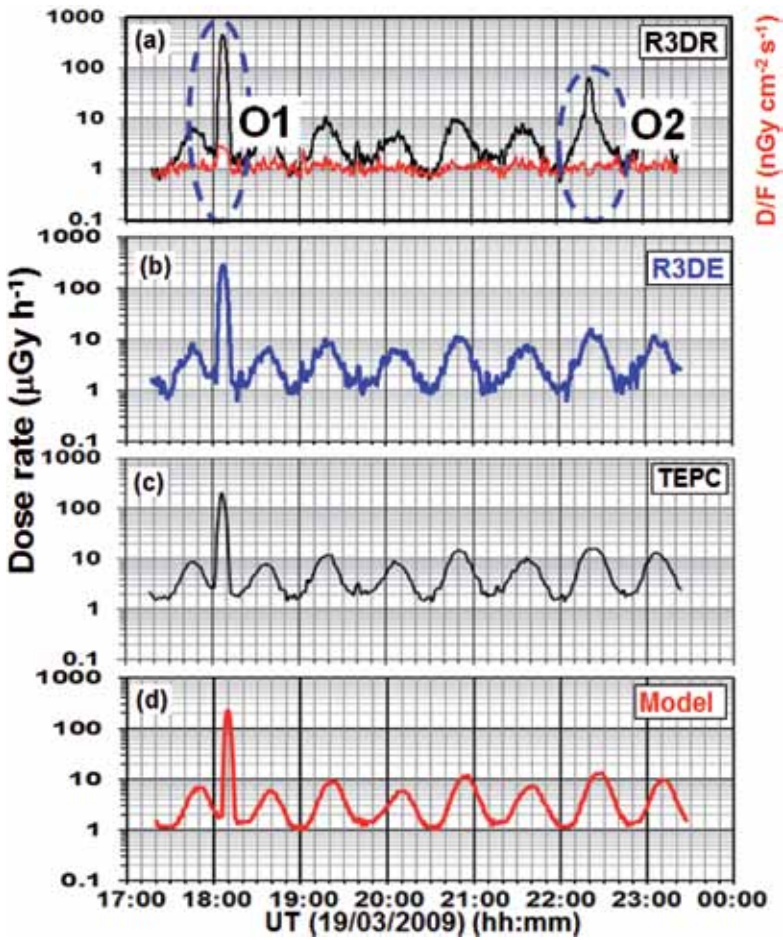


Figure 16. The dose rate dynamics observed by R3DR, R3DE and NASA TEPC during the EVA 1 of STS-119 on March 19, 2009 between 17:16 and 23:23 for 6 h and 7 m. Measured data was compared with the model predictions

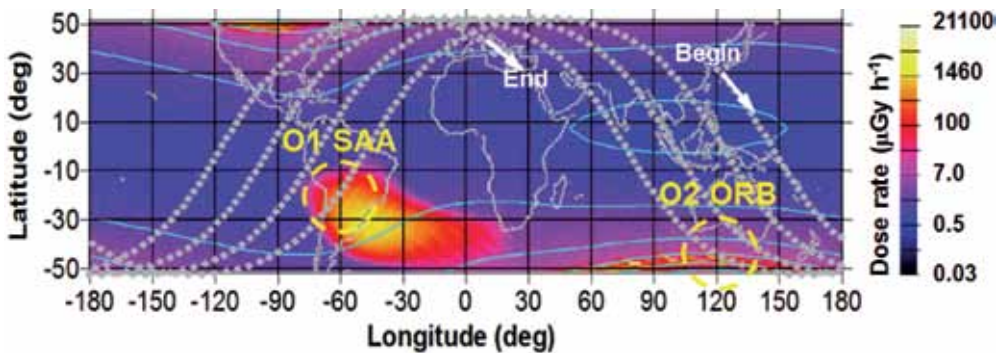


Figure 17. Global maps of the R3DR measured dose rate with the ground tracks of the ISS during the EVA shown on Figure 16. The labels O1 and O2 corresponded to the number of SAA orbit crossings seen on Figure 16. The white (white blue) curves represent equal L -parameter values. South and north ORB regions are situated at $3.5 < L < 4.5$

It rises up to 10...11 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=4$ and stays at this value up to $L=6.14$; (2) SAA dose rates are about 22 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=1.1$. They rise sharply to a value of 600 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=1.4$ and then slowly decrease to a value of 20 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=2.8$; (3) ORB dose rates are at a value of 18 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=3.15$, rise up to a value of 500 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=4$ and then decrease down to a value of 80 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at $L=6.14$.

Figure 16 is composed with similar dose rate dynamics observations as on Figure 14 but during the EVA 1 of STS-119 on March 19, 2009 between 17:16 and 23:23 for 6 h and 7 m. Here also is added the data obtained by the R3DR instrument. The maximum labeled with O1 is seen by all 3 instruments and by the model because it is formed during the crossings of the SAA South-West regions. Its dose rate is highest ($\sim 400 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) in the R3DR data, which was less shielded than R3DR and TEPC instruments. The lowest dose rate is observed by the TEPC being inside ISS. The maximum labeled with O2 was seen only by the less shielded R3DR instrument. The maximum is formed inside of the South Hemisphere ORB region and the predominated radiation source in it was relativistic electrons with energies above 0.78 MeV. To be proven this consideration on Figure 16a except the dose rate the dose to flux ratio is plotted. It is seen that the ratio in the O1 maximum is with values 2...3 $\text{nGy}\cdot\text{cm}^{-2}$ per particle, which is typically for protons with energies 30...50 MeV [Dachev, 2009; Heffner, 1971]. The D/F values in the O2 maximum is less than 1 $\text{nGy}\cdot\text{cm}^{-2}$ per particle, which proved that predominant radiation source there was electrons [Dachev, 2009; Heffner, 1971].

Table 3 presented the statistics for the total accumulated doses during the EVA 1 of STS-119 on March 19, 2009 between 17:16 and 23:23 for 6 h and 7 m. Also the results of the separation of the doses accumulated by 2 different radiation sources — protons in the inner radiation belt seen the region of SAA and GCR at low and high latitudes outside SAA. The values for the R3DE and model doses was obtained using same periods along the orbit of ISS as the available information for the “Dominant radiation source at given time” in the <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> server files.

Table 3. Statistics of the measured and predicted doses in different locations during the EVA 1 of STS-119 on March 19, 2009 between 17:16 and 23:23 for 6 h and 7 m

Parameter	R3DR	R3DE	TEPC	Model
Total accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	57	45	47/142	37
SAA accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	32	23	16/28	14
GCR accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	18.6	22	31/114	23
ORB accumulated absorbed dose (μGy)/equivalent dose (μSv) during the EVA	5.2	0	0/0	0

The analysis of the Table 3 shows: 1) the GCR absorbed and equivalent doses predominate in the total doses for TEPC and the model; 2) the R3DR and R3DE SAA absorbed doses was higher than the TEPC doses because much smaller shielding of their detectors; **As expected there is very good coincidence between the measured by the R3DE and predicted by the model doses.** The coincidence between the measured by the R3DR and predicted by the model doses is fair.

3.5.3. Analysis of the dose rates and doses obtained during EVA 1 of STS-131 on April 9, 2010. Example with predominant ORB REP crossings

The Space shuttle Discovery on the mission STS-131 docked with ISS at 07:44 UTC on 7th of April 2010 and undocked at 12:52 UTC on 17th of April 2010 http://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/shuttlemissions/sts131/launch/131mission_overview.html. During the STS-131 mission on ISS 3 EVA were performed by the NASA astronauts Rick Mastracchio and Clayton Anderson on 9, 11 and 13 April 2010.

After the Coronal Mass Ejection (CME) at 09:54 UTC on 3 April 2010, a shock was observed at the ACE spacecraft at 0756 UTC on 5 April, which led to a sudden impulse on Earth at 08:26 UTC. Nevertheless, while the magnetic substorms on 5 and 6 of April were moderate; the second largest in history of GOES fluence of electrons with energy >2 MeV was measured [Dachev et al., 2012a]. The R3DR data show a relatively small amount of relativistic electrons on 5 April. The maximum dose rate of $2323 \mu\text{Gy}\cdot\text{day}^{-1}$ was reached on 7 April; by 9 April, a dose of $6600 \mu\text{Gy}$ was accumulated. By the end of the period on 7 May 2010 a total dose of $11,587 \mu\text{Gy}$ was absorbed [Dachev et al., 2012a, b].

Figure 18 presents the ISS trajectory during the EVA 1 on 9 April 2010 on the global map. As in Figure 17 the same L equal values lines are presented. The SAA place and surrounding curve are taken also from Figure 5 and shown here with a heavy line. The dose rate values along the trajectory of ISS are grey scale (color) coded by the logarithmic scale bar shown at the right side in Figure 18. It is seen that the ISS trajectories during the EVA were very carefully chosen by NASA radiologists to avoid crosses of the SAA high dose rates region. The GCR doses outside the relativistic electrons precipitation zones vary between $0.1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at the magnetic equator and $15 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ at high latitudes. Because the outer radiation belt enhancement the astronauts were irradiated by the relativistic electrons. As seen they obtained the highest dose rates in the Southern Hemisphere at descending orbits at geographic latitudes above 42° South latitude. Precise analysis of the picture shows that when the trajectories reached $L=3.5$ the color coded dose rates become white, i.e. they reach the maximum ($4170 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) of the code bar in the right hand side of Figure 18.

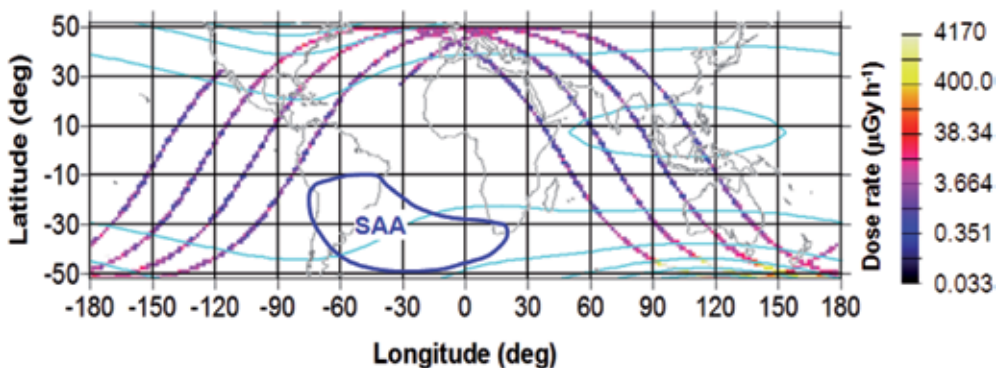


Figure 18. Gray scale (color) coded dose rates along the trajectory of the ISS during the first EVA on April 9, 2010. It is seen that the carefully chosen time of the EVA avoid SAA crossings. Highest dose rates are seen in the longitudinal range $90\dots150^\circ$ in Southern Hemisphere

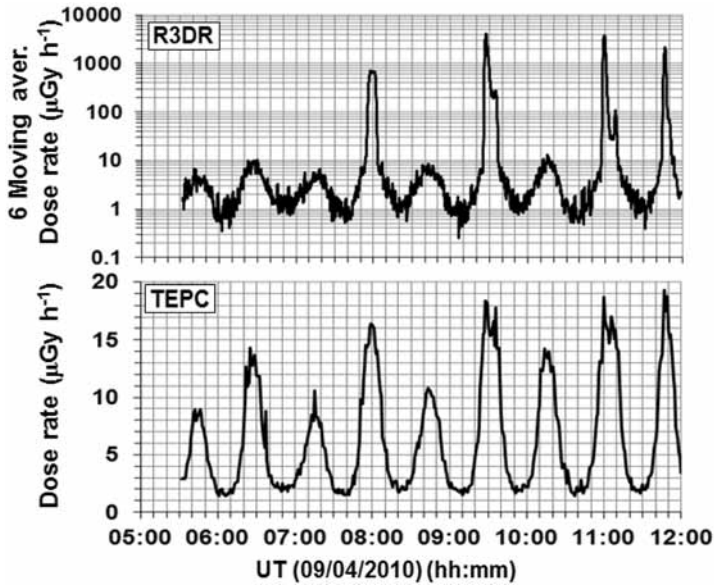


Figure 19. The dose rate dynamics observed by R3DE and NASA TEPC during the EVA1 of STS-131 on April 9, 2010 between 05:31 and 11:58 UT for 6 h and 27 m

Figure 19 presents with usual 2D graphics the same dose rate dynamics as on Figure 18 observed by R3DE and NASA TEPC during the EVA 1 of STS-131 on April 9, 2010. The sinusoidal like meander of minimums and maximums shows the sequence of Northern and Southern Hemisphere crossings through the magnetic equator of the ISS high latitude regions. Smaller maximums, excluding the last maximum, represented the Northern Hemisphere crossings, while the larger was observed in the Southern Hemisphere. The difference is because maximal L values in Northern Hemisphere are less than these in Southern Hemisphere. Looking precisely on the TEPC data it is possible to be seen that the energetic electrons outside ISS did enhance even the TEPC dose rates with few $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ and that the small maximums in TEPC data well coincide with much larger maximums in R3DR data. The TEPC dose rate maximums in REP regions can be associated even by direct impact of high energy electros or with bremsstrahlung on the TEPC detector. Similar is the situation with the dose rate dynamics during other two EVAs on 11 and 13 April.

Figure 19 also presents how and where the TEPC overestimate the GCR dose rates. This is seen well in the minimal dose rates close to the magnetic equator. Here the minimal TEPC values are about $1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, while at same places the more sensitive R3DR instrument measured much smaller dose rates reaching $0.25 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$.

Keeping in mind that the average shielding of the space suit [Anderson et al., 2003; Benton et al., 2006; Shurshakov et al., 2009] is very similar to the shielding of the R3DR detector we may conclude that a major part of the astronaut's skins were irradiated with similar doses as the measured by R3DR instrument.

Table 4 summarizes the statistics for the 3 EVAs. It is seen that the GCR TEPC absorbed doses are more than 2 times larger than the R3DR doses. The measured by R3DR instrument ORB doses during the 3 EVAs was 443, 269 and 299 μGy respectively. In comparison with TEPC absorbed doses inside ISS the R3DR measured outside absorbed doses are 5–10 times larger for these 6...7 hours during

EVA's. The difference for equivalent dose rates is about 2–3 times. (The R3DR ambient dose equivalent rates are calculated using the procedure described in [Spurny, Dachev, 2003]).

The astronauts inside ISS collected during the docking with ISS between 7:44 hour on 7th of April and 12:52 at 17th of April 2010 totally 2766 μGy or 6663 μSv according to TEPC data. For the same period R3DR instrument behind 0.41 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ shielding collected much larger doses of 14 523 μGy and 18 187 μSv . If we will consider that the R3DR measurements during the three EVAs reflected the additional doses collected by the NASA astronauts outside ISS than we find in Table 4 that this is for 20 h and 27 m totally 1067 μGy or an enhancement of 38.6 % in comparison to the astronauts being inside ISS. The equivalent additional dose according to R3DR data is 1170 μSv or an enhancement of 17.6 %. Although the obtained doses do not pose extreme risks for the astronauts being on EVA they have to be considered as permanently observed source, which requires additional comprehensive investigations.

Table 4. Estimations of the doses obtained by American astronauts during 3 EVAs on 9th, 11th and 13th of April 2010

Absorbed doses/Equivalent doses					
R3DR					TEPC [Zapp, 2011]
STS-131 EVA number	UTC from–to	GCR dose $\mu\text{Gy}/\mu\text{Sv}$	ORB dose $\mu\text{Gy}/\mu\text{Sv}$	Total $\mu\text{Gy}/\mu\text{Sv}$	Total = GCR $\mu\text{Gy}/\mu\text{Sv}$
EVA 1 6 h and 27 m	09/04/2010 05:31–11:58	17.6/49	443/443	461/492	41/138
EVA 2 7 h and 26 m	11/04/2010 05:30–12:56	18.6/53	269/269	288/322	49/163
EVA 3 6 h and 24 m	13/04/2010 06:14–12:36	18.1/56	299/299	318/355	45/144
Total 20 h and 27 m		54.3/158.4	1012/1012	1067/1170	135/445

CONCLUSIONS

The paper analyzed the obtained results in the different radiation environments of Galactic Cosmic Rays, inner radiation belt trapped protons in the region of the South Atlantic Anomaly and outer radiation belt relativistic electrons during measurements with the Bulgarian build instruments on ISS. The obtained data was behind less than 0.41 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ shielding, which is very similar to cosmonauts and astronauts space suits shielding. These measurements results can be used by space agencies medical and other not specialized in the radiobiology support staff for first approach in the ISS extra vehicular activity time and space planning.

In conclusion, we would like to mention that the R3DE/R, low mass, dimension and price instruments, proved their ability to characterize the outside ISS radiation environment including the relativistic electron precipitations. This was achieved mainly with the analysis of the deposited energy spectra, which was obtained at each measurement cycle of 10 s.

The main conclusion of the presented data is that REP events are common on the ISS. Although that the obtained doses do not pose extreme risks for astronauts being on EVA they have to be considered as a permanently observed source, which requires additional comprehensive investigations. An instrumental solution was proposed by [Dachev et al., 2011b] where the possible hardware and software solutions for a new Liulin type dosimeter was proposed. New instrument will be able on the base of the analysis of the shape of the deposited energy spectrum and the value of the dose to flux ratio to distinguish the different kind of radiation sources in space as GCR, Inner radiation belt protons and outer radiation belt electrons and to calculate, store and present on display the absorbed and equivalent doses.

Acknowledgements. The author is thankful to the following colleagues: N. Bankov, B. Tomov, Yu. Matviichuk and Pl. Dimitrov from Space Research & Technology Institute at the Bulgarian Academy of sciences for the help in the development, building and data interpretation of the R3DE/R instruments; G. Reitz, G. Horneck form DLR, Germany and D.-P. Häder, M. Lebert, M. Schuster from University of Erlangen, Germany for the cooperation in the development and operation of the R3DE/R instruments.

This work is partially supported by the Bulgarian Academy of Sciences and contract DID 02/8 with Bulgarian Science Fund.

REFERENCES

- [Anderson et al., 2003] *Anderson B. M., Nealy J. E., Kim M. H., Qualls G. D., Wilson J. W.* Analysis of a Radiation Model of the Shuttle Space Suit. NASA/TP-2003-212158, March 2003.
- [Badhwar et al., 1998] *Badhwar G. D., Atwell W., Cash B.* et al. Radiation environment on the MIR orbital station during solar minimum // *Advances in Space Research.* 1998. V. 22. N. 4. P. 501–510.
- [Bankov et al., 2010] *Bankov N., Dachev T., Tomov B., Dimitrov Pl., Matviichuk Yu.* Simulation model of the radiation dose measured onboard of the ISS // *Fundamental Space Research. Suppl. Comptes Rend. Acad. Bulg. Sci.* 2010. P. 147–149. (see also: <http://www.stil.bas.bg/FSR2009/pap144.pdf>)
- [Benton, Benton, 2001] *Benton E. R., Benton E. V.* Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B.* 2001. V. 184. N. 1–2. P. 255–294.
- [Benton et al., 2006] *Benton E. R., Benton E. V., Frank A. L., Moyers M. F.* Characterization of the radiation shielding properties of US and Russian EVA suits using passive detectors // *Radiation Measurements.* 2006. V. 41. P. 1191–1201.
- [Berger et al., 2012] *Berger M. J., Coursey J. S., Zucker M. A., Chang J.* Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions // NIST Standard Reference Database. 2012. V. 124. (see also: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html>.)
- [Dachev, 2009] *Dachev Ts. P.* Characterization of near Earth radiation environment by Liulin type instruments // *Advances in Space Research.* 2009. V. 44. P. 1441–1449. doi: 10.1016/j.asr.2009.08.007.
- [Dachev et al., 2002] *Dachev Ts., Tomov B., Matviichuk Yu., Dimitrov Pl., Lemaire J., Gregoire Gh., Cyamukungu M., Schmitz H., Fujitaka K., Uchihori Y., Kitamura H., Reitz G., Beaujean R., Petrov V., Shurshakov V., Benghin V., Spurny F.* Calibration Results Obtained

- With Liulin-4 Type Dosimeters // *Advances in Space Research*. 2002. V. 30. N. 4. P. 917–925. doi: 10.1016/S0273-1177(02)00411-8.
- [Dachev et al., 2006] *Dachev Ts., Atwell W., Semones E.* et al. Observations of the SAA radiation distribution by Liulin-E094 instrument on ISS // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. N. 9. P. 1672–1677.
- [Dachev et al., 2009] *Dachev Ts. P., Tomov B. T., Matviichuk Yu. N., Dimitrov P. G., Bankov N. G.* Relativistic Electrons High Doses at International Space Station and Foton M2/M3 Satellites // *Advances in Space Research*. 2009. P. 1433–1440. doi:10.1016/j.asr.2009.09.023.
- [Dachev et al., 2011a] *Dachev T. P., Semkova J., Tomov B., Matviichuk Yu., Dimitrov Pl., Koleva R., Malchev St., Reitz G., Horneck G., Angelis G. De, Häder D.-P., Petrov V., Shurshakov V., Benghin V., Chernykh I., Drobyshev S., Bankov N. G.* Space Shuttle drops down the SAA doses on ISS // *Advances in Space Research*. 2011. V. 47. P. 2030–2038. doi:10.1016/j.asr.2011.01.034.
- [Dachev et al., 2011b] *Dachev T., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Angelis G. De, Uchi-hori Y., Ploc O.* Main Specifications of New Liulin Type Intelligent Crew Personal Dosimeter // *Proc. 6th Scientific Conf. with Intern. Participation SES*. Sofia, 2–4 Nov. 2010. 2011. P. 76–82. (see also: http://www.space.bas.bg/SENS/SES2010/1_SpPh/10.pdf.)
- [Dachev et al., 2012a] *Dachev Ts., Tomov B. T., Matviichuk Yu. N., Dimitrov Pl. G., Bankov N. G., Reitz G., Horneck G., Häder D.-P., Lebert M., Richter P., Schuster M.* Relativistic Electron Fluxes and Dose Rate Variations Observed on the International Space Station // *JASTP*. 2012. (see also: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.07.007>.)
- [Dachev et al., 2012b] *Dachev Ts. P., Tomov B. T., Matviichuk Yu. N., Dimitrov Pl. G., Bankov N. G., Reitz G., Horneck G., Häder D.-P., Lebert M., Schuster M.* Relativistic Electron Fluxes and Dose Rate Variations during April–May 2010 Geomagnetic Disturbances in the R3DR Data on ISS // *Advances in Space Research*. 2012. V. 50. P. 282–292. (See also: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.03.028>.)
- [Häder et al., 2009] *Häder D. P., Richter P., Schuster M., Dachev Ts., Tomov B., Georgiev Pl., Matviichuk Yu.* R3D-B2 — Measurement of ionizing and solar radiation in open space in the BIOPAN 5 facility outside the FOTON M2 satellite // *Advances in Space Research*. 2009. V. 43. Iss. 8. P. 1200–1211. (see also: doi:10.1016/j.asr.2009.01.021.)
- [Heffner, 1971] *Heffner J.* Nuclear radiation and safety in space. M.: Atomizdat, 1971. 115 p. (In Russian.)
- [Heynderickx et al., 1996a] *Heynderickx D., Lemaire J., Daly E. J.* Historical Review of the Different Procedures Used to Compute the L-Parameter // *Radiation Measurements*. 1996. V. 26. P. 325–331.
- [Heynderickx et al., 1996b] *Heynderickx D., Lemaire J., Daly E. J., Evans H. D. R.* () Calculating Low-Altitude Trapped Particle Fluxes With the NASA Models AP-8 and AE-8 // *Radiation Measurements*. 1996. V. 26. P. 947–952.
- [Horneck et al., 1998] *Horneck G., Win-Williams D. D., Mancinelli R. L., Cadet J., Munakata N., Ronto G., Edwards H. G. M., Hock B., Waenke H., Reitz G., Dachev T., Haeder D. P., Briollet C.* Biological experiments on the EXPOSE facility of the International Space Station // *Proc. 2nd European Symp. — Utilisation of the Intern. Space Station*. ESTEC. Noordwijk, 16–18 Nov. 1998. SP-433. 1998. P. 459–468.
- [Kim et al., 2011] *Kim M.-H. Y., Angelis G. De, Cucinotta F. A.* Probabilistic assessment of radiation risk for astronauts in space missions // *Acta Astronautica*. 2011. V. 68. Iss. 7–8. P. 747–759.
- [Lantos, 1993] *Lantos P.* The Sun and its effects on the terrestrial environment // *Radiation Protection Dosimetry*. 1993. V. 48. N. 1. P. 27–32.
- [Lemaire, Vallatra, 1933] *Lemaire G. M., Vallatra S.* On Compton's latitude effect of cosmic radiation // *Physical Rev*. 1933. V. 43. N. 87.

- [McIlwain, 1961] *McIlwain C. E.* Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles // *J. Geophysical Research*. 1961. V. 66. P. 3681–3691.
- [NCRP, 2002] NCRP. Radiation Protection Guidance for Activities in Low Earth Orbit: Report N. 142. Bethesda, MD, 2002.
- [Nealy et al., 2007] *Nealy J. E., Cucinotta F. A., Wilson J. W., Badavi F. F., Zapp N., Dachev T., Tomov B. T., Semones E., Walker S. A., Angelis G. De, Blattnig S. R., Atwell W.* Pre-engineering spaceflight validation of environmental models and the 2005 HZETRN simulation code // *Advances in Space Research*. 2007. V. 40. N. 11. P. 1593–1610. doi:10.1016/j.asr.2006.12.030.
- [Reitz et al., 2005] *Reitz G., Beaujean R., Benton E., Burmeister S., Dachev Ts., Deme S., Luszik-Bhadra M., Olko P.* Space radiation measurements on-board ISS — the DOS-MAP experiment // *Radiation Protection Dosimetry*. 2005. V. 116. P. 374–379. (see also: [http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/116/1-4/374.](http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/116/1-4/374))
- [Shurshakov et al., 2009] *Shurshakov V. A., Petrov V. M., Ivanov Yu. V., et al.* Solar particle events observed on MIR station // *Radiation Measurements*. 1999. V. 30. N. 3. P. 317–325.
- [Simpson, 1983] *Simpson J. A.* Composition and origin of cosmic rays, NATO ASI Series C / Ed. Shapiro M. M. // *Mathematical and Physical Sciences*. 1983. V. 107. Reidel, Dordrecht.
- [Spurny, Dachev, 2003] *Spurny F., Dachev Ts.* Long-Term Monitoring of the Onboard Aircraft Exposure Level With a Si-Diode Based Spectrometer // *Advances in Space Research*. 2003. V. 32. N. 1. P. 53–58. doi:10.1016/S0273-1177(03)90370-X.
- [Streb, 2002] *Streb C., Richter P., Lebert M., Dachev T., Haeder D-P.* R3D-B, Radiation Risk Radiometer-Dosimeter on Biopan (Foton) and expose on International Space Station // *Proc. 2nd Exo-Astrobiology Workshop*. Graz, Austria. 2002. P. 71–74. ESA SP-518.
- [Vette, 1991] *Vette J. I.* The NASA/National Space Science Data Center Trapped Radiation Environment Model Program (1964–1991). NSSDC/WDCA-R&S. 1991. P. 19–29.
- [Wilson et al., 2007] *Wilson J. W., Nealy J. E., Dachev T., Tomov B. T., Cucinotta F. A., Badavi F. F., Angelis G. De, Leutke N., Atwell W.* Time serial analysis of the induced LEO environment within the ISS 6A // *Advances in Space Research*. 2007. V. 40. N. 11. P. 1562–1570. doi:10.1016/j.asr.2006.12.030.
- [Wrenn, 2009] *Wrenn G. L.* Chronology of ‘killer’ electrons: Solar cycles 22 and 23 // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2009. V. 71. P. 1210–1218.
- [Zapp, 2012] *Zapp N.* At NASA space Radiation Analysis Group. Johnson Space Center and by ‘Coordinated Data Analysis Web’ at Goddard Space Flight Center. 2012. (see also: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>.)

АНАЛИЗ ДОЗ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ПРИ ВЫХОДЕ В ОТКРЫТЫЙ КОСМОС С МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Ц. Дачев

Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук, София, Болгария

Космическая погода и связанные с ней ионизирующие излучения были признаны одной из основных проблем здравоохранения экипажа Международной космической станции (МКС). Оценка воздействия радиации на людей на МКС требует, по крайней мере, первого порядка точности знания накопленной ими поглощённой дозы радиации, которая зависит от глобального распределения космического излучения и локальных вариаций, порождённых трёхмерным распределением окружающей защиты.

R3DE (радиометр-дозиметр R3D для оценки радиационных рисков) на платформе EXPOSE-E был установлен на европейском технологическом устройстве для экспозиции (EuTEF) и успешно работал за пределами европейского модуля «Колумбус» в период с февраля 2008 по сентябрь 2009 г. Очень похожий прибор R3DR для платформы EXPOSE-R работал за пределами русского модуля «Звезда» на МКС в период с марта 2009 по август 2010 г. Оба эти прибора были типа болгарского прибора «Люлин», представляющего собой миниатюрный спектрометр-дозиметр.

Накоплено около 5 млн измерений потока с разрешением 10 с и поглощённой дозы излучения при экранировании менее $0,41 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$, которое очень похоже на среднее значение экранирования в русских и американских скафандрах [Anderson et al., 2003; Benton et al., 2006; Shurshakov et al., 2009]. Именно поэтому все полученные данные можно интерпретировать как возможные дозы радиации, получаемые при дополнительных мероприятиях в открытом космосе (EVA) космонавтами и астронавтами.

В статье проведены первые анализы долгосрочных данных, полученных в различных условиях излучения: галактических космических лучей (ГКЛ), захваченных протонов внутреннего радиационного пояса в области Южной Атлантической аномалии (SAA) и релятивистских электронов внешнего радиационного пояса (ORB). Большая база данных была использована для разработки эмпирической модели для расчёта поглощённой дозы радиации в условиях открытого космоса вблизи МКС на высоте 359 км.

В модели осуществляется приближение в среднем по сетке эмпирических значений мощности дозы радиации для прогнозирования значений, которые требуются пользователю в данной географической точке, на орбите станции или в области данной системы географических координат. Далее в статье представлено сопоставление между предсказанными моделью значениями мощности дозы и данными, собранными приборами R3DE/R и TERC-NASA (ткань — эквивалентный пропорциональный счётчик) во время реальных выходов космонавтов и астронавтов в открытый космос в период 2008–2010 гг., в том числе при значительных повышениях потоков релятивистских электронов в магнитосфере в апреле 2010 г.

Эта модель была также использована для предсказания дозы накопленных вдоль орбиты МКС галактических космических лучей и радиации внутреннего радиационного пояса на одной орбите (1,5 ч) и четырёх последовательных орбитах (6 ч), что является обычной продолжительностью работы в открытом космосе (EVA) в зависимости от долготы восходящего узла МКС. Эти предсказания модели могут быть использованы космическими агентствами, медицинскими и другими учреждениями, не специализированными в области радиобиологии, для вспомогательного персонала при предварительных оценках выхода в открытый космос с МКС и планирования космических экспедиций.

КОСМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МАГНИТОБИОЛОГИИ

К. А. Труханов

Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ ИМБП РАН),
Москва, Россия, e-mail: trukhkt@com2com.ru

В статье рассматриваются магнитобиологические проблемы, возникающие при околоземных и дальних пилотируемых полётах, а также на будущих внеземных базах (лунной и марсианской). Эти проблемы обусловлены рядом факторов: при дальних полётах — гипомагнитными условиями межпланетного пространства; при околоземных — колебаниями уровня геомагнитного поля на борту космических аппаратов (кораблей и станций) при изменении ими геомагнитных координат в полёте и вследствие процессов в магнитосфере; воздействием на экипаж собственных электромагнитных полей систем и аппаратуры пилотируемых космических объектов и оборудования баз. Обсуждаются возможные решения этих проблем. Обращается внимание на то, что в условиях широкополосного электромагнитного фона уровень, удовлетворяющий требованиям электромагнитной совместимости аппаратуры (ЭМС), может создавать неприемлемую нагрузку для человека. Космическая магнитобиология позволит продвинуться также в фундаментальных вопросах о роли ГМП, а также его инверсий для жизни на Земле и о возможности переноса жизни (панспермия) через гипомагнитное космическое пространство.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие пилотируемой космонавтики привело к возникновению проблемы безопасности человека в космосе при воздействии на него электромагнитных факторов космического пространства и электромагнитных полей систем и аппаратуры космических кораблей и будущих космических баз на Луне и на других небесных телах.

Возникло новое направление в электромагнитной биологии — космическая магнитобиология.

Одно из направлений космической магнитобиологии обусловлено тем, что в межпланетном пространстве и на поверхности Луны и Марса магнитное поле на три-пять порядков ниже привычного геомагнитного (ГМП). На человека длительное пребывание в ГМП, пониженном всего лишь в несколько раз, действует отрицательно. Биологические объекты, по-видимому, особенно чувствительны к пребыванию в гипогеомагнитных условиях (ГГМУ) на стадии развития. Это необходимо принимать во внимание при создании замкнутых биорегенеративных систем жизнеобеспечения (БСЖО), предназначенных для дальних космических кораблей и для космических баз.

Другое направление связано с магнитобиологическими проблемами, возникающими при околоземных пилотируемых полётах. Как известно, орбиты околоземных пилотируемых кораблей и станций находятся в узком коридоре. Минимальная высота выбирается из условия малого торможения космического объекта верхними слоями атмосферы (термосферой и экзосферой), максимальная лимитируется радиационными поясами Земли.

Уровень ГМП на борту околоземных пилотируемых объектов (корабля, станции) понижен незначительно. Однако он варьирует из-за непрерывной смены в полёте геомагнитных координат. Сказываются на уровне ГМП на борту также процессы, происходящие в магнитосфере. Показано [Баевский,

Бреус и др., 1998; Baevsky et al., 1998], что эти изменения действуют на систему вегетативной регуляции кровообращения космонавтов, что нежелательно.

Ещё одна магнитобиологическая проблема заключается в обеспечении безопасности человека в околоземных и дальних полётах при круглосуточном воздействии электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых системами и аппаратурой космических кораблей и будущих баз на Луне и Марсе.

Естественно, стоит проблема комбинированного воздействия упомянутых факторов и других факторов космического пространства (в особенности, космических лучей высокой энергии), также таких факторов космического полёта как, например, невесомость.

Кроме того, особняком стоит проблема возможного биологического действия некоторых электромагнитных факторов космического пространства, с которыми человек ещё не сталкивался.

В настоящей работе рассматриваются особенности воздействия упомянутых факторов и возможные способы его компенсации.

ПРОБЛЕМА ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ В ДАЛЬНОМ ПОЛЁТЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ И МАРСА

«Земная» магнитобиология уже сравнительно давно занимается биологическим действием пониженного ГМП. Вследствие широкого использования ферромагнитных материалов в гражданской и военной технике, на транспорте, в строительстве, как надземном, так и подземном (например, экранированные помещения, бункера, метрополитен) и т. д., всё большее число людей подвергается воздействию ГГМУ на производстве и в быту (см., например, [Походзей, 1999; Походзей и др., 2012]).

Краткий обзор ранних работ по биологическому действию ГГМУ содержится в работах [Дубров, 1974; Dubrov, 1978], а также в главе I монографии [Нахильницкая и др., 1978], более полный обзор — в монографии [Копанев, Шакула, 1985].

Новые сведения приведены в монографиях В. Н. Бинги (2002, 2011).

При обследовании персонала, систематически пребывающего при работе в ГГМУ (выполнены Институтом медицины труда РАМН), выяснилось, что особенно страдает нервная система [Походзей, 1999; Походзей и др., 2012]. Наблюдается дисбаланс основных нервных процессов в виде преобладания торможения, удлинения времени реакции на появление объекта в режиме аналогового слежения и т. п. **Страдает также сердечно-сосудистая система, иммунная система, система крови и другие.** Исследования были подкреплены экспериментами на животных.

Об отрицательном действии пониженного уровня ГМП на человека свидетельствуют и другие исследования. Так, например, в работе [Никитина и др., 2007] показано, что имеют место хроническое перенапряжение, болезни глаз, костно-мышечной системы и т. д.

Как результат, в России впервые в мировой практике установлены ограничения на предельные величины ослабления ГМП.

В Санитарных правилах и нормах, действующих в настоящее время (СанПин 2.1.8/2.2.4.2489-09), предельно допустимый уровень ослабления ГМП по сравнению с уровнем на местности установлен равным:

- при работе более 2 ч за смену — 2,0;
- при работе до 2 ч за смену — 4,0;
- в помещениях жилых и общественных зданий — 1,5.

Эти уровни несопоставимы с теми, которые будут иметь место при работах на Луне и Марсе и на борту межпланетных пилотируемых аппаратов.

В литературе содержится крайне мало сведений о воздействии на живые системы сильно ослабленного ГМП.

Некоторые данные содержатся в работе [Походзей, 1999].

В исследованиях Института биологии и биофизики (ИБиБ) ТГУ при участии ИМБП РАН наблюдали поведенческие реакции крыс-самцов в ГМП, ослабленном в 700...1000 раз [Кривова и др., 2008; Кривова, Труханов, 2010; Замощина и др., 2012]. Резко возростала агрессивность животных, существенно сдвигались биоритмы, возникали проблемы с памятью, наблюдались другие неблагоприятные явления.

Остановимся на одной детали постановки данного эксперимента.

Для создания ГГМУ в исследовательских целях, как известно, используют два способа. Первый — объём, где находятся биообъекты, закрывают экранами из материалов с высокой магнитной проницаемостью, которые отводят от него силовые линии ГМП, пропуская их через себя. Второй — снижают уровень ГМП в рабочем объёме с помощью электромагнитных систем, создающих магнитные поля, направленные противоположно ГМП. В литературе подчёркивали, что при экранировании ГМП его пульсации тоже ослабляются, причём искажается и их спектр. А в системах второго типа (кольца Гельмгольца и тому подобные устройства) при отсутствии или недостаточно высокой чувствительности датчиков, отслеживающих уровень магнитного поля в рабочем объёме, ослабления пульсаций не происходит. Этим нередко объясняли различие в экспериментальных результатах, получаемых в системах с экранами и в системах с компенсацией ГМП. В современных системах типа колец Гельмгольца пульсации ГМП обычно стремятся устранить.

В исследованиях ИБиБ ТГУ была использована система типа колец Гельмгольца со стабилизацией поля в рабочем объёме.

В работе [Труханов, 2012] обращено внимание на то, что изменение поведенческих реакций животных в данном случае, возможно, было обусловлено ещё и подавлением пульсаций ГМП. Проведена параллель с наблюдениями командира экипажа космической станции «Салют-6» В. В. Ковалёнка о неожиданно возникшей «повышенной нервной возбудимости членов экипажа и конфликтности при радиопереговорах с ЦУПом». Как позднее выяснилось, это произошло в период полёта, когда исчезли все типы пульсаций ГМП в околоземном пространстве. Окончание напряжённого состояния на борту совпало с их восстановлением [Ковалёнок и др., 2005; Kovalenok et al., 2006].

Особенно действует на биологические объекты пребывание в ГГМУ в стадии развития.

Так, отмечалось воздействие сниженного на четыре порядка ГМП на развитие японского тритона. Пятидневная экспозиция личинок приводила в дальнейшем к неправильному формированию позвоночника и глаз и другим отличиям вплоть до появления двухголовых особей [Asashyma et al., 1991].

Наблюдались парезы ног и крыльев у 20...40 % цыплят, вылупившихся в ГМП, ослабленном более чем в 500 раз [Казначеев, Михайлова, 1985].

Останавливалось развитие двухклеточных зародышей мыши в поле, ослабленном в 250 раз [Осипенко и др., 2008].

Исследования воздействия ГМП, ослабленного в 80...100 раз, на развитие эмбрионов японского перепела, выполненные ИМБП РАН совместно с НИИЯФ МГУ, показали, что при этом страдают сердечно-сосудистая система и некоторые другие системы [Труханов и др., 2012].

В доступной литературе практически нет работ по исследованию воздействия ГГМУ на фоне переменных ЭМП. Это приводит к затруднениям при оценке безопасности человека в этих условиях: начиная от помещений, экранированных от ГМП и заполненных устройствами, создающими электромагнитные поля самых разных частот, и до пилотируемых полётов в дальнем космосе.

Почти нет работ (за исключением [Григорьев и др., 2010]) по моделированию комбинированного воздействия электромагнитных факторов космического пространства и ЭМП, создаваемых системами и аппаратурой на борту дальнего корабля, на фоне моделируемого облучения космическими лучами и, в принципе, с учётом возможного модифицирующего влияния других факторов межпланетного полёта.

В большинстве известных экспериментов эффекты воздействия при значительных величинах ослабления ГМП были более выраженными. К сожалению, почти нет экспериментов, выполненных в одной и той же лаборатории, на одних и тех же биообъектах, но при различной величине ослабления ГМП.

Постановка таких экспериментов, на наш взгляд, крайне необходима, хотя и связана с известными трудностями, в том числе техническими.

При сопоставлении экспериментальных данных, полученных на различных биообъектах при одинаковых или разных величинах ослабления, создаётся впечатление, что существенной особенностью биологического действия гипомангнитных условий является немонотонная и, возможно, полиэкстремальная зависимость тех или иных эффектов от величины ослабления поля. И кажущийся «хаос», и противоречивость результатов экспериментов объясняется тем, что для разных биообъектов с разной степенью организации и из разных семейств, родов, видов эта зависимость, скорее всего, неодинакова. Заметим, что параметры так называемых омагниченных сред зависят от величины омагничивающего поля, как известно, полиэкстремально.

Некоторым подтверждением высказанного выше предположения являются результаты, полученные при исследовании воздействия ГГМУ на плоских червей — планарий [Новиков и др., 2007]. При величине поля ± 5 нТ (т. е. при ослаблении ГМП в десять тысяч раз) интенсивность делений планарий не отличалась от контрольных значений. «При последовательном увеличении поля до 300 нТ отмечается выраженный и достоверный стимулирующий эффект..., который исчезает в диапазоне 400...600 нТ. Далее, с 800 нТ вплоть до 1500 нТ стимулирующий эффект снова проявляется. Дальнейшее увеличение поля до 3000 нТ (т. е. при ослаблении ГМП всего в 17 раз. — К. Т.) приводит к исчезновению эффекта» (цит. по: [Новиков и др., 2007]).

Возможность проявления полиэкстремальной реакции на величину ослабления ГМП исключительно важна. Исследования необходимо проводить во всём диапазоне ожидаемых величин ослабления поля и различных их длительностей.

Вероятно, именно проявлением такой зависимости объясняются результаты Д. Е. Байшера [Weisher, 1967], впервые исследовавшего в середине 1960-х гг. воздействие резко ослабленного ГМП применительно к проблеме космических полётов, в частности по программе лунных миссий «Аполлон». Его, по-видимому, следует считать основоположником этого направления космической магнитобиологии.

В экспериментах использовались как компенсация ГМП системой колец Гельмгольца, так (в последующем) и экранирование. ГМП снижали примерно в 10^3 раз при продолжительности опытов до 10 сут.

Регистрировались некоторые общие показатели жизнедеятельности. Были проведены также психофизиологические и психические обследования с использованием тестов, которые должны были выявить, влияют ли гипоманнитные условия на высшую нервную деятельность. Выше уже указывалось, что краткий обзор результатов этих экспериментов в отечественной литературе содержится в монографиях [Дубров, 1974; Dubrov, 1978], а также [Нахильницкая и др., 1978].

Каких-либо отклонений найдено не было за исключением некоторого изменения критической частоты слияния световых мельканий (ЧССМ). После прекращения воздействия гипоманнитных условий величина ЧССМ в течение нескольких дней возвращалась к прежним значениям. Впрочем, в последующих сериях экспериментов «тесной связи между снижением величины ЧССМ и снижением напряжённости магнитного поля» обнаружено не было [Нахильницкая и др., 1978].

Эти эксперименты, как и полёты по программе «Аполлон» (почти тридцать астронавтов подверглось воздействию ГГМУ в течение 10...12 сут при выполнении лунных миссий), показали, что кратковременное пребывание в «жестких» гипоманнитных условиях, по-видимому, не влечёт за собой заметных последствий. Возможно, что такой результат был обусловлен как сравнительно небольшим временем пребывания людей вне ГМП, так и высоким уровнем их здоровья. Результаты некоторых экспериментов на животных, выполненные зарубежными и отечественными исследователями в 1950–1970-х гг., в определённой мере поддержали впечатление, что пребывание в «магнитном вакууме» не приводит к каким-либо последствиям. Так, в упоминавшейся выше монографии [Нахильницкая и др., 1978] приведены результаты содержания до трёх месяцев мышей в пермалловых объёмах, экранировавших ГМП. Никаких заметных особенностей в их состоянии по сравнению с контролем не отмечено.

Данных о том, что происходит при длительном непрерывном пребывании человека в особо «жестких» гипоманнитных условиях, в литературе нет.

В результате исследований Д. Байшера долгое время не возникал вопрос, не осложнит ли отсутствие геомагнитного поля проведения дальних пилотируемых полётов и освоение Луны.

С учётом новых данных эксперименты Д. Байшера необходимо повторить, причём с существенно большей глубиной исследования, при разной величине ослабления ГМП — равной, большей и меньшей тысячекратной, и различных длительностях.

Даже если при тысячекратном ослаблении подтвердится, что именно этот уровень «магнитного вакуума» не оказывает заметного воздействия на человека при его длительном нахождении в нём (т. е. проявляется предполагаемый

полиэкстремальный минимум), то необходимо иметь в виду следующие важные для космонавтики особенности полёта в дальнем космосе.

Во-первых, величина «магнитного вакуума» в межпланетном пространстве непостоянна, зависит от процессов на Солнце и может заметно меняться, самое малое, на порядок и больше.

Во-вторых, не исключено, что для каких-то живых систем, которые будут являться обязательным элементом БСЖО на межпланетных кораблях, этот уровень отнюдь не окажется полиэкстремальным минимумом.

В-третьих, межпланетный корабль должен иметь мощные энергетические системы и аппаратуру. При их работе будут создаваться самые разнообразные магнитные и электрические поля, которые, по-видимому, будут модифицировать положение возможных минимумов.

Сказанное в той же мере относится к базам на поверхности небесных тел.

Один из возможных выходов — создание на борту аналога ГМП (см. ниже).

Особо отметим, что ГМУ действуют и на уровне клетки. В подтверждение приведём некоторые результаты отечественных исследований.

Так, в экспериментах, выполненных НИИЯФ и кафедрой биофизики МГУ совместно с ИМБП РАН [Григорьев и др., 2010], показано, что ГГМУ (величина ослабления составляла 150...250 раз) воздействует на параметры потенциала действия нервного волокна, снижая его амплитуду. Показано также, что воздействие ГГМУ приводит к изменению спектров комбинационного рассеяния каротиноидов, встроенных в мембрану нервного волокна и в мембрану цитосом нейронов, что соответствует изменениям конформации каротиноидов. С помощью лазерной интерференционной микроскопии выявлено, что ГГМУ воздействуют на регулярные динамические процессы в плазматической мембране нейрона и в цитоплазме [Григорьев и др., 2010].

В экспериментах, выполненных в ИОФ РАН [Саримов и др., 2008], продемонстрировано, что гипомагнитные условия влияют на когнитивные функции человека.

Не исключено, что воздействие гипомагнитных условий происходит на всех уровнях организации живых систем. Становится всё более и более ясным, что ГМП важно для жизнедеятельности, по крайней мере, на основе белка.

Не так давно некоторые ведущие отечественные биофизики, исходя из весьма общих положений, категорически отвергали возможность биологического действия слабого постоянного магнитного поля. Вопрос, не могут ли проявляться какие-нибудь последствия пребывания человека и других живых систем в «нулевом магнитном поле», вообще представлялся абсурдным.

Существенно, что имеется продвижение в объяснении возможных механизмов биологического действия гипомагнитных условий [Бинги, 2002, 2011; Леднев, 1996 и др.]. **Использованы подходы на основе теоретической физики**, хотя различные авторы нередко исходят из принципиально расходящихся между собой посылок.

Таким образом, проблема длительного пребывания космонавтов вне привычного ГМП и воздействия ГГМУ на БСЖО оказывается весьма значимой. Следует подчеркнуть, что даже существенное сокращение сроков межпланетного полёта не снимет проблемы воздействия гипомагнитных условий на экипаж и биорегенеративные системы жизнеобеспечения корабля и баз на Луне и на Марсе.

Одно из возможных решений этой проблемы заключается в создании в обитаемом объёме, а также в БСЖО искусственного аналога ГМП. Для этой цели предпочтительно использовать электромагнитные системы. Как показал анализ, они будут обладать сравнительно небольшой массой, невысоким энергопотреблением и просты в регулировке, что упрощает выбор режима аналога ГМП. С их помощью в обитаемом объёме можно создавать колебания, имитирующие, например, регулярные пульсации и шумановские частоты, отсутствующие в межпланетном пространстве. Можно также создавать колебания частот, соответствующих тем циклотронным частотам, которые при заданном уровне аналога ГМП будут «успокаивающими» для космонавтов (см., например, [Кривова, Труханов, 2010]).

В работе [Луганский, Труханов, 2008] рассмотрены различные соленоидальные электромагнитные системы, выполненные из отдельных витков (или коротких соленоидов), включённых последовательно. Однородность поля достигается оптимальным расположением витков по длине. При увеличении числа витков масса и энергопотребление системы при заданном поле уменьшаются, а его однородность существенно растёт. Это обеспечивает достаточную свободу при проектировании.

Приведём некоторые результаты расчётов. Если обитаемый объём межпланетного корабля будет иметь радиус 2,0 м и длину 32 м (эти величины близки к принятым в монографии [Пилотируемая..., 2006] для марсианского корабля), то система из 28 витков с током порядка $5 \cdot 10^1$ А создаст в нём магнитное поле 50 мкТ (т.е. ~ 40 А/м или 0,5 Гс, что соответствует модулю ГМП на широтах $\sim 40 \dots 60^\circ$). Поле будет однородным почти во всём объёме. При сечении каждого витка из алюминия 1 см^2 энергопотребление системы составит $\sim 1,6 \cdot 10^2$ Вт, а суммарная масса — $\sim 1,9 \cdot 10^2$ кг. По сравнению с массой и энергопотреблением обитаемого объёма $4 \cdot 10^2 \text{ м}^3$ эти величины представляются незначительными. Если создать на корабле поле 24 А/м, характерное для севера Африки и для Южно-Атлантической аномалии, захватывающей часть Бразилии и Аргентины, то потребляемая мощность снизится в 2,8 раз. Если оставить энергопотребление на прежнем уровне, можно в 2,8 раз снизить массу алюминия. Заметим, что массы электромагнитных систем, приведённых в работе [Луганский, Труханов, 2008], рассчитаны не для чистого алюминия, а для одного из его более прочных сплавов.

Возникает задача на оптимизацию: чем больше масса системы (т.е. сечение её витков), тем меньшую мощность она потребляет. И наоборот.

Потребуется проведение углублённых медико-биологических и инженерных исследований для выбора их возможных параметров и режимов работы.

Принципиальная трудность заключается в том, что необходим выбор требуемой минимальной напряжённости поля и его однородности, а также его режима. Следует ли воспроизводить спектр колебаний и возмущений ГМП, и если да, то в каких диапазонах? Требуется ли поддерживать поле постоянно или его можно включать лишь на какое-то время суток? При исследованиях на животных отмечено [Походзей, 1999], что прерывистое воздействие ГГМУ вызывало более выраженные эффекты со стороны отдельных систем организма, в особенности в начальный период проведения экспериментов.

Что касается проблемы воздействия гипомангнитных условий на персонал будущих лунной и марсианских баз, то её возможно решить аналогично. Для этого в помещениях базы должен быть создан аналог ГМП с помощью

электромагнитных систем или систем на постоянных магнитах. А в скафандрах для выходов и работы на поверхности Луны целесообразно и возможно, как показали проведённые нами проработки, иметь индивидуальные аналоги ГМП типа «кирас» с массой не более нескольких сотен граммов и с энергопотреблением несколько ватт при напряжении питания несколько вольт. Иначе при работе на поверхности Луны человек будет подвергаться нежелательному прерывистому воздействию ГМУ, напоминающему режим работы в экранированных помещениях на Земле (нахождение в гипомагнитных условиях в течение смены и в ГМП — остальное время).

МАГНИТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПОЛЁТАХ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

На орбитах высотой 400...700 км уровень ГМП на борту всего на 20...30 % ниже, чем на Земле в регионе, над которым в данный момент проходит космический корабль или станция. Это снижение меньше снижения, допускаемого СанПин 2.1.8/2.2.4.2489-09 для жилых и общественных зданий. Таким образом, проблемы воздействия гипомагнитных условий здесь, по-видимому, нет [Труханов, 2003].

Однако имеются две другие проблемы.

Первая из них обусловлена тем, что при полёте уровень ГМП на борту околоземного объекта (станции) варьирует из-за непрерывной смены в полёте его геомагнитных координат. Спектр этих вариаций содержит убывающие по величине компоненты, частоты которых кратны обратному периоду обращения объекта. Кроме того, имеются комбинационные частоты, обусловленные наклоном оси диполя ГМП относительно оси вращения Земли, его смещением относительно её центра, изменением высоты полёта и т. п. [Труханов, 2003].

Вариации уровня ГМП на борту значительны. Например, для углов наклона круговой орбиты порядка 50° они достигают уровня десятков микротесла, что составляет десятки процентов от среднего уровня ГМП на борту. Это на порядок и более превосходит даже ГМП таких магнитных бурь, которые случаются один раз в несколько лет. От магнитных бурь их, кроме величины, отличает периодичность, форма спектра и его сдвиг по частоте в диапазон порядка долей — единиц миллигерц. На уровень ГМП на борту сказываются также процессы, происходящие в магнитосфере. Ослабление переменных магнитных полей корпусом станции вследствие скин-эффекта начинает быть заметным лишь при частотах порядка несколько десятков герц и выше [Труханов, 2003]. Значительная часть электромагнитных колебаний, возникающих в околоземном пространстве, лежит в диапазоне более низких частот.

Особенности возможного воздействия вариаций уровня ГМП на борту и магнитных бурь вместе с анализом более ранних работ были кратко рассмотрены ещё в работе [Труханов, Шевнин, 1984]. Исследованию воздействия этих факторов на систему вегетативной регуляции кровообращения космонавтов в экспериментах на орбитальном комплексе «Мир» посвящены работы [Баевский и др., 1998; Baevsky et al., 1998]. Сделан вывод, что «магнитные бури, как во время их непосредственного воздействия, так и в период последующего (ближайшие 24 ч), вызывают существенные изменения вегетативной

регуляции сердечного ритма во время полёта» и продолжают сказываться в процессе реабилитации космонавтов после приземления. Аналогичные и не менее важные результаты получены в отношении воздействия на организм космонавтов периодических вариаций уровня ГМП на борту при изменении комплексом «Мир» геомагнитных координат в полёте.

Не затрагивая вопрос, насколько необходима стабилизация магнитного поля в обитаемом объёме с точки зрения космической медицины, рассмотрим технические возможности компенсации изменения уровня ГМП на борту в околоземном полёте.

Установить для этой цели на станции трехкомпонентные электромагнитные системы с отслеживанием уровня поля внутри обитаемого объёма и соответствующей регулировкой тока в них представляется практически неосуществимым.

Неосуществимой представляется и установка вокруг обитаемого объёма экрана с регулируемым ослаблением ГМП по мере изменения его уровня на борту во время полёта.

Одно из приемлемых в техническом отношении решений может заключаться в следующем. В обитаемом объёме околоземного пилотируемого аппарата (станции) размещают соленоидальную электромагнитную систему, создающую магнитное поле вдоль его оси, и трехкомпонентный магнитометр, управляющий током в ней [Труханов, 2007]. Величина и направление модуля магнитного поля, создаваемого совместно ГМП и магнитной системой, поддерживается на заранее заданном уровне, несколько превышающем максимальный уровень ГМП на орбите. При изменении уровня ГМП вследствие смены аппаратом геомагнитных координат или возмущений в магнитосфере уровень магнитного поля на борту будет оставаться неизменным, а меняться будет лишь направление его вектора.

Проиллюстрируем эту возможность. Положим для простоты, что ось аппарата ориентирована по горизонту, а орбита — полярная круговая. ГМП, тоже для простоты, представим полем магнитного диполя, ось которого совпадает с осью вращения Земли. В сферической системе координат радиальный и широтный компоненты записываются как:

$$B_r = -2 \frac{M}{r^3} \sin \lambda, \quad (1)$$

$$B_\lambda = \frac{M}{r^3} \cos \lambda, \quad (2),$$

где M — магнитный момент диполя; r — расстояние орбиты до центра Земли; λ — широта; M/r^3 — ГМП на борту на экваторе.

Суммируем магнитное поле системы B_s и компонент ГМП B_λ , возводим B_r и сумму в квадрат, приравниваем сумму квадратов квадрату модуля ГМП на борту над полюсом. Имеем:

$$\left(-2 \frac{M}{r^3} \sin \lambda\right)^2 + \left(\frac{M}{r^3} \cos \lambda + B_s\right)^2 = 2 \left(\frac{M}{r^3}\right)^2. \quad (3)$$

Решение этого уравнения

$$B_s = \frac{M}{r^3} (-1 \pm 2) \cos \lambda. \quad (4)$$

Оба корня удовлетворяют уравнению, однако второе решение при реализации потребует значительно большей мощности источника питания электромагнитной системы и большей её массы. Поэтому это решение следует отбросить.

Средняя потребляемая мощность на четверти витка равна половине мощности, которую нужно затратить, чтобы создать на борту поле, равное геомагнитному полю на экваторе (заметим, что в формулах (2) и (5) работы [Труханов, 2007] имеются опечатки).

Аналогичным образом находится решение, если орбита не полярная, т. е. имеет угол наклона, а ось магнитного диполя не совпадает с осью вращения Земли. Здесь не будем его приводить ввиду громоздкости.

Возможная масса соленоидальной системы для компенсации изменений уровня ГМП в обитаемом объёме Международной космической станции (МКС) и её энергопотребления существенно меньше, чем приведённые выше величины для межпланетного корабля.

Однако для проектирования, изготовления и монтажа этой системы на МКС или на будущих орбитальных станциях необходима твёрдая уверенность специалистов в области космической медицины в необходимости такого шага.

Возможно, что некоторым паллиативом может явиться разработка индивидуальной системы компенсации — магнитной «кирасы», сходной с «кирасой» скафандра для работ на поверхности Луны и Марса, рассмотренной выше. Она может составлять одно целое с комбинезоном. Техническое решение будет сложнее, поскольку космонавты в полёте постоянно меняют свою ориентацию относительно обитаемого объёма, что потребует управления током в «кирасе».

В работе [Труханов, 2007] отмечено, что проблемы, схожие в какой-то мере с затронутыми выше вопросами, должны возникать при дальних полётах самолётов, особенно, в широтном направлении (например, через Северный Полюс). Заметим, что на борту самолётов уровень ГМП меняется ещё из-за прохождения над местными магнитными аномалиями. Наличие магнитной системы на борту позволит устранить и эти колебания.

В медицинской практике используют экранированные помещения для размещения магниточувствительных пациентов при беспокойной магнитной обстановке [Гурфинкель, 2004]. Однако в экранированных комнатах резко снижен уровень ГМП. Это может повлечь нежелательные последствия, на что обращается внимание в приведённой работе. Стабилизация модуля магнитного поля с помощью предложенной выше электромагнитной системы позволит более эффективно нейтрализовать воздействие возмущений магнитной обстановки на человека.

БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА В ОКОЛОЗЕМНЫХ И ДАЛЬНИХ ПОЛЁТАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СИСТЕМ И АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ И БУДУЩИХ БАЗ

Электромагнитные поля на борту с самого начала рассматривали как потенциально неблагоприятный фактор [Давыдов и др., 1997; Майкельсон, 1975]. Однако долгое время их относили к факторам второстепенного или даже третьестепенного значения.

Это объяснялось и небольшим количеством систем и аппаратуры пилотируемых космических аппаратов того времени, и их незначительной энерговооружённостью. Тем не менее, в ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате» уже был включён раздел о предельно допустимых уровнях (ПДУ) ЭМП.

На пилотируемом комплексе «Мир» были проведены измерения уровней ЭМП в диапазоне частот 1 Гц – 70 кГц с помощью аппаратуры РКК «Энергия». Некоторые результаты измерений приведены в работе [Шабельников, Труханов, 2002].

В большей части жилого пространства комплекса переменные магнитные поля носили низкочастотный характер. На частотах 40 и 80 Гц были зарегистрированы максимумы, обусловленные импульсными токами от солнечных батарей в кабелях за потолком кают. Поля у потолка кают в шесть раз превышали величину у пола. В зонах с вычислительной техникой спектр ЭМП был «растянут» по исследуемому частотному диапазону с максимумами на частотах ~40 Гц и ~10 кГц. Величины поля сильно менялись в зависимости от режимов работы бортового оборудования и манёвров станции на орбите. Так, например, в начале очередного разворота станции величина поля в модуле КВАНТ возросла в результате работы гиродинов более чем в 50 раз. Однако все величины ЭМП в указанном выше диапазоне частот оказались заметно ниже регламентированных упомянутым выше ГОСТ Р.

В настоящее время отношение к биологическому действию электромагнитных полей бортовых систем и аппаратуры меняется, что обусловлено рядом обстоятельств, среди которых наиболее важны:

- увеличение длительности пребывания человека в космическом полёте;
- перспектива резкого возрастания количества бортовых систем и аппаратуры, создающих при своей работе ЭМП широкого спектра и самой различной величины; в особенности, это относится к будущим межпланетным кораблям;
- новые данные о биологическом действии ЭМП, особенно, тех, которые, как ранее полагали, не имеют заметной значимости.

Общепринято положение, что космонавты в отношении воздействия на них ЭМП находятся в таких же условиях, что и население (т.е. круглосуточное облучение без выходных). Поэтому при определении ПДУ для космонавтов исходят из уровней, принятых для населения. Конечно, космонавты обладают повышенным резервом здоровья, однако подвергаются воздействию многих других неблагоприятных факторов полёта.

Уровни ЭМП для населения в разных странах, как известно, отличаются друг от друга. Особенно велико различие между ПДУ российскими и других стран в области сверхвысоких частот (СВЧ), ПДУ, принятые в России, ниже в сотни раз. Такое положение объясняется тем, что за основу при нормировании приняты разные механизмы воздействия. В США и многих других странах принят тепловой механизм воздействия СВЧ ЭМП, т.е. воздействие целиком обусловлено выделением тепла в органах и тканях и их возможным перегревом («человек в микроволновой печи»). В СССР и, соответственно, в России приняты во внимание и нетепловые эффекты, т.е. ЭМП могут непосредственно воздействовать на те или иные процессы в организме, происходящие на различных уровнях, начиная с молекулярного.

В космическом полёте вследствие невесомости происходит перераспределение жидких сред в организме (прилив крови к голове и т.п.), что должно изменять величины и распределение поглощённой в органах и тканях энергии ЭМП по сравнению с земными условиями. Однако необходимые расчётные модели до сих пор не разработаны, что не позволяет провести численный анализ и внести необходимые уточнения. В качестве первого приближения исходят из «земных» ПДУ, что не вполне корректно. Уточнения необходимы как в тепловой модели воздействия СВЧ ЭМП, так и в случае нетепловых эффектов.

Величины и распределение токов, наводимых в органах и тканях полями более низких частот, также должны несколько меняться в случае перераспределения жидких сред в невесомости.

На поверхности Луны ускорение силы тяжести составляет одну шестую земной, т.е. ближе к невесомости. На поверхности Марса ускорение силы тяжести составляет уже около 0,38 земной, так что в последнем случае поправки, по-видимому, будут небольшими.

Изменяются в полёте и энергетические затраты, и теплообмен, что следовало бы принимать во внимание, особенно в тепловой модели. В космическом аппарате (станции) теплообмен обеспечивается воздушными потоками, создаваемыми вентиляторами, поскольку конвекция из-за невесомости отсутствует. Известно, что если вентиляторы перестают работать, то космонавты вынуждены постоянно «плавать» по обитаемому объёму, так как при задержке на одном месте вокруг головы скапливается выдыхаемая углекислота.

При внекорабельной деятельности энергетические затраты резко возрастают [Абрамов и др., 1984]. Требуется дополнительный отвод значительного количества тепла, выделяемого человеком, что достигается костюмом водяного охлаждения. Этот костюм, по-видимому, может снимать дополнительное тепло, создаваемое в теле ЭМП, и, кроме того, вместе со скафандром частично экранировать человека от облучения. Здесь также требуется проведение экспериментов и расчётов.

Коснёмся электромагнитной обстановки на Международной космической станции.

Исторически сложилось так, что предельно допустимые уровни ЭМП на МКС были приняты равными уровням для населения в Стандарте IEEE Std C95.1 1999 Edition (США). Однако специалистами, переносившими эти уровни в Полётные Правила для МКС, были допущены досадные ошибки. На очередном Совещании Международной Группы (MRHWG) по ионизирующим и неионизирующим излучениям на МКС в соответствующий раздел Полётных Правил по предложению российских участников были внесены исправления.

Знание характеристик ЭМП в Российском сегменте МКС и вообще на станции важно не только для оценки безопасности экипажа, но и для понимания той электромагнитной обстановки, в которой проводятся медицинские и биологические исследования. Данные об уровнях и спектрах ЭМП на МКС в настоящее время практически отсутствуют. Некоторые предварительные оценки можно сделать по результатам измерений ЭМП в наземных моделирующих стендах и анализа протоколов испытаний аппаратуры, поставляемой на борт, на электромагнитную совместимость (ЭМС).

Электромагнитные поля на МКС генерирует не только оборудование и аппаратура, специально созданная для этих целей. Заметный фон ЭМП может быть обусловлен работой неспециализированных его источников (так сказать, «пассивных»). Источники ЭМП разнообразны. Рост энерговооружённости МКС и, соответственно, увеличение потребления электроэнергии неизбежно повышает уровень ЭМП на ней.

Спектр ЭМП на станции, по-видимому, уже сейчас является широкополосным. Из-за постоянного роста количества источников ЭМП спектр будет приобретать характер, всё более приближающийся к квазинепрерывному.

Обитаемые объёмы МКС сравнительно невелики. Поэтому ЭМП находящихся в них источников в большинстве случаев соответствуют ближней (квазистатической) или промежуточной зоне, где волна ещё не сформирована. Лишь на высоких и сверхвысоких частотах в обитаемых объёмах возможно формирование дальней зоны.

Вследствие отражения генерируемых в станции ЭМП от её проводящих элементов (корпус станции, корпуса её модулей, корпуса оборудования и аппаратуры в интерьерах станции и т. п.) возникают так называемые вторичные источники. Это должно заметно повышать уровень ЭМП и увеличивать нагрузку на экипаж. При последовательных отражениях ближняя зона может трансформироваться в промежуточную, а промежуточная — в дальнюю, т. е. будет создаваться дополнительное смешанное поле ЭМП. Возможно, что перед проводящими поверхностями целесообразно располагать слой материала, поглощающего ЭМП радиочастотного диапазона.

По переходным отсекам и другим элементам конструкции станции ЭМП (особенно, СВЧ ЭМП) могут распространяться из одних сегментов и модулей в другие, что будет приводить к возможным превышениям ПДУ в них за счёт «чужих» полей. При изменениях конфигурации станции фон этих полей будет меняться. Знание величины электромагнитной связи между сегментами и модулями МКС позволит оценить уровень проникновения ЭМП из одного модуля в другие и даст возможность прогнозировать, к какому росту ЭМП в сегментах и модулях станции приведёт рост уровня ЭМП в каком-то её модуле, например, вследствие появления в нём новой аппаратуры, и можно ли поставку этой аппаратуры допустить.

Отметим, что в недалёком будущем планируется проведение полётного эксперимента по исследованию электромагнитной обстановки на Российском сегменте МКС. Схемное решение аппаратуры, которое учитывало бы все требования к измерению и мониторингу ЭМП на борту, было предложено ещё в работе [Труханов, 2007].

Сигналы датчиков электромагнитного поля после соответствующей обработки (усиления и т. п.) должны поступать на спектроанализатор, к выходу которого подключён микропроцессор. В микропроцессор занесены данные о зависимости суммарной чувствительности детекторов и каналов последующей обработки сигналов от частоты, а также о зависимости от частоты ПДУ в соответствии с выбранным Стандартом. Микропроцессор корректирует данные спектроанализатора, деля их на зависимость чувствительности датчиков и последующей каналов обработки сигналов от частоты и создавая тем самым «плато» чувствительности по спектру. Это позволит избежать трудоёмкой и не всегда приносящей удовлетворительные результаты работы

по схемному «сглаживанию» этих зависимостей. Далее пересчитывается вклад каждой линии спектра в дозовую нагрузку путём деления её величины на нормативные значения ПДУ для данной частоты. Суммируя результаты по всему спектру, микропроцессор будет выдавать обобщённую дозовую нагрузку в единицах ПДУ принятого Стандарта. При возможных изменениях ПДУ не потребуется создания новой аппаратуры. Достаточно перепрограммировать микропроцессор.

Было предложено использовать аналогичный подход и в наземной аппаратуре для экологических целей. При этом в микропроцессор можно ввести несколько стандартов (например, для профессионального облучения и для населения, стандарты разных стран, рекомендации международных организаций), чтобы иметь возможность всесторонней оценки полученных данных. Сейчас этот подход используется в независимых разработках.

Широкополосный характер спектра ЭМП требует особых подходов к нормированию.

В работах [Васин, Труханов, 2003; Григорьев и др., 2002; Труханов, 2005] квазинепрерывный широкополосный электромагнитный фон предлагается рассматривать как множество виртуальных источников ЭМП малой амплитуды. Возникает вопрос, имеются ли амплитудные пороги для биологических эффектов воздействия таких ЭМП.

В случае тепловой модели порог, по-видимому, должен отсутствовать, поскольку воздействие ЭМП в этой модели связано с нагревом ткани, который всегда имеет место при поглощении ЭМП. Для нетепловых эффектов вопрос открыт.

Следует отметить, что известны исследования (см., например, [Бинги, 2002, 2011]), в которых показано, что электромагнитный шум снижает биологическое действие ЭМП с большими амплитудами. Исходя из предупредительного принципа (ALARA), не следует принимать во внимание возможное существование порогов нетепловых воздействий ЭМП.

Имеется достаточно распространённое мнение, что если электромагнитная обстановка удовлетворяет требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры, то она тем более удовлетворяет требованиям электромагнитной безопасности для человека. В случае квазинепрерывного широкополосного фона это не соответствует действительности и может приводить к крайне нежелательным последствиям. В качестве примера в упомянутых выше работах рассмотрен случай, когда уровень фона излучаемого электрического поля определён требованиями ЭМС для медицинской аппаратуры на Российском сегменте МКС в диапазоне частот от 0,1 до 300 МГц. Расчёт показал, что дозовая нагрузка в единицах ПДУ, регламентированных упомянутым выше ГОСТ Р 50804-95, составит около 10^2 . При этом магнитный компонент поля не учитывался.

Таким образом, в случае квазинепрерывного фона ЭМП уровень, регламентируемый требованиями ЭМС, может создавать неприемлемую нагрузку для человека. Аналогичная ситуация возникает в отношении собственного излучения аппаратуры, удовлетворяющего условиям ЭМС для Российского сегмента МКС [Труханов, 2005].

Заметим, что приведённый анализ достаточно близок к реальной ситуации. Нередко аппаратура генерирует фоновое ЭМП в очень широком диапазоне частот, что совершенно неприемлемо.

При испытании аппаратуры на ЭМС необходимо одновременно проверять, удовлетворяет ли аппаратура требованиям электромагнитной безопасности для человека. При этом исследования нужно проводить во всём требуемом частотном диапазоне ЭМС, не прекращая измерений тогда, когда оказывается, что величины полей лежат значительно ниже уровней, регламентированных требованиями как ЭМС, так и ПДУ для человека. Даже в этих случаях их вклад в дозовую нагрузку для человека может оказаться заметным [Труханов, 2005].

Электромагнитную обстановку, которая будет создаваться собственными системами и аппаратурой на пилотируемом межпланетном корабле, можно, естественно, оценить лишь в общих чертах.

По-видимому, полёт будет осуществляться на электроракетных двигателях на солнечной или, скорее, ядерной энергии. Они будут потреблять значительные мощности. При этом будут создаваться сильные электромагнитные поля.

Источниками радиоизлучения сверхвысокой частоты будут радиопередатчики с узконаправленной антенной, мощность которых должна быть намного больше мощности передатчиков, используемых на орбитальных станциях. Кроме того, на комплексе предполагается иметь дополнительные средства: командную радиолинию передачи служебной информации, межбортовую радиолинию, телевизионные системы [Пилотируемая..., 2006].

Обсуждаются возможности лазерной передачи информации, что снимет вопросы воздействия некоторых источников СВЧ на человека.

Не исключено, что ко времени полёта будут созданы системы связи на новых принципах.

Потребуется разработка принципов нормирования ЭМП в космосе при длительном межпланетном полёте в условиях круглосуточного облучения, создание специальной аппаратуры контроля и мониторинга ЭМП на борту и согласование требований к системам и аппаратуре корабля с позиций биоэлектромагнитной совместимости.

Ещё об одной проблеме безопасности, которая может возникнуть при пилотируемых межпланетных полётах. Она связана с возможным воздействием при дальнем полёте биологического аналога, известного в физике, — эффекта Ааронова — Бома (АБ).

Эффект АБ, как его нередко именуют, состоит, в том, что на физические процессы в квантовом уровне могут воздействовать не только напряжённости электрического и магнитного полей, т. е. **производные потенциалов (скалярного и векторного)**, но и сами потенциалы. Доказательству этого положения была посвящена серия работ АБ (первая из них — [Aharonov, Bohm, 1959]). Положения, выдвинутые АБ, были поддержаны, например, Р. Фейнманом (см. Фейнмановские лекции по физике [Фейнман и др., 1977]). Из истории физики известно, что М. Фарадей использовал понятие «электротоническое состояние». К этому понятию, которое фактически совпадает с понятием «потенциал электромагнитного поля», затем обратился и Д. Максвелл (см., например, [Визгин, 1985]). Однако начиная с О. Хевисайда, Г. Герца, Г. Лоренца и других и до работ АБ в электродинамике было принято считать, что сами потенциалы ЭМП не имеют «физической реальности. После появления работ АБ в 60-е и последующие годы XX века разгорелась ожесточённая дискуссия (см, например, её обзор в работе [Труханов, 1984]. Тем не менее,

после длительных научных споров существование эффекта АБ было неоднократно подтверждено и экспериментально, и в теоретических работах (там же). Эффекту АБ в настоящее время посвящено более тысячи статей и ряд монографий.

В работах [Труханов, 1975, 1978, 1984, 2003] был впервые поставлен вопрос о возможном биологическом аналоге эффекта АБ, что имеет принципиальное значение, в особенности, в проблеме солнечно-земных связей. Проведённые оценки показали, что на поверхности Земли потенциалы, создаваемые земным диполем и «скрытыми» (тороидальными) полями «земного динамо», близки к потенциалу, создаваемому полем Солнца при соответствующей калибровке. На астрономических масштабах оказывается существенным, что величина векторного потенциала диполя спадает с расстоянием как R^{-2} в отличие от напряжённости магнитного поля, которая спадает как R^{-3} . При изменении конфигурации магнитных полей на Солнце изменяется соотношение потенциалов на Земле, что может привести к воздействию на биосферу. Должна наблюдаться реакция биологических объектов на процессы, происходящие на Солнце, причём она опережает возмущения ГМП, вызываемые приходящими от Солнца потоками плазмы, что и наблюдается.

В работах [Кашулин, Ролдугин, 1999; Кашулин и др., 2000; Смит, 1994] и в работах последнего времени (см., например, [Аносов, Трухан, 2007; Трухан, Аносов, 2003] и в ряде других работ с участием этих же авторов) показано существование биологического аналога эффекта АБ. К сожалению, в статьях с участием последних авторов практически полностью отсутствуют ссылки на наши ранние приоритетные публикации.

При марсианской экспедиции человек будет находиться длительное время в изменённом поле потенциалов космического пространства по сравнению с полем на орбите Земли. Привычное воздействие потенциала ЭМП Земли, создаваемого земным диполем и скрытыми (тороидальными) полями земного «динамо», исчезнет, а потенциал ЭМП Солнца на борту будет убывать по мере полёта. Неясно, как эти изменения могут сказаться на состоянии экипажа межпланетного корабля и персонала лунной и марсианской баз.

Необходимо проведение соответствующих исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждены проблемы, стоящие перед новым разделом магнитобиологии — космической магнитобиологией. Все эти проблемы могут быть так или иначе решены или уже решаются.

Гипомагнитные условия межпланетного пространства не являются принципиальным барьером для дальних пилотируемых космических полётов и освоения Луны и Марса.

В будущем космическом корабле, предназначенном для пилотируемого полёта на Марс, видимо, потребуется иметь специальные магнитные системы. Это позволило бы комплексно решить ряд проблем: отсутствие в полёте на Марс привычного ГМП, защиту от ГКЛ и СКЛ и т. д.

Все затронутые выше вопросы требуют дальнейшей теоретической разработки и проведения экспериментальных исследований, в том числе, в космосе.

Космическая магнитобиология позволит также продвинуться в фундаментальных вопросах о роли геомагнитного поля, а также его инверсий для жизни на Земле и о возможности переноса жизни (панспермия) через гипомагнитное космическое пространство.

ЛИТЕРАТУРА

- [Абрамов и др., 1984] *Абрамов И. П., Северин Г. И., Стоклитский А. Ю., Шарипов Р. Х.* Скафандры и системы для работы в открытом космосе. М.: Машиностроение. 1984. 256 с.
- [Аносов, Трухан, 2007] *Аносов В. Н., Трухан Э. М.* Новый подход к проблеме воздействия слабых магнитных полей на живые объекты // Докл. РАН. 2007. Т. 392. № 5. С. 689–693.
- [Баевский и др., 1998] *Баевский Р. М., Бреус Т. К., Никулина Г. А.* и др. Влияние изменений магнитного поля Земли на функциональное состояние человека в условиях космического полёта: Препринт ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 1998. Пр-1987. 37 с.
- [Бауров, Труханов, 1998] *Бауров Ю. А., Труханов К. А.* Космологический векторный потенциал как возможный фактор космофизических и гелиофизических связей // Биофизика. 1998. Т. 43. № 5. С. 928.
- [Белишева и др., 1995] *Белишева Н. К., Попов А. Н., Петухова Н. К.* и др. Качественная и количественная оценка воздействия вариаций геомагнитного поля на функциональное состояние мозга человека // Биофизика. 1995. Т. 40. Вып. 5. С. 1005–1012.
- [Бинги, 2002] *Бинги В. Н.* Магнитобиология. Эксперименты и модели. М.: МИЛТА, 2002. 502 с.
- [Бинги, 2011] *Бинги В. Н.* Принципы электромагнитной биофизики. М.: Физматлит, 2011. 591 с.
- [Васин, Труханов, 2003] *Васин А. Л., Труханов К. А.* Оценка вклада широкополосного квазинепрерывного электромагнитного фона в дозовую нагрузку // Радиационная биология. Радиоэкология. 2003. Т. 43. Вып. 5. С. 590–593.
- [Визгин, 1985] *Визгин В. П.* Потенциалы и напряжённости в теории электромагнитного поля // Максвелл и развитие физики XIX–XX веков. М.: Наука, 1985. С. 15–27.
- [Григорьев и др., 2002] *Григорьев Ю. Г., Труханов К. А., Васин А. Л.* Электромагнитные поля и здоровье человека / Под общей ред. Ю. Г. Григорьева. М.: Изд-во РУДН, 2002. Гл. 7. Избранные вопросы теории биологич. действия электромагнитных полей. С. 124–140.
- [Григорьев и др., 2010] *Григорьев А. И., Труханов К. А., Максимов Г. В., Приселкова А. Б., Лебедев В. М., Спасский А. В.* Результаты исследований воздействия плотно-ионизирующих частиц на нервные клетки и модельные системы // Инновационные решения для космической механики, физики, астрофизики, биологии и медицины. М.: Университетская кн., 2010. Гл. 4. Разд. 4.1. С. 257–279.
- [Гурфинкель, 2004] *Гурфинкель Ю. И.* Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность. М. 2004. 169 с.
- [Давыдов и др., 1997] *Давыдов Б. И., Тихончук В. С., Стржижовский А. Д.* Неионизирующие излучения. Гл. 18 // Космическая биология и медицина. Т. 3. Кн. 2. Человек в космическом полёте. М.: Наука, 1997. С. 206–245.
- [Дубров, 1974] *Дубров А. П.* Геомагнитное поле и жизнь. Л. Гидрометеиздат. 1974. 175 с.
- [Замощина и др., 2012] *Замощина Т. А., Кривова Н. А., Ходанович М. Ю., Труханов К. А.* и др. Влияние моделируемых гипомагнитных условий дальнего космического полёта на ритмическую организацию поведенческой активности крыс // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2012. Т. 46. Вып. 1. С. 17–23.

- [Казначеев, Михайлова, 1985] *Казначеев В. П., Михайлова Л. П.* Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск.: Наука, 1985. 185 с.
- [Кашулин, Ролдугин, 1999] *Кашулин П. А., Ролдугин В. К.* Излучение тороидального соленоида биологически активно в отношении семян растений // Материалы 2-й Международ. конф. «Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундаментальные и прикладные исследования. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация». М., 1999. С. 64–65.
- [Кашулин и др., 2000] *Кашулин П. А., Жибоедов П. М., Иваненко Н. К.* и др. // Тез. 2-й Международ. конгр. «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». СПб., 2000. С. 71–72.
- [Клейменова, Троицкая, 1992] *Клейменова Н. Г., Троицкая В. А.* Геомагнитные пульсации как один из экологических факторов среды // Биофизика. 1992. Т. 37. Вып. 3. С. 429–438.
- [Ковалёнок и др., 2005] *Ковалёнок В. В., Авакян С. В., Боровкова О. К., Воронин Н. А.* Космический солнечный патруль и некоторые проблемы пилотируемого полёта к Марсу // Оптич. журн. 2005. Т. 72. № 8. С. 49–53.
- [Копанев, Шакула, 1985] *Копанев В. И., Шакула А. Б.* Влияние гипомагнитного поля на биологические объекты. Л.: Наука. 1985. 73 с.
- [Кривова, Труханов, 2010] *Кривова Н. А., Труханов К. А.* Брать ли на Марс магнитное поле Земли? // Наука в России. М.: РАН, 2010. С. 4–9.
- [Кривова и др., 2008] *Кривова Н. А., Труханов К. А., Замощина Т. А.* и др. Повышение агрессивности крыс при экспозиции в условиях гипогеомагнитного поля // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2008. Т. 42. Вып. 6/1. С. 30–32.
- [Леднев, 1996] *Леднев В. В.* Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных магнитных полей // Биофизика. 1996. Т. 41. Вып. 1. С. 224–232.
- [Луганский, Труханов, 2008] *Луганский Л. Б., Труханов К. А.* Создание аналога геомагнитного поля в обитаемом объёме межпланетного корабля // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2008. Т. 42. Вып. 6/1. С. 54–56.
- [Майкельсон, 1975] *Майкельсон С. М.* Радиоизлучения: магнитные и электрические поля // Основы космической биологии и медицины. Т. 2. Кн. 2. М.: Наука, 1975. С. 9–58.
- [Нахильницкая и др., 1978] *Нахильницкая З. Н., Климовская Л. Д., Смирнова Н. П., Стржижовский А. Д.* Магнитное поле и жизнедеятельность организмов // Проблемы космич. биологии. 1978. Т. 37. 267 с.
- [Никитина и др., 2007] *Никитина В. Н.* и др. Гигиенические исследования условий труда и состояния здоровья операторов, выполняющих работу в экранированных помещениях: Ежегодник РНКЗНИ. 2007. С. 89–102.
- [Новиков и др., 2007] *Новиков В. В., Шейман И. М., Фесенко Е. Е.* Влияние слабых и сверхслабых магнитных полей на интенсивность деления планарий // Биофизика. 2007. Т. 52. № 5. С. 912–915.
- [Осипенко и др., 2008] *Осипенко М. А., Межевикина Л. М., Крафтс И. В., Яшин В. А., Новиков В. В., Фесенко Е. Е.* Влияние «нулевого» магнитного поля на рост эмбриональных клеток и ранних зародышей мыши в культуре *in vitro* // Биофизика. 2008. Т. 53. № 4. С. 705.
- [Пилотируемая..., 2006] Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. А. С. Коротеева. М.: Российская акад. им. К. Э. Циолковского, 2006. 320 с.
- [Походзей, 1999] *Походзей Л. В.* Гипогеомагнитные поля как один из неблагоприятных факторов среды // Материалы Международ. совещания «Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование» / Под ред. М. Х. Репачоли, Н. Б. Рубцовой, А. М. Муца. Женева: Изд-во. ВОЗ, 1999. WHO/SDE/OEN/99.5. P. 237–246.

- [Походзей и др., 2012] *Походзей Л. В., Пальцев Ю. П., Рубцова Н. Б.* Гипогеомагнитные поля как неблагоприятный фактор производственной среды и среды обитания. Итоги и перспективы исследований // Ежегодник РНКЗНИ. 2012. С. 69–82.
- [Саримов и др., 2008] *Саримов Р. М., Бинги В. Н., Миляев В. А.* Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека // Биофизика. 2008. Т. 53. Вып. 5. С. 856–866.
- [Смит, 1994] *Смит С.* Электромагнитная биоинформация и вода // Вестник биофиз. информации. 1994. № 1. С. 3–13.
- [Трухан, Аносов, 2007] *Трухан Э. М., Аносов В. Н.* Векторный потенциал как канал информационного воздействия на живые объекты // Биофизика. 2007. № 2. С. 376–381.
- [Труханов, 1975] *Труханов К. А.* О возможной роли эффекта Ааронова – Бома в биологическом действии магнитного поля // Физико-мат. и биологич. основы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха / Под ред. Н. В. Красногорской. М.: Наука, 1975. Т. 1. С. 151–152.
- [Труханов, 1978] *Труханов К. А.* О возможной роли эффекта Ааронова – Бома в биологическом действии магнитного поля // Космич. биология и медицина. 1978. Т. 12. № 3. С. 82–83.
- [Труханов, 1984] *Труханов К. А.* Векторный потенциал электромагнитного поля // Электромагнитные поля в биосфере / Под ред. Н. В. Красногорской. М.: Наука. 1984. Т. 1. С. 331–350.
- [Труханов, 2003] *Труханов К. А.* Некоторые магнитобиологические аспекты длительных и дальних космических полётов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2003. Т. 43. № 5. С. 584–589.
- [Труханов, 2005] *Труханов К. А.* Некоторые вопросы электромагнитной и биоэлектромагнитной совместимости // Ежегодник Российского нац. комитета по защите от неионизирующих излучений. 2005. С. 199–205.
- [Труханов, 2007] *Труханов К. А.* Человек и ЭМП в космическом полёте // Ежегодник Российского нац. комитета по защите от неионизирующих излучений (РНКЗНИ). 2007. С. 31–50.
- [Труханов, Шевнин, 1984] *Труханов К. А., Шевнин А. Д.* Электромагнитные поля, возникающие при движении в геомагнитном поле // Электромагнитные поля в биосфере / Под ред. Н. В. Красногорской. М.: Наука. 1984. Т. 1. С. 109–117.
- [Труханов и др., 2011] *Труханов К. А., Гурьева Т. С., Дадашева О. А., Круглов О. С., Лебедев В. М., Спасский А. В.* Воздействие моделируемых гипомагнитных условий дальнего космоса на развитие эмбрионов японского перепела // Ежегодник Российского нац. комитета по защите от неионизирующих излучений (РНКЗНИ). 2011. С. 83–93.
- [Труханов и др., 2012] *Труханов К. А., Гурьева Т. С., Дадашева О. А., Круглов О. С., Лебедев В. М., Спасский А. В.* Воздействие моделируемых гипомагнитных условий дальнего космоса на развитие эмбрионов японского перепела // Ежегодник РНКЗНИ за 2011 г. М. Изд-во ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, 2012. С. 83–93.
- [Фейнман и др., 1977] *Фейнман Р., Лейтон Р., Сендс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. Электродинамика. Гл. 15. Векторный потенциал. М.: Мир, 1977. 347 с.
- [Шабельников, Труханов, 2002] *Шабельников В. Г., Труханов К. А.* Неионизирующие излучения (магнитные поля) на орбитальной станции «Мир» // Материалы 12-й Конф. по космич. биологии и авиакосмич. медицине / Под ред. А. И. Григорьева, Е. А. Ильина. М., ГНЦ РФ-ИМБП РАН, 2002. С. 351–352.
- [Aharonov, Bohm, 1959] *Aharonov Y., Bohm D.* Significance of electromagnetic potential in quantum theory // Physical Rev. 1959. V. 115. N. 3. P. 485–492.

- [Asashima et al., 1991] *Asashima M., Shimada R., Pfeifer C.J.* Magnetic shielding induced early developmental abnormalities in the Neut // *Bioelectromagnetics*. 1991. V. 12. P. 215–224.
- [Baevsky et al., 1998] *Baevsky R. V., Petrov V. M., Chernikova A. G.* Regulation of autonomic nervous system in space and magnetic storms // *Advances in Space Research*. 1998. V. 22. P. 227–234.
- [Beisher et al., 1967] *Beisher D. E.* et al. Exposure of man to low intensity magnetic fields in a coil systems // Joint Report. NAMI-1018. NASA. Oct. 1967.
- [Dubrov, 1978] *Dubrov A. P.* Geomagnetic Field and Live. *Geomagnetobiology*. N. Y., L.: Plenum Press, 1978. 310 p.
- [Kovalenok et al., 2006] *Kovalenok V. V., Avakyan S. V., Voronin N. A., Borovkova O. K.* Important problem of manned flight to Mars // Abstr. 4th Intern. Workshop on Space Rad. Research and 17th Annu. NASA Space Rad. Health Investigators' Workshop. Moscow, St. Peterburg. 5–9.06.2006. P. 67–68.
- [Trukhanov, Lugansky, 2006] *Trukhanov K. A., Lugansky L. B.* "Artificial" geomagnetic field on manned spacecrafts // Abstr. 4th Intern. Workshop on Space Rad. Research and 17th Annu. NASA Space Rad. Health Inv. Workshop. Moscow, St. Peterburg. 5–9.06.2006. P. 131–132.

PROBLEMS OF COSMIC MAGNETOBILOGY

K. A. Trukhanov

State Scientific Centre of the Russian Federation — Institute of Biomedical Problems
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: trukhkt@com2com.ru

The magnetobiological problems of manned near-Earth flights and, especially, of flights at interplanetary cosmos and at stay on future Lunar and Martian outposts are discussed. They are engendered by such peculiarities as a hypomagnetism of interplanetary space; changes of the geomagnetic field aboard orbiting spacecraft (vehicles and stations) at altering their geomagnetic coordinates at the flight and also due to processes at magnetosphere; the influence of an electromagnetic radiation generated by systems and equipment of a spacecraft and of outposts onto own crew.

There are several approaches to solution of these issues, among which proposal to use electromagnetic systems for creation on spacecrafts and on outposts of artificial common and individual geomagnetic field analog seems very perspective.

It should be noted that the broadband electromagnetic background which conform to the requirements of electromagnetic compatibility (EMC), may cause the inadmissible influence on humans.

Space biology will provide a better insight of the fundamental aspects of the role of the geomagnetic field and its inversions in Life on Earth and of the peculiarity of panspermia through hypomagnetic space too.

LONG-TERM MONITORING OF COSMIC RADIATION ON-BOARD AIRCRAFT WITH THE SILICON SPECTROMETER LIULIN — COMPARISON WITH NEUTRON MONITOR DATA

J. Kubančák^{1,2}, *O. Ploc*^{2,3}, *I. Ambrožová*², *I. Kovář*¹, *K. Kudela*⁴, *R. Langer*⁴, *F. Spurný*^{2,†}

¹ Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Department of Dosimetry and Application of Ionizing Radiation, Brehova 7, 115 19 Prague, Czech Republic

² Nuclear Physics Institute of the ASCR, v.v.i., Department of Radiation Dosimetry, Na Truhlárce 39/64, 18000 Prague, Czech Republic

³ Chalmers University of Technology, Department of Nuclear Engineering, Fysikgården 4, 412 96 Göteborg, Sweden

⁴ Institute of Experimental Physics of the Slovak Academy of Sciences, Department of Space Physics, Watsonova 47, 040 01 Kosice, Slovakia

Huge amount of high energetic particles impinges the Earth every second. The planet protects us from the radiation with the atmosphere and its magnetic field. In some areas of human activities like e.g. aviation, the atmosphere and magnetic field protection role is reduced. Aircrew and spacecrew members are exposed to increased radiation dose rates. According to recommendations of the International Commission on Radiation Protection, radiation doses of people working in such an environment have to be estimated. Generally, radiation protection authorities accept estimation based on the calculation with any of the approved computer codes. Nevertheless, it is recommended to verify calculation with direct measurements on-board aircraft. This paper will present results of long term monitoring on-board Czech airlines aircraft. Presented data had been obtained continuously since year 2001, cover whole 11years' solar cycle and contain above 10^5 records. We will show that data can be used not only for radiation protection purposes but also for space weather monitoring.

INTRODUCTION

Annual effective doses of aircrew from occupational exposure due to exposure to cosmic radiation can reach up to 6 mSv [Lindborg et al., 2004] depending on the number of flight hours, route locations, and solar activity; in case of extreme solar events they can be much higher [Bütikofer et al., 2008].

Usually, doses of crewmembers are estimated via computer codes. However, it is recommended to verify calculations with direct measurements [Lindborg et al., 2004]. Hence, our institute as the authority performing routine aircrew dosimetry in the Czech Republic started with permanent radiation monitoring on-board aircraft since 2001.

The measurements were realized using the semiconductor detector Liulin. So far, more than 3500 flights were monitored. Flights were flown to destinations with various vertical cut-off rigidities, ranging from 1 to 17 GV. The database comprises more than 10^5 records, covering period of whole 11-year solar cycle; each record contains information on energy deposition spectra, absorbed dose rates and dose equivalent rates estimated with Liulin, date and time, geographic coordinates and altitude.

Data obtained on-board aircraft are compared with neutron monitor data obtained at high mountain observatories (HMO; neutron monitor data were downloaded using the database available at <http://nmdb.eu>). Found dependencies show that measurements onboard aircraft create a junction between measurements in space and at high mountain observatories and correctly describe space weather situation.

1. METHODS

1.1. Detectors

Liulin [Dachev, 2009] is an active silicon semiconductor detector. Sensitive volume is made of a 300 μm thin PIN silicon diode with area of 2×1 cm. Liulin can measure energy deposition spectra, fluxes and doses in mixed radiation fields by detecting the energy e imparted to its active volume in a single energy deposition event. For each such event, which may include all interactions of primary and secondary particles with the silicon diode, the detector electronics increases the corresponding channel count by one. After a specified acquisition time, the spectrum is written to an internal memory. The 256 channel spectrum is used to estimate the absorbed dose in silicon, D_{Si} , as

$$D_{Si} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{256} N_i \varepsilon_i, \quad (1)$$

where ε_i is the centre of the imparted energy bin i ; N_i is the number of events corresponding to bin i and $m = 1.398 \cdot 10^{-4}$ kg is the mass of the silicon diode [Ploc et al., 2011]. The determination of relation between ε_i and the channel number i is described elsewhere [Uchihori et al., 2002]. After an appropriate calibration, Liulin gives an estimation of the ambient dose equivalent. More detailed description of the calibration procedure can be found in [Ploc et al, 2011].

Neutron monitor at the Lomnický štít observatory is situated at High Tatra mountain, 2634 m above sea level, in the direction of 49.40° N, 20.22° E and geomagnetic vertical cut-off rigidity for cosmic rays 4 GV. The monitor itself is an 8-tube NM64 type proportional $^{10}\text{BF}_3$ counter. For more details please refer to the official website <http://neutronmonitor.ta3.sk> or to [Kudela, Langer, 2007].

1.2. Data acquisition and evaluation

Measurements with the Liulin started in March 2001. Until 2009 it was flown on-board an Airbus A310-300 of the Czech Airlines company (further only CSA). Since 2009, it is flown on-board an Airbus A319-112 of the same company. Liulin has been always placed in the vicinity or directly in the cockpit of the plane; silicon diode surface orientation was always parallel with the wings surface. Detector's current position in Airbus A-319 is illustrated in Figure 1. All routes flown since year 2001 are illustrated in Figure 2. To the December 31, 2011, database of measurements contained more than 10^5 records. All presented aircraft data are publicly available upon registration in a form of structured text files at the address <http://hroch.ujf.cas.cz/~aircraft>.

Revised neutron monitor data corrected for barometric pressure were downloaded from worldwide neutron monitor database <http://www.nmdb.eu/nest.php> in the form of text files. In case of aircraft data, we did not take into account influence geomagnetic parameters, in particular vertical cut-off rigidity. This was not necessary because we were answering the question if the event occurred or not and we did not compare magnitude of events. Applying the R statistical computing code [Crawley, 2007] on obtained data, we were seeking for Ground Level Enhancement (GLE) and Forbush decrease (FD) events [Benton, Benton, 2001] as follows: a) at first we select specific event according to neutron monitor database available at <http://www.nmdb.eu> and then b) we compared the Liulin and Lomnický štít neutron monitor data.



Figure 1. Position of the Liulin detector inside the Airbus' cockpit

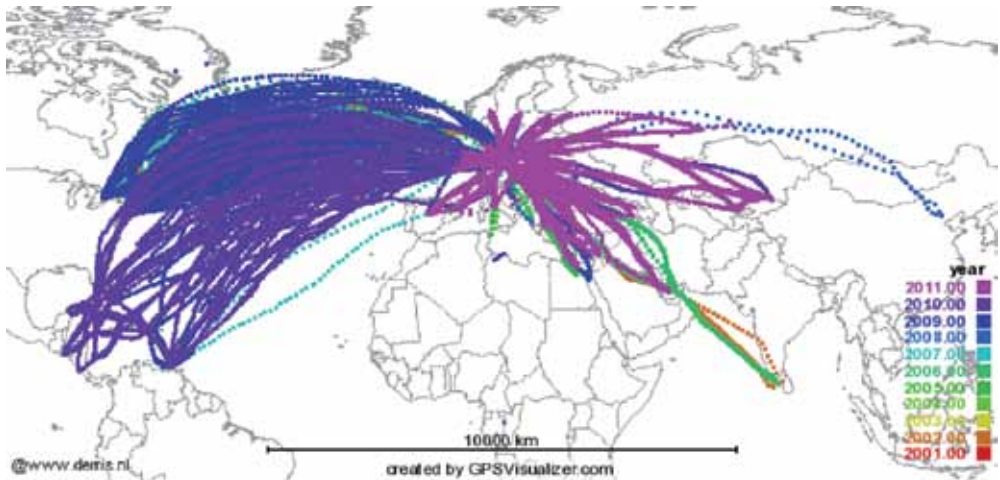


Figure 2. Visualized tracks of the plane. Colour represents the period in which the data were measured

Of course, not all events were registered with the Liulin because it was grounded during many events. Those one captured are presented in this paper.

2. RESULTS

2.1. Ground level enhancements

Until present, Liulin successfully registered one GLE event, the GLE 60 from April 15, 2001. The registration was described in [Spurny, Dachev, 2003] already. In our work we compared dose rate measured with Liulin with response of the neutron monitor at the Lomnický štít observatory. Results are shown in Figure 3. There is a single high peak visible for both time series only through a simple visual inspection.

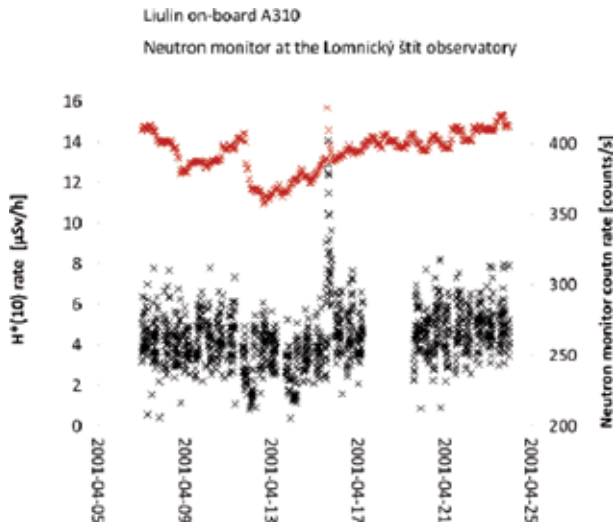


Figure 3. Neutron monitor count rates and corresponding data from the Liulin registered at the on-board aircraft at the time of the GLE 60 (April 15, 2001). Red points represent dose rates neutron count rates registered with the neutron monitor, black points represent Liulin data. Dispersion of the Liulin data is given by fact that dose rate measured during flight depends strongly on plane altitude

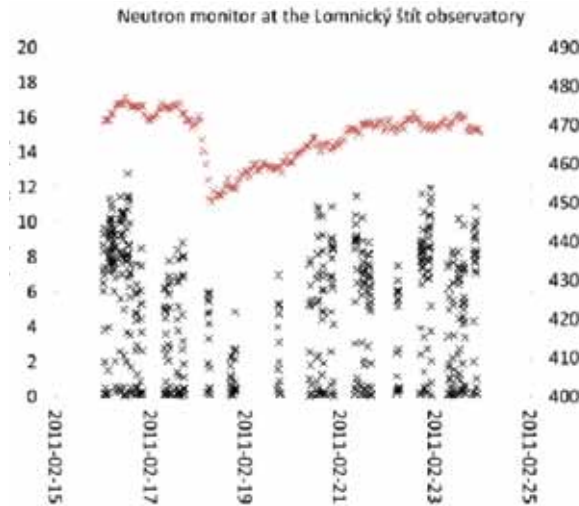


Figure 4. Forbush decrease as registered with the Liulin and the Lomnický štít neutron monitor on February 18, 2011. Red points represent dose rates neutron count rates registered with the neutron monitor, black points represent Liulin data. Dispersion of the Liulin data is given by fact that dose rate measured during flight depends strongly on plane altitude

2.2. Forbush decrease events

Up to now, Liulin registered only Forbush decrease #53 which occurred in February 2011. Results are similarly, as for GLE, shown in Figure 4.

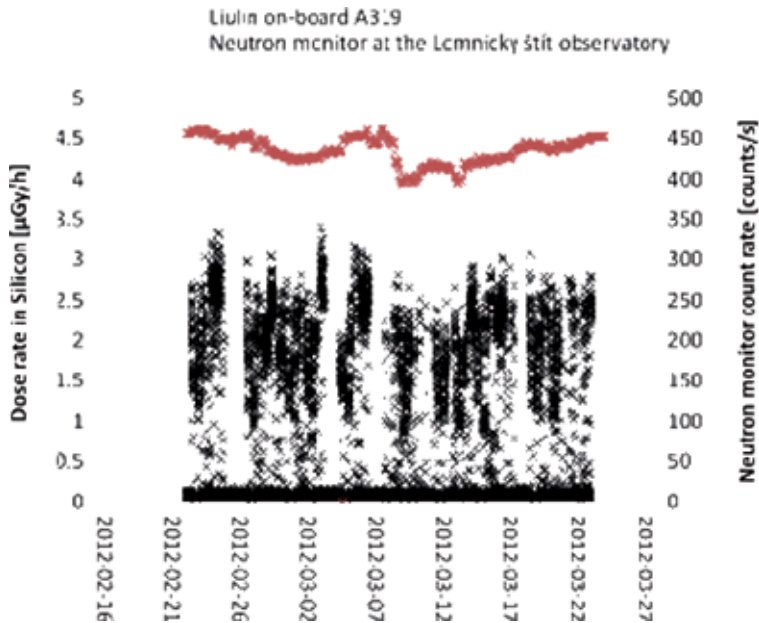


Figure 5. Forbush decrease as registered with the Liulin and the Lomnický Stit neutron monitor on March 8, 2012. Red points represent dose rates neutron count rates registered with the neutron monitor, black points represent Liulin data. Dispersion of the Liulin data is given by fact that dose rate measured during flight depends strongly on plane altitude

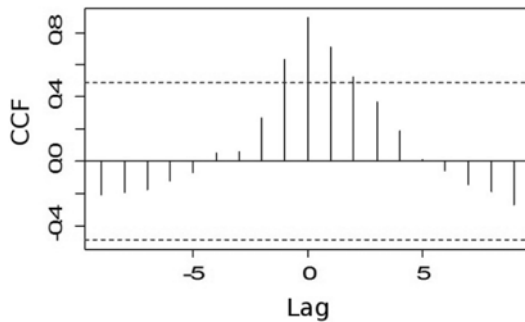


Figure 6. Cross-correlation coefficients calculated between neutron monitor and Liulin data for Forbush decrease from March 2012. Lag parameter represents time shift between neutron monitor and aircraft data. Because data were not shifted against themselves in time, CCF reaches its maximum value for lag=0. Therefore, absolute value of the coefficient for lag=0 expresses probability that the same effect was observed in both measurements

As can be seen from figure, the event is again visible only via simple visual inspection.

Beside the Forbush decrease #53 we also detected decrease during solar storm in March 2012. Decrease is again clearly visible on neutron monitor as well as Liulin data and is presented in Figure 5.

If visual inspection is not possible, we can estimate the correlation of measured data by calculation of cross-correlation coefficients. Results are shown in Figure 6.

CONCLUSION

We showed that publicly available database of measurements can be used not only for verification of radiation load of the aircrew but also as a tool for space weather monitoring. Liulin on-board CSA aircraft registered simultaneously with neutron monitor Ground Level Enhancement as well as Forbush decrease events and proved its capability to serve as a space weather monitor. Unfortunately, great disadvantage of this approach is that detector measures only while the plane is flying. Hence, there is higher probability to detect Forbush Decrease events which usually last longer than Ground Level Enhancements. This disadvantage could be eliminated by flying more devices at different planes so that at least one would be still high above the ground.

Acknowledgement. Results presented in this contribution were obtained due to kind cooperation of colleagues from the Czech Airlines. We are much obliged particularly to B. Kolar, J. Sary, T. Mueller, J. Rusek, P. Kefurt, M. Krupicka, and O. Mocny for their help and assistance. This work was partially supported with grants GACR 205/09/0171, GACR 202/09/H086 and grant SGS 10/212/OHK4/2T/14. Neutron monitor at the Lomnický štít is supported by the IEP SAS in Košice and by Slovak grant agency VEGA, project no. 2/0081/10.

REFERENCES

- [Benton, Benton, 2001] *Benton E. R., Benton E. V.* Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2001. V. 184. P. 255–294.
- [Bütikofer et al., 2008] *Bütikofer R., Flückiger E. O., Desorgher L., Moser M. R.* The extreme solar cosmic ray particle event on 20 January 2005 and its influence on the radiation dose rate at aircraft altitude // Science of the Total Environment. 2008. V. 391. P. 177–183.
- [Crawley, 2007] *Crawley M. J.* The R Book. Wiley, 2007.
- [Dachev, 2009] *Dachev Ts. P.* Characterization of near earth radiation environment by Liulin type instruments // Advances in Space Research. 2009. V. 44. P. 1441–1449.
- [Kudela, Langer, 2007] *Kudela K., Langer R.* Cosmic ray measurements in High Tatra mountains: 1957–2007 // Advances in Space Research. 2007. V. 44. P. 1166–1172.
- [Lindborg et al., 2004] *Lindborg L., Bartlett D. T., Beck P., McAulay I., Schnuer K., Schraube H., Spurny F.* (Eds.) Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew: Compilation of Measured and Calculated Data: Final Report of the EURADOS WG 5 to the Group of Experts established under Article 31 of the European treaty. European Commission, Directorate General for Energy and Transport, Radiation Protection. Iss. 140. Luxembourg, 2004.
- [Ploc et al., 2003] *Ploc O., Spurný F., Dachev Ts. P.* Long-term monitoring of the onboard aircraft exposure level with a Si-diode based spectrometer // Advances in Space Research. 2003. V. 32 P. 53–58.
- [Ploc et al., 2011] *Ploc O., Pachnerová Brabcová K., Spurný F., Malušek A., Dachev T.* Use of energy deposition spectrometer Liulin for individual monitoring of aircrew // Radiation Protection Dosimetry. 2011. V. 144. P. 611–661.
- [Spurny, Dachev, 2003] *Spurny F., Dachev Ts.* Long-Term Monitoring of the Onboard Aircraft Exposure Level With a Si-Diode Based Spectrometer // Advances in Space Research. 2003. V. 32. N. 1. P. 53–58. doi:10.1016/S0273-1177(03)90370-X.

[Uchihori et al., 2002] *Uchihori Y., Kitamura H., Fujitaka K., Dachev Ts. P., Tomov B. T., Dimitrov P. G., Matviichuk Y. L.* Analysis of the calibration results obtained with Liulin-4J spectrometer-dosimeter on protons and heavy ions // *Radiation Measurements*. 2002. V. 35. P. 127–134.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БОРТУ САМОЛЁТА С ПОМОЩЬЮ КРЕМНИЕВОГО СПЕКТРОМЕТРА ЛЮЛИН — СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА

**Дж. Кубанчак^{1,2}, О. Плок^{2,3}, И. Амброзова², И. Коварь¹, К. Кудела⁴, Р. Лангер⁴,
Ф. Шпурный²**

¹ Чешский технический университет в Праге, Факультет ядерных наук и физической техники, Отделение дозиметрии и применения ионизирующих излучений, Бржегова, 7

² Институт ядерной физики ASCR, VVI, Отдел радиационной дозиметрии, Прага, Чешская Республика

³ Технологический университет Чалмерса, Отделение ядерной энергетики, Гётеборг, Швеция

⁴ Институт экспериментальной физики Словацкой академии наук, Отделение космической физики, Кошице, Словакия

Огромное количество высокоэнергичных частиц попадает на Землю каждую секунду. Планета защищена от излучения атмосферой и магнитным полем. В некоторых областях человеческой деятельности, как например, авиации, снижается роль такой защиты. Экипажи самолётов и члены экипажей космических станций подвергаются увеличенной мощности радиации. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите, должны быть оценены дозы облучения людей, работающих в таких условиях. Как правило, официально принимаются оценки на основе расчётов с помощью любых из утверждённых компьютерных программ. Тем не менее, рекомендуется проверять такие расчёты, сопоставляя их с прямыми измерениями на борту воздушных судов. Эта статья представляет результаты длительного мониторинга на самолётах Чешских авиалиний. Представленные данные были получены непрерывно с 2001 г., охватывают весь 11-летний цикл солнечной активности и содержат свыше 105 записей. Будет показано, что данные эти могут быть использованы не только для оценки радиационной защиты, но и для мониторинга космической погоды.

ВАРИАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ЗА ПЕРИОД 2001–2011 гг. ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

А. Э. Лишневский¹, М. И. Панасюк¹, О. Ю. Нечаев¹, В. В. Бенгин²,
В. М. Петров², А. Н. Волков³, В. И. Лягушин³, И. В. Николаев³

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИЯФ МГУ), Москва, Россия, e-mail: ael@srd.sinp.msu.ru

² Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ ИМБП РАН), Москва, Россия, e-mail: bengin@pike.net.ru

³ Ракетно-космическая корпорация «Энергия», г. Королёв, Россия

Система радиационного контроля (СРК), установленная на борту служебного модуля (СМ) Международной космической станции (МКС), является важной частью системы радиационной безопасности космического аппарата, работает с небольшими перерывами с 1 августа 2001 г.

Представлены данные о результатах измерения мощности дозы в период с 1 августа 2001 г. по май 2012 г. как при нормальной радиационной обстановке так и во время солнечных протонных событий. Сопоставлены между собой значения мощности поглощённой дозы, измеренные детекторами, установленными в различных точках Российского сегмента (РС) МКС. Сравнение данных с разных детекторов показало, что различие между наиболее защищённой и наименее защищённой точками измерения не превышает двукратного при невозмущённых радиационных условиях. Во время солнечных протонных событий перепад доз может достигать тридцати раз.

Для периода времени с середины 2006 г. до окончания 2009 г. проведено разделение вклада в среднесуточную мощность дозы галактических космических лучей (ГКЛ) и радиационных поясов Земли (РПЗ) (в области Южно-атлантической аномалии). Показано, что вклад в среднесуточную мощность дозы от галактических космических лучей изменяется в соответствии с трендом, прослеживаемым по данным нейтронных мониторов, а вариации вклада радиационных поясов Земли обусловлены, в основном, изменениями высоты полёта МКС.

ВВЕДЕНИЕ

Система радиационного контроля, развёрнутая в модуле «Звезда» Международной космической станции, является частью системы обеспечения радиационной безопасности экипажей станции. Основная цель СРК — давать информацию для определения доз облучения экипажа в полёте. При создании системы ставилась задача автоматической оценки радиационной ситуации и информирования экипажа при её ухудшении в режиме реального времени [Лягушин и др., 2002; Панасюк и др., 2004].

Основные задачи СРК следующие:

- мониторинг радиационной обстановки внутри станции;
- прогнозирование уровней облучения экипажа и выработка рекомендаций по снижению уровней радиационной опасности;
- обеспечение службы радиационной безопасности экипажей пилотируемых космических комплексов информацией, необходимой для контроля и прогноза уровней облучения космонавтов и выработки

оптимальных рекомендаций по обеспечению их радиационной безопасности.

Система радиационного контроля состоит из семи блоков:

- дозиметра Р-16, чувствительными элементами которого являются две ионизационные камеры;
- четырёх высокочувствительных дозиметрических блоков ДБ-8 с полупроводниковыми детекторами излучения;
- двух блоков обработки и анализа результатов измерений.

Структурная схема системы и её связь с другими бортовыми системами модуля «Звезда» представлена на рис. 1.

Чувствительные элементы системы размещены в блоках Р-16 и ДБ-8. В настоящей работе анализируются данные, полученные с помощью высокочувствительных блоков ДБ-8. Все четыре блока ДБ-8 идентичны. В каждом из них есть по два полностью независимых канала, состоящих из кремниевого полупроводникового детектора толщиной 300 мкм и площадью 1 см², предусилителя, масштабирующего усилителя, аналого-цифрового преобразователя и последующей схемы цифровой обработки сигнала. При этом один из двух детекторов, входящих в состав каждого блока ДБ-8, защищён слоем свинца толщиной 2,5 мм. Далее анализируются данные, полученные с детекторов блоков ДБ-8, не имеющих дополнительной свинцовой защиты.

Блоки АИ и БКП предназначены для цифровой обработки результатов измерений и связи с системами модуля «Звезда». При этом на блок АИ возложена задача обнаружения солнечных протонных событий и информирования о них экипажа станции. Интеграция СРК с другими системами модуля «Звезда» позволяет передавать данные на Землю по телеметрическому каналу, а также непосредственно отображать параметры радиационной обстановки экипажу станции через персональный компьютер.

Существенное значение при разработке СРК имело размещение блоков ДБ-8 на борту станции. Точки размещения выбирались таким образом, чтобы обеспечить различные условия экранированности детекторов СРК оборудованием МКС. Наименее защищённым является блок ДБ-8 № 1, а наиболее защищённым — блок ДБ-8 № 4. Результаты расчётов функций экранированности детекторов представлены в работе [Митрикас, 2004].

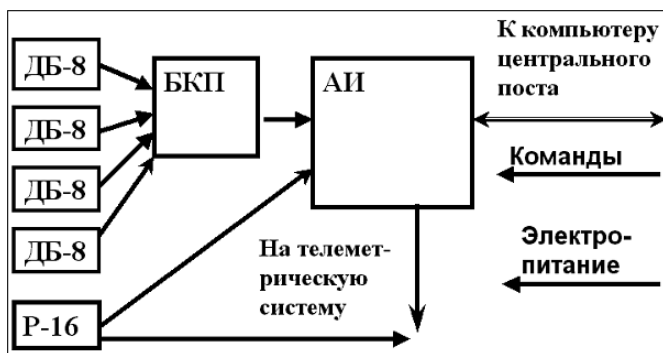


Рис. 1. Структурная схема системы радиационного контроля

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Длительность полученного ряда данных превышает 10 лет. На рис. 2 данные СРК сопоставлены с уровнем солнечной активности. Как можно видеть из верхней части рис. 2, где представлены числа Вольфа, время измерений охватывает фазу спада 23-го цикла солнечной активности, период минимума и начало фазы роста 24-го цикла.

Данные по числам Вольфа, взяты с сайта ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sunspot_numbers/international/ и сглажены методом «скользящего среднего» с интервалом усреднения 30 сут.

На нижней части графика представлены данные о среднесуточной мощности дозы, зарегистрированные за период с 1 августа 2001 г. по 15 мая 2012 г. незранированными детекторами блоков ДБ-8 № 1 и № 4 (наименее и наиболее защищёнными детекторами соответственно).

Резкие «вертикальные» выбросы соответствуют моментам регистрации на борту МКС повышенной мощности дозы, обусловленной крупными солнечными протонными событиями (СПС). Их вклад в дозу на борту МКС рассмотрен далее. Для остальных периодов времени представленные на графике данные получены на основе информации о среднесуточной мощности дозы методом «скользящего среднего» с интервалом усреднения 15 сут.

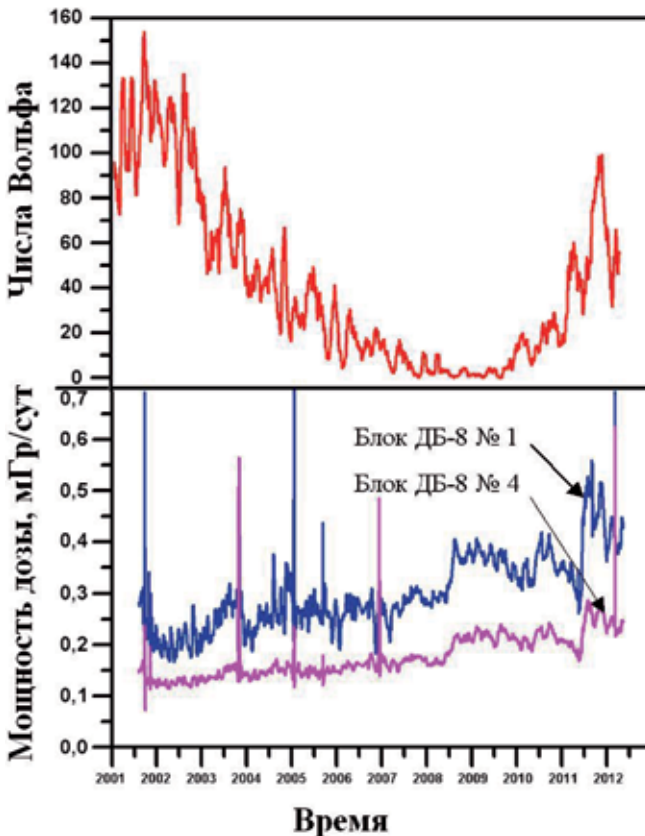


Рис. 2. Сопоставление данных СРК с уровнем солнечной активности

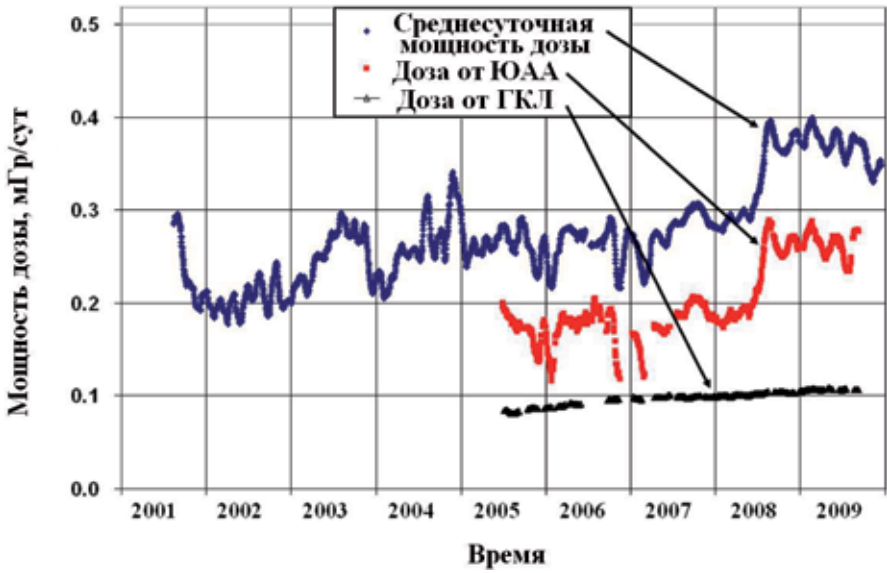


Рис. 3. Разделение вкладов в дозу, обусловленных ГКЛ и ЮАА

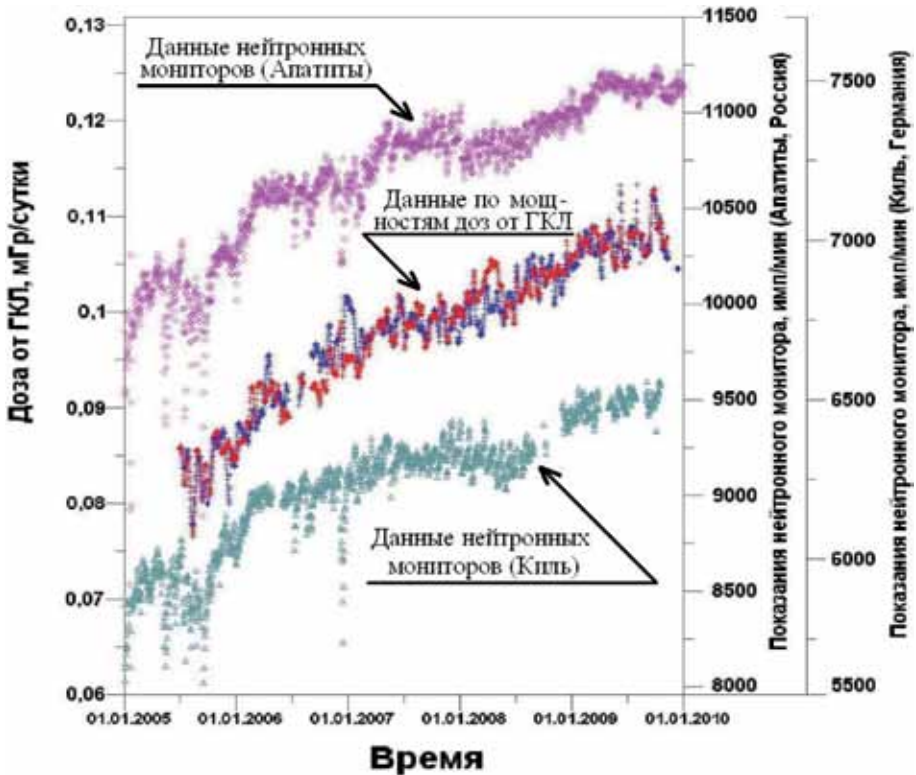


Рис. 4. Сопоставление вклада в суточную дозу от ГКЛ с показаниями нейтронных мониторов в Апатитах и Киле. Крестиками обозначены значения вклада в суточную дозу от ГКЛ по данным блоков ДБ-8 № 1 и 4 (левая шкала по оси ординат), кружочками и треугольниками — показания нейтронного монитора (правая шкала)

Можно видеть, что на борту МКС и в отсутствие СПС наблюдаются заметные вариации среднесуточной мощности дозы. Чтобы проанализировать причины вариаций, было проведено разделение вклада в дозу, обусловленного галактическими космическими лучами, и вклада, вносимого радиационным поясом Земли за время прохождения станцией зоны Южно-атлантической аномалии (ЮАА). Методика такого разделения описана в работе [Лишневский и др., 2010]. На рис. 3 представлен соответствующий результат для блока ДБ-8 № 1.

Анализ имеющихся данных показал, что вариации суточной дозы в отсутствие СПС обусловлены, в основном, вариациями вклада РПЗ. Вклад ГКЛ меняется сравнительно мало и для четырёх имеющихся мест расположения детекторов практически не зависит от защищённости точки измерения. Вклад РПЗ значительно уменьшается с ростом защищённости точки измерения и имеет значительные вариации во времени.

ВКЛАД В ДОЗУ ОТ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

На рис. 4 сопоставлены графики суточных доз от ГКЛ за период с середины 2005 по середину 2009 г. с показаниями нейтронного монитора в Апатитах [<http://pgia.ru/CosmicRay/>] и нейтронного монитора в Киле [<http://cr0.izmiran.rssi.ru/kiel/main.htm>].

Можно видеть, что изменения во времени показаний нейтронного монитора и суточной дозы от ГКЛ на борту МКС близки.

Однако размах вариации на нейтронном мониторе существенно меньше и составляет 6...10 % против 30 % вариации за этот период суточной дозы ГКЛ на МКС. Значение вклада в суточную дозу от ГКЛ в период с середины 2005 по середину 2009 г. увеличилось с 0,08 до 0,11 мГр/сут.

ВКЛАД В ДОЗУ ОТ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ (В ОБЛАСТИ ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ)

Проведённый анализ показал, что вариации вклада РПЗ в суточную дозу связаны, в основном, с изменением высоты полёта МКС. На рис. 5 сопоставлены графики суточных доз от РПЗ, зарегистрированных блоками ДБ-8 № 1 и 4, с графиком высоты прохождения области ЮАА. При этом отдельно показана высота прохождения области ЮАА на восходящих и нисходящих участках орбиты. Данные измерений охватывают период экстремально низкого уровня солнечной активности, продолжавшийся с 2007 по 2010 г. Из представленных на рис. 5 данных можно видеть, что, начиная с 2007 г., изменения суточных доз от РПЗ определяются соответствующими изменениями высоты полёта МКС.

ВКЛАД В ДОЗУ, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ СОЛНЕЧНЫМИ ПРОТОННЫМИ СОБЫТИЯМИ

За время полёта МКС наблюдалось более 50 солнечных протонных событий (СПС), однако большинство из них не оказало существенного влияния на радиационную обстановку на борту станции. Только в девяти из них доза от

СПС превысила среднесуточное значение. Данные по этим СПС представлены в таблице.

Дозы (в мГр) за солнечное протонное событие, зарегистрированные системой радиационного контроля на борту МКС

Дата (день. мес. год)	ДБ-8 № 1		ДБ-8 № 2		ДБ-8 № 3		ДБ-8 № 4	
	не экра- ниро- ванный детектор	защи- щённый	не экра- ниро- ванный детектор	защи- щённый	не экра- ниро- ванный детектор	защи- щённый	не экра- ниро- ванный детектор	защи- щённый
24.09.01	1,57	0,99	1,25	0,96	0,54	0,21	0,19	0,15
04.11.01	2,66	1,31	1,18	0,49	0,84	0,54	0,08	0,04
28.10.03	1,71	1,19	0,82	0,52	0,87	0,69	0,31	0,30
29.10.03	6,82	3,14	3,00	1,18	2,11	1,35	0,67	0,52
17.01.05	0,81	0,67	0,31	0,55	0,63	0,29	0,18	0,10
21.01.05	0,21	0,18	0,13	0,14	0,13	0,14	0,08	0,07
08.09.05	0,33	0,28	0,20	0,24	0,26	0,20	0,09	0,08
13.12.06	0,51	0,47	0,67	0,67	0,43	0,42	0,32	0,32
07.03.12	1,88	1,60	1,24	1,56	1,58	1,08	0,58	0,56

Наибольший вклад в дозу от СПС на борту станции внесла серия событий 28–29 октября 2003 г. На рис. 6 представлены данные по динамике накопления дозы по незащищённым детекторам 1-го и 4-го блоков ДБ-8 за период с 20 по 30 октября 2003 г.

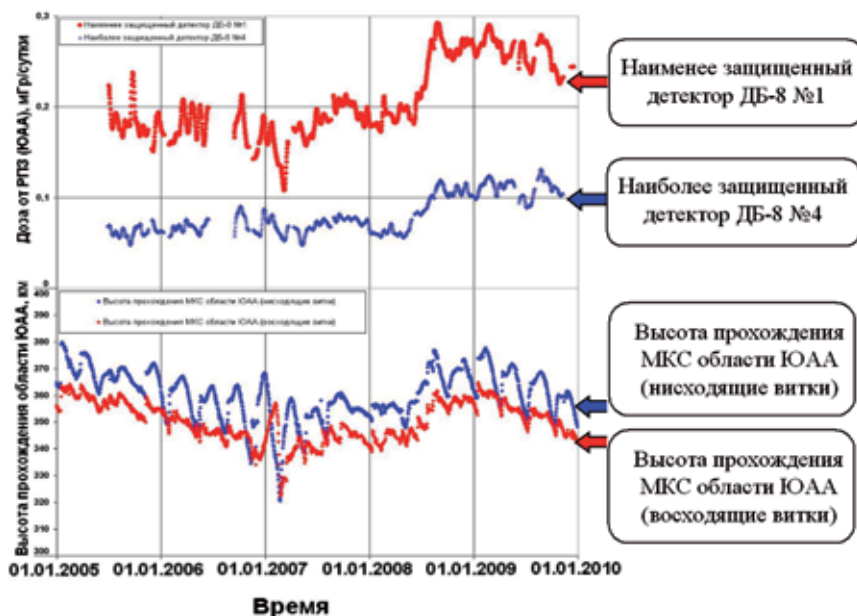


Рис. 5. Сравнение временной зависимости значения дозы, накопленной за время прохождений области ЮАА в течение суток, с высотой прохождения ЮАА

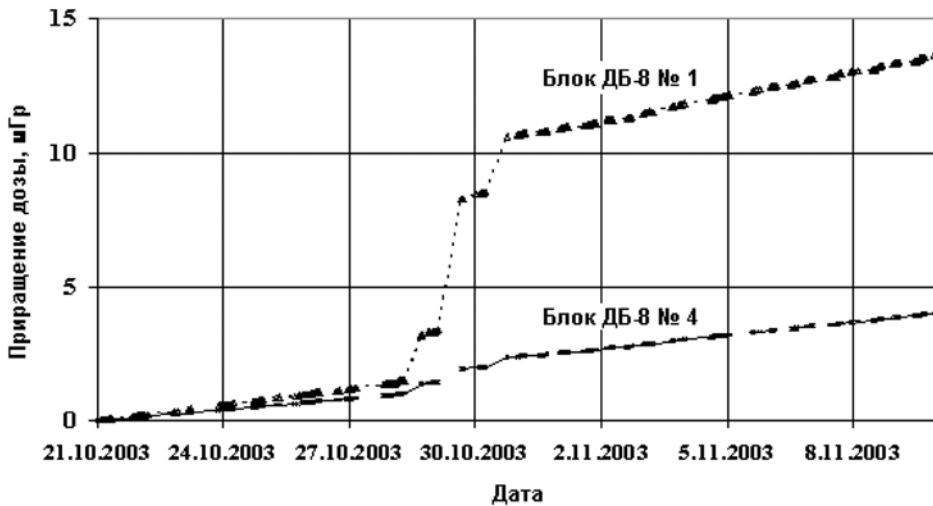


Рис. 6. Приращение поглощенной дозы за период крупных солнечных протонных событий 28 и 29 октября 2003 г., зарегистрированное детекторами первого и четвертого блоков ДБ-8

Данные таблицы, а также график, представленный на рис. 6, иллюстрируют значительную разницу в изменениях радиационной обстановки на борту МКС внутри одного модуля станции. Можно видеть, что темп накопления дозы, зарегистрированный блоком ДБ-8 № 4, расположенным в районе рабочего стола в отсеке большого диаметра модуля «Звезда», существенно ниже, чем темп накопления дозы, зарегистрированный блоком ДБ-8 № 1, расположенным в районе центрального поста того же модуля. Перепад доз от СПС на борту зависит от спектра протонов и может превышать порядок величины. Эта разница обусловлена значительным различием в условиях защищённости на МКС. Полученные данные подтверждают эффективность такой защитной меры как переход экипажа в более защищённые зоны станции во время ухудшения радиационной обстановки, вызванной СПС, если прогноз параметров солнечных космических лучей позволяет заключить, что перепад доз по станции будет значительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С августа 2001 г. система радиационного контроля работает на борту СМ МКС и обеспечивает Службу радиационной безопасности оперативной дозиметрической информацией.

Получен к настоящему времени ряд измерений мощности дозы на борту МКС, перекрывающий, с небольшими перерывами, период более 10 лет.

Экспериментально измеренный перепад мощности дозы в модуле «Звезда» МКС в спокойных условиях составляет около двух раз. Вариации среднесуточной мощности дозы в спокойных условиях обусловлены, в основном, изменениями высоты полёта МКС.

Во время солнечных протонных событий перепад доз на борту МКС зависит от спектра протонов и может превышать порядок величины.

ЛИТЕРАТУРА

- [Лишнеvский и др., 2010] *Лишнеvский А. Э., Панасюк М. И., Бенгин В. В.* и др. Вариации радиационной обстановки на МКС в 2008 году // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 3. С. 212–217.
- [Лягушин и др., 2002] *Лягушин В. И., Волков А. Н., Александрин А. П.* и др. Предварительные результаты измерения поглощённых доз по данным системы радиационного контроля российского сегмента Международной космической станции // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиац. воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып. 4. С. 22–25.
- [Митрикас, 2004] *Митрикас В. Г.* Модель защищённости обитаемых отсеков служебного модуля международной космической станции для оценки радиационной опасности // Авиакосмич. и экологич. медицина. 2004. Т. 38. № 3. С. 41–47.
- [Панасюк и др., 2004] *Панасюк М. И.* и др. Магнитные бури в октябре 2003 года. Коллаборация «Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС-2003)» // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 5. С. 509–554.

VARIATIONS OF A RADIATION ENVIRONMENT ONBOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION DURING 2001–2011 ACCORDING TO DATA OF THE RADIATION MONITORING SYSTEM

A. E. Lishnevskii¹, M. I. Panasyuk¹, O. Yu. Nechaev¹, V. V. Benghin², V. M. Petrov², A. N. Volkov³, V. I. Lyagushin³, I. V. Nikolaev³

¹ D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP), M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia e-mail: ael@srd.sinp.msu.ru

² State Research Center of the Russian Federation Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: benghin@pike.net.ru

³ Rocket-space corporation "Energija", Korolev, Russia

The radiation monitoring system (RMS) established onboard the Service Module (SM) of the International Space Station (ISS) is an important part of the radiation safety system of the modern spacecraft. RMS is in operation with small breaks since August 1st, 2001. In the report are submitted data on results of measurement of a dose rate during the period from August 2001 to December 2011 both at normal radiation conditions and during solar proton events. Values of the absorbed dose rate, measured by the detectors established in various points of SM ISS are compared among themselves. The comparison of data from different detectors, showed that the ratio between the most protected and least protected points of measurement doesn't exceed double under not disturbed radiation conditions. The overfall of dose rates during solar proton events can reach thirty times.

For time period from the middle of 2006 until the end of 2009 division of a contribution to daily averaged dose rate of galactic cosmic rays and Earth's radiation belts (in the SAA zone) is carried out. It is demonstrated that the contribution to daily averaged dose rate from galactic cosmic rays changes according to a trend traced according to neutron monitors, and variations of a contribution of Earth's radiation belts are caused, generally changes of height of flight of the ISS.

MONITORING ONBOARD OF ISS WITH PASSIVE DETECTORS — 5 YEARS EXPERIENCE

*I. Ambrožová*¹, *V. A. Shurshakov*², *R. V. Toloček*², *K. Pachnerová Brabcová*^{1,3},
J. Kubančák^{1,4}, *B. Vlček*¹, *F. Spurný*^{1,3}

¹ Nuclear Physics Institute, AS CR, Prague, Czech Republic

² Institute of BioMedical Problems, RAS, Moscow, Russia

³ Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

⁴ Czech Technical University in Prague, Czech Republic

The cosmic radiation can represent serious health risk for astronauts; concerns about the biological effects of space radiation increase rapidly due to the perspective of long-duration manned missions. In order to secure the safety of the astronauts and minimize their risks, it is important to ensure a capability to evaluate the impact of space radiation on human health and to determine the exposure level as accurately as possible. The complexity of space radiation does not permit to obtain accurate data on radiation conditions based only on calculations. There is still need of experimental results obtained in real flight conditions.

This contribution deals with the measurements using passive detectors onboard the International Space Station during last several years. The detectors were exposed every year since 2007 at 6 various locations inside the station. Spectra of linear energy transfer (LET), total absorbed doses, dose equivalents, and quality factors were determined by combination of thermoluminescent and plastic nuclear track detectors. Thermoluminescent detectors can measure absorbed dose from all particles, however they underestimated doses for particles with higher values of LET. On the other hand, track detectors register only particles with LET above the detection threshold (about 7 keV/μm).

Variation of dosimetric quantities with different parameters such as the phase of solar cycle, orbit parameters of ISS, detectors' positions etc. will be discussed. The data obtained in these studies could bring additional information about the radiation situation onboard of spacecraft and help to estimate radiation risk of crewmembers.

INTRODUCTION

During the spaceflights, the astronauts are exposed to cosmic radiation, which can represent for them an important health risk, especially during long-term missions. The exposure level in low-Earth orbit (LEO) is several hundreds times higher than that on the Earth's surface, several times higher than onboard of aircraft. In order to secure safety of the astronauts and minimize their risks, it is important to determine the exposure level as accurately as possible.

Radiation field onboard the International Space Station (ISS) is completely different from those on the Earth. The radiation field onboard of spacecraft is very complex; it is composed of primary high-energy galactic and solar particles, particles trapped in Earth's radiation belts, and also by secondary and further generation particles produced in fragmentation and nuclear interactions of primary cosmic radiation with the walls of the spacecraft and the surrounding materials including astronauts' bodies. Moreover, dose characteristics depend on many parameters, such as phase of the solar cycle, shielding of the spacecraft, orbit parameters etc [Benton, Benton, 2001; National..., 2002; Heinrich et al., 1999; Badhwar, 1998]. The complexity of space radiation does not permit to obtain accurate data on radiation conditions based only on calculations. There is still need of experimental results obtained in real flight conditions.

Because of the complexity, there is no simple detector efficient in collecting all dose characteristics (spectra of linear energy transfer (LET), total absorbed dose, dose equivalent, and quality factor). Usually, it is necessary to combine several types of detectors. For the measurements of dose characteristics onboard of spacecraft, combination of thermoluminescence (TLD) and plastic nuclear track detectors (PNTD) is very suitable and often used. Due to their several advantages, such as small weight and dimensions, easy manipulation and no need of power supply, they can be easily used to measure spatial distribution of dose characteristics in the phantoms simulating human body or they can be placed at various locations inside the spacecraft.

This contribution deals with the measurements using passive detectors onboard the International Space Station during last several years (2009–2011). The detectors were exposed every year at 6 various locations inside the station. Spectra of linear energy transfer (LET), total absorbed doses, dose equivalents, and quality factors were determined by combination of thermoluminescent and plastic nuclear track detectors.

Variation of dosimetric quantities with different parameters such as the phase of solar cycle, orbit parameters of ISS, detectors' positions etc. will be discussed. The data obtained in these studies could bring additional information about the radiation situation onboard of spacecraft and help to estimate radiation risk of crewmembers.

MATERIALS AND METHODS

In the studies, packages composed of thermoluminescent detectors (TLD) and plastic nuclear track detectors (PNTD) were used.

The detectors packages were prepared in advance and after the exposure onboard of ISS they were evaluated in the laboratory. Besides the samples intended for irradiation in space, some detectors were also kept in the laboratory as control.

Thermoluminescent Detectors

The principle of thermoluminescence is based on the storage of electrons in the detector's crystal matrix after irradiation with ionizing particles. The electrons are released during a readout process, where the thermoluminescence material is heated up to several hundreds of °C. The light intensity emitted is proportional to the amount of absorbed energy during exposure to ionizing radiation [McKeever, 1985].

Thermoluminescent detectors are used to measure absorbed dose particularly from low-LET particles (photons, high-energy protons, etc.); for particles with higher values of LET (about >10 keV/ μm , depending on the type of TLD), their relative response decreases [Spurny, 2004] and thus they underestimate the dose from high-LET radiation. Moreover, TLD measure only cumulative absorbed dose and thus contain no information concerning the LET spectrum. Without LET information, TLD alone cannot be used to determine either total dose or dose equivalent.

As TLD, we have used three different types — $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ [Akselrod et al., 1990], $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ [Guelev et al., 1994; Yamashita et al., 1971], and alumophosphate glasses Al-P [Trousil et al., 1984]; the use of concrete type of TLD in each experimental run depended on the experimental conditions and availability of TLD.

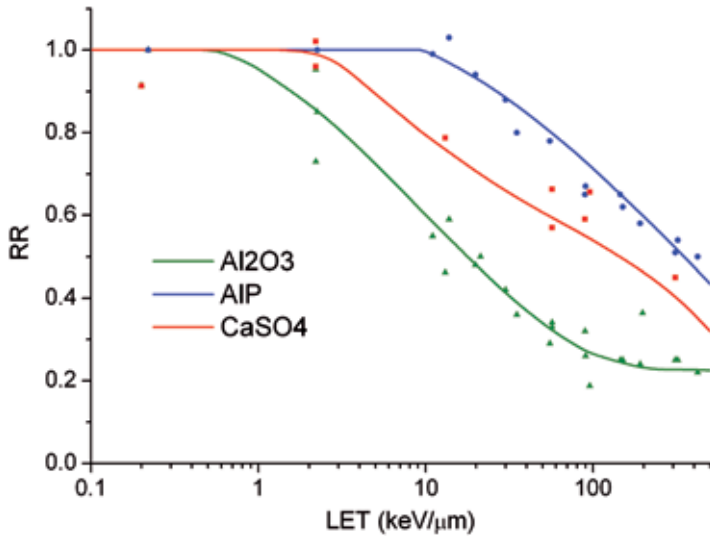


Figure 1. Relative response as a function of LET for three types of TLD

All detectors used were calibrated in photon beams in terms of air kerma and then converted to absorbed dose in water. The relative responses (relative to ^{60}Co) for all TLDs as a function of LET of the particles were obtained using irradiation in several heavy ion beams [Spurny, 2004; Ambrožová, Vlček, 2011]; they are for all three TLD materials presented on Figure 1. These dependencies differ for various types of TLD, for example for $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ the response decreases with increasing LET more steeper than for $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ or Al-P.

Plastic Nuclear Track Detectors

The principle of PNTD can be briefly outlined as follows. Heavily ionizing particle passing through a medium causes extensive ionization along its path and leaves narrow trails of damage (latent track). If the material containing latent tracks is exposed to certain chemical agent (etchant), chemical reactions are more intensive in these damaged regions. Thus after a certain time of etching, a tiny etch cone or cylinder (track) is created that can be observed under an optical microscope [Durrani, Bull, 1987]. There can be found relation between the parameters of etched tracks and LET of the particles via calibration; from the knowledge of LET, other dosimetric characteristics (such as absorbed dose or dose equivalent) can be then calculated.

Track detectors register only particles with LET above the detection threshold; the detection threshold depends on the used material and evaluation conditions — the most sensitive PNTD are able to register particles from about $5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (considered in water) [Benton et al., 1996]. This means that PNTD is sensitive to protons of energy $\leq 20 \text{ MeV}$, α -particles of energy $\leq 100 \text{ MeV}$, and heavy ions of almost all energies. Neutrons of energy between 1 and 20 MeV are detected via tracks from recoil protons formed as a result of interactions between the neutron and hydrogen in the polymeric detector. Higher energy protons and neutrons are detected via target fragmentation reactions with the C and O nuclei of the detector, or in target materials in close proximity to the detector.

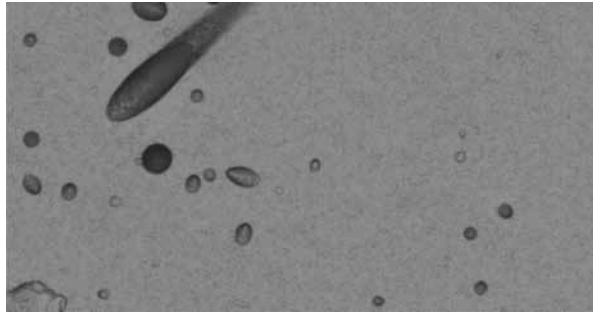


Figure 2. Surface of etched detector exposed onboard ISS

The detectors from two production companies were used as PNTD: USF-4 (American Technical Plastics, USA; 0.6 mm thick) and HARZLAS TD-1 (Nagase Landauer Ltd, Japan; 0.9 mm thick); both are polyallyldiglycolcarbonate. After the irradiation, all detectors, together with control ones, were etched in 5 N NaOH at 70° for 18 hours — these etching conditions correspond to the removal of a layer about 15–17 μm on each side of the detector. More information about the detectors' evaluation can be found for example in [Pachnerova Brabcova, 2010; Jadrnickova, 2006; Spurny et al., 2005].

After the etching, the detectors were analyzed using the microscope system HSP-1000 [Yasuda et al., 2005]. An example of the surface of etched detector is shown in Figure 2. From the parameters of tracks (minor and major axis) and layer removed by etching, LET of the particle can be determine, after appropriate calibration. All detectors were calibrated in several heavy charged particle beams (at HIMAC (NIRS, Japan) or Nuclotron (JINR, Russia)) and also at some neutron sources [Spurny, Jadrnickova, 2008; Brabcova et al., 2009]. The range of LET (considered in water) that can be determined using these detectors and conditions is about 7...450 keV/ μm [Brabcova et al., 2010].

Thermoluminescent Detectors + Plastic Nuclear Track Detectors

The sensitivities of TLD and PNTD are largely complementary and by combining results from the two detector types, one can obtain values of total absorbed dose and total dose equivalent. The process can be simply described as follows. Using the efficiency function for TLD (see Fig. 1) and LET spectrum measured with PNTD, high-LET part of the dose can be subtracted from the dose measured with TLD. The remaining low-LET dose fraction from the TLD is then added to the high-LET dose measured with PNTD to obtain a value of total dose. Similarly, the low-LET dose fraction from the TLD is added to the dose equivalent measured with PNTD to obtain a value of total dose equivalent xDoke et al., 1995].

EXPERIMENTS

The detectors' packages were put into so called SPD boxes (Figure 3) and placed at different compartments inside the International Space Station (ISS). In total, six SPD boxes can be placed at various locations inside the Russian Service Module



Figure 3. SPD boxes

(SM), Piers-1 Module, or MIM-2 Module. Each box contains various packages of passive detectors. The boxes are always located at the same position; four boxes are in Russian Service Module, two boxes were in Piers-1 Module [Jadnickova et al., 2009], in 2010 one box from Piers-1 Module was moved to MIM-2 Module.

The detectors were exposed onboard the ISS during several experiments (in the frame of Matroshka-R experiments [Shurshakov et al., 2008; Akatov et al., 2007]) since 2007; the overview of the experimental runs (period and duration, average altitude of the ISS, and location of the detectors) is summarized in Table 1.

Table 1. Overview of experiments

Experiment	Duration [days]	ISS altitude [km]	Location
2007	163 (May – October 2007)	346	Piers-1, SM
2008	206 (May – October 2008)	355	Piers-1, SM
2009	158 (May – October 2009)	356	Piers-1, SM
2010	211 (April – November 2010)	359	Piers-1, SM
2011	231 (April – November 2011)	377	Piers-1, MIM-2, SM

RESULTS

By means of track detectors, the spectra of LET can be determined; registered tracks correspond to ions of primary galactic cosmic radiation and to secondary particles created in nuclear interactions of high-energy protons, neutrons, and heavy ions. The spectra differ for various locations inside the ISS, as can be seen in Figure 4. Generally, one can say that in the less shielded compartments like Piers-1 Module, there is higher contribution of particles with lower values of LET; in the high-LET region there are practically no differences within the uncertainties. It should be mentioned that the uncertainties are relatively large for high-LET region because of poorer statistics due to rare occurrence of such particles.

In Figure 5, there are compared LET spectra measured at the same location in 2007, 2009, and 2011.

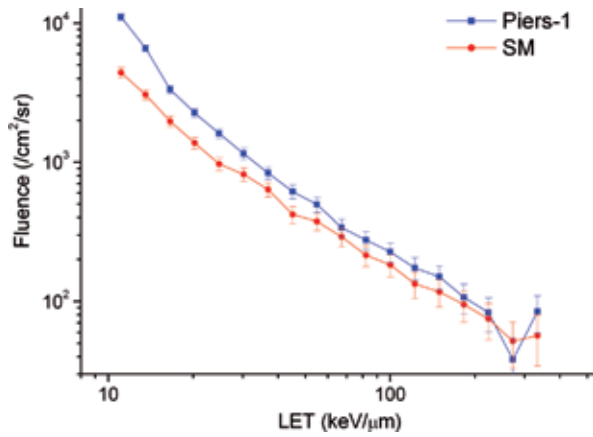


Figure 4. LET spectra measured in Piers-1 and Service Module

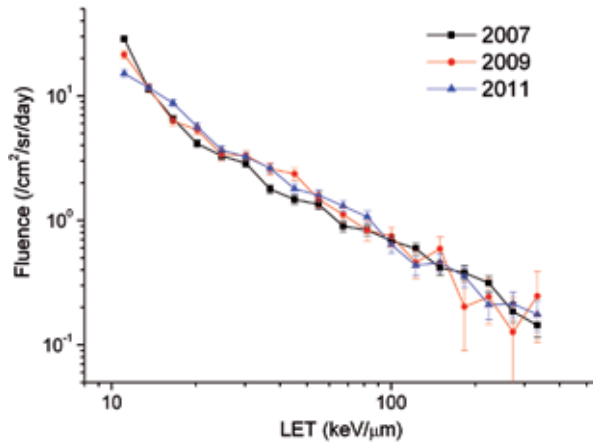


Figure 5. LET spectra in Service Module

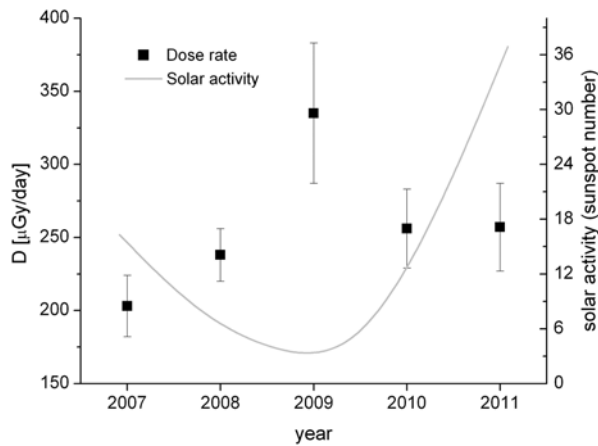


Figure 6. Average absorbed dose rates in Service Module in 2007–2011 related to solar activity

From the LET spectra, the absorbed dose and dose equivalent were calculated. The absorbed dose and dose equivalent measured with PNTD were then combined together with doses measured with TLD to obtain total values of absorbed dose, dose equivalent, and quality factor. The average daily absorbed dose and dose equivalent in the Service Module ranged from 203 to 335 $\mu\text{Gy}/\text{day}$ and from 498 to 714 $\mu\text{Sv}/\text{day}$, respectively. In Piers-1 Module, which is less shielded, the absorbed dose and the dose equivalent are higher, up to about 20...30 %. As can be seen in Figure 6 dose characteristics anticorrelates well with the phase of solar cycle; the values were the highest during the minimum of solar activity (in 2009).

CONCLUSION

Results obtained onboard the ISS during recent 5 years were presented; the total values of absorbed dose and dose equivalent were obtained using the combination of TLD and PNTD. Dose characteristics depend on the position inside the spacecraft and period of the mission. However, also other parameters, for example ISS altitude, can influence the dosimetric characteristics. From the simulation it was found that the increase of the ISS altitude by about 10 km can cause increase in the absorbed dose by about 15 % [Koliskova et al., 2012].

The data obtained in these studies could bring additional information about the radiation situation onboard of spacecraft and help to estimate radiation risk of crewmembers.

Acknowledgement. This work was supported through GACR 205/09/0171, GAAV KJB100480901 and bilateral scientific cooperation of the Academy of Sciences of the Czech Republic and the Russian Academy of Sciences. The authors are much obliged to the organisers of ICCHIBAN experiments and the staff of HIMAC (NIRS, Japan), NSRL (BNL, USA), and Nuclotron (Dubna, Russia) for their help and assistance during calibration of the detectors.

REFERENCES

- [Akatov et al., 2007] Akatov Yu.A., Arkhangelsky V.V., Benghin V.V., Bondarenko V.A., Mitrikas V.G., Petrov V.M., Tsetlin V.V., Shurshakov V.A., Lyagushin V.I., Kartsev I.S. Study of regularities in radiation fields in human body and in space station compartments in spaceflight // *Cosmonautics and Rocket building*. 2007. V. 4. N. 49. P. 71–84 (= *Акатов Ю.А., Архангельский В.В., Бенгин В.В., Бондаренко В.А., Митрикас В.Г.* и др. Исследование закономерностей формирования радиационных полей в теле человека и в отсеках орбитальной станции в ходе космического полёта // *Космонавтика и ракетостроение* : науч.-техн. журн. 2007. № 4. С. 71–84).
- [Akselrod et al., 1990] Akselrod M.S., Kortov V.S., Kravetsky D.J., Gottlib V.I. Highly sensitive TL anion-defect $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ single crystal detectors // *Radiation Protection Dosimetry*. 1990. V. 33. P. 119–122.
- [Ambrožová, Vlček, 2011] Ambrožová I., Vlček B. Proton ICCHIBAN 2 & 3: Results of NPI ASCR participant with various types of thermoluminescent detectors: Research report NPI/DRD ASCR 639/11. 2011.
- [Badhwar, 1998] Badhwar G.D. The radiation environment in low-Earth orbit // *Radiation Research*. 1998. V. 148. P. S3–S10.

- [Benton, Benton, 2001] *Benton E. R., Benton E. V.* Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 2001. V. 184. P. 255–294.
- [Benton et al, 1996] *Benton E. V., Frank A. L., Csige I., Frigo L. A., Benton E. R.* LET spectra measurements on LDEF: Variations with shielding and location // Radiation Measurements. 1996. V. 26. P. 783–791.
- [Brabcova et al., 2009] *Brabcova K., Spurny F., Jadrnickova I.* Track etch based LET spectrometry in beams of neutrons with energies from 0.2 to 200 MeV // Radiation Measurements. 2009. V. 44. P. 969–971.
- [Brabcova et al., 2010] *Brabcova K., Jadrnickova I., Spurny F.* Comparison study of polyallyldiglycolcarbonate PADC variations as spectrometers of linear energy transfer // Safety of Nuclear Energy. 2010. V. 516. P. 173–175. (In Czech.)
- [Durrani, Bull, 1987] *Durrani S. A., Bull R. K.* Solid state nuclear track detection — principles, methods and applications. Pergamon press, 1987.
- [Doke et al., 1995] *Doke T., Hayashi T., Nagaoka S., Ogura K., Takeuchi R.* Estimation of dose equivalent in STS-47 by a combination of TLDs and CR-39 // Radiation Measurements. 1995. V. 24. P. 75–82.
- [Guelev et al., 1994] *Guelev M. G., Mishev I. T., Burgkhardt B., Piesch E.* A two-element $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ dosimeter for environmental monitoring // Radiation Protection Dosimetry. 1994. V. 51. P. 35–40.
- [Heinrich et al., 1999] *Heinrich W., Roesler S., Schraube H.* Physics of cosmic radiation fields // Radiation Protection Dosimetry. 1999. V. 86. P. 253–258.
- [Jadrnickova, 2006] *Jadrnickova I.* Spectrometry of linear energy transfer and its use in radiotherapy and radiation protection in high-energy particle fields: PhD thesis. Czech Technical University, Prague. 2006.
- [Jadrnickova et al., 2009] *Jadrnickova I., Tateyama R., Yasuda N., Kawashima H., Kurano M., Uchihori Y., Kitamura H., Akatov Yu., Shurshakov V., Kobayashi I., Ohguchi H., Koguchi Y., Spurny F.* Variation of absorbed dose onboard of ISS Russian Service Module as measured with passive detectors // Radiation Measurements. 2009. V. 44. P. 901–904.
- [Kolísková et al., 2012] *Kolísková Z., Sihver L., Ambrožová I., Spurný F., Sato T., Shurshakov V. A.* Simulations of absorbed dose on the phantom surface of MATROSHKA-R experiment at the ISS // Advances in Space Research. 2012. V. 49. P. 230–236.
- [McKeever, 1985] *McKeever S. W. S.* Thermoluminescence of solids. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [National..., 2002] National Council on Radiation Protection and Measurements Operational radiation safety program for astronauts in low Earth orbit: a basic framework : NCRP Report No. 142. Bethesda, MD. 2002.
- [Pachnerová Brabcová, 2010] *Pachnerová Brabcová K.* Study and development of track etch detectors for dosimetric purposes: PhD thesis. Czech Technical University, Prague. 2010.
- [Spurny, 2004] *Spurny F.* Response of thermoluminescent detectors to high-energy charged particles and to neutrons // Radiation Measurements. 2004. V. 38. P. 407–412.
- [Spurny et al., 2005] *Spurny F., Jadrnickova I., Bamblevski V. P., Molokanov A. G.* Upgrading of LET track-etch spectrometer calibration: calibration and uncertainty analysis // Radiation Measurements. 2005. V. 40. P. 343–346.
- [Spurny, Jadrnickova, 2008] *Spurny F., Jadrnickova I.* Track etch and thermo luminescent detectors response to high energy charged particles // Radiation Measurements. 2008. V. 43. P. S169–S173.
- [Shurshakov et al., 2008] *Shurshakov V. A., Akatov Yu. A., Kartsev I. S., Petrov V. M., Tolochek R. V., Petrov V. I., Polenov B. V., Lyagushin V. I.* Study of dose distribution in a human body in space station compartments with the spherical tissue-equivalent phantom // Fundamental Space Research: Conf. Proc. Sunny Beach, Bulgaria. 2008. P. 234–237.

- [Trousil et al., 1984] *Trousil J., Plichta J., Prouza Z., Studena J.* Basic dosimetric characteristics of the Czechoslovak thermoluminescent and neutron dosimetry // *Kernenergie*. 1984. V. 27. P. 246–254.
- [Yamashita et al., 1971] *Yamashita Y., Nada N., Onishi H., Kitamura S.* Preparation and properties of new $\text{CaSO}_4:\text{Dy} [\text{Tm}]$ thermoluminescent detectors // *Health Physics*. 1971. V. 21. P. 295–299.
- [Yasuda et al., 2005] *Yasuda N., Namiki K., Honma Y., Umeshima Y., Marumo Y., Ishii H., Benton E. R.* Development of a high speed imaging microscope and new software for nuclear track detector analysis // *Radiation Measurements*. 2005. V. 40. P. 311–315.

МОНИТОРИНГ НА БОРТУ МКС С ПАССИВНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ — ПЯТЬ ЛЕТ ОПЫТА

И. Амброзова¹, В. А. Шурышаков², Р. В. Толочек², К. Пачнерова-Брабцова^{1,3}, Дж. Кубанчак^{1,4}, Б. Влчек¹, Ф. Шпурный^{1,3}

¹ Институт ядерной физики Академии наук Чешской Республики, Прага, Чешская Республика

² Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Москва, Россия

³ Технологический университет Чалмерса, Гётеборг, Швеция

⁴ Чешский технический университет, Прага, Чешская Республика

Космическое излучение может представлять серьёзную опасность для здоровья космонавтов; опасность биологического действия космического излучения резко возрастает в связи с перспективой длительных пилотируемых миссий. В целях оценки безопасности космонавтов и минимизации соответствующих рисков, важно обеспечить возможность оценки влияния космической радиации на здоровье человека и определение уровня экспозиции как можно точнее. Сложность космической радиации не позволяет получить точные данные о радиационной обстановке, основанные только на расчётах. Необходимы также экспериментальные результаты, полученные в реальных условиях полёта.

Наше исследование имеет дело с использованием пассивных детекторов на борту Международной космической станции в течение последних нескольких лет. Каждый год, начиная с 2007 г., детекторы выставлялись в 6 различных местах внутри станции. Спектр линейной передачи энергии (ЛПЭ), суммарная поглощённая доза, эквивалентные дозы, и качество факторов определялось сочетанием термолюминесцентных и пластиковых ядерных трековых детекторов. Термолюминесцентные детекторы измеряли поглощённую дозу от всех частиц, однако они недооценивали дозы для частиц с высокими значениями ЛПЭ. С другой стороны, трековые детекторы регистрируют только частицы с ЛПЭ выше порога обнаружения (около 7 кэВ/мкм).

В работе обсуждаются изменения дозиметрических величин с изменением различных факторов, таких как фазы солнечного цикла, параметры орбиты МКС, позиции детекторов и т. д. Данные, полученные в этих исследованиях могут дать дополнительную информацию о радиационной обстановке на борту космических кораблей и помочь оценить степень радиационного риска для экипажа.

Том 1

Часть 3

ОЦЕНКА И ПУТИ СНИЖЕНИЯ
РИСКОВ ЗАБОЛЕВАНИЙ,
ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ
ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ
КЛИМАТА

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА, ВОЛНЫ ЖАРЫ И ХОЛОДА КАК ФАКТОРЫ РИСКА ПОВЫШЕННОЙ СМЕРТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В НЕКОТОРЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ

Б. А. Ревич¹, Д. А. Шапошников¹, Н. Токаревич²

¹ Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук, Москва, Россия

² Пастеровский институт эпидемиологии и микробиологии, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: revich@ecfor.ru

В работе систематизируются результаты оригинальных исследований авторами взаимодействия показателей температуры воздуха и его загрязнённости со смертностью населения. Применение метода временных рядов позволило выявить количественные параметры влияния температурных волн на уровень смертности населения Москвы (2000–2006) и северных городов — Архангельска, Мурманска, Магадана и Якутска (1999–2007).

Одно из последствий изменения климата — увеличение числа дней с аномально высокой или низкой температурой воздуха, т. е. волн жары и холода. Климатологи прогнозируют увеличение количества дней с экстремально высокой температурой, учащение волн тепла и сильных осадков [Climate Change..., 2007; Parry et al., 2007].

Изменение климата в странах Северного полушария может проявляться в увеличении числа температурных аномалий. Росгидромет регулярно публикует доклады об особенностях климата на территории Российской Федерации, в которых содержится информация об аномалиях температур и индексах экстремальности суточных температур. Для расчёта этих индексов Росгидромет использует данные о числе дней за период времени (сезон, год), когда любая из характеристик суточной температуры (суточный максимум, минимум или размах) была выше или ниже некоторого порогового значения. Пороговые значения определяются для каждого месяца по значениям 95- или 5-процентного процентиля за длительное время наблюдений. Результаты анализа данных метеорологических станций выявили следующие сезонные различия в изменчивости рассмотренных температурных экстремумов в регионах. В европейской части России дни с экстремально высокой температурой наблюдаются, главным образом, в зимний и весенний периоды, а в Западной Сибири и в юго-восточных регионах — в летнее время, что является одной из причин увеличения числа пожаров. Число дней с экстремально низкой температурой растёт только в европейской части — зимой на севере и осенью в западной части. За последние годы рекордно высокие среднемесячные температуры отмечались на севере Западной Сибири, на Таймыре: 2007, 2008 и 2010 гг. — в числе самых тёплых начиная с 1936 г., а летом 2010 г. наблюдалась одна из самых крупных в мире климатических аномалий (www.meteorf.ru).

Волны жары и качество атмосферного воздуха. Метеорологические условия — один из основных факторов, определяющих уровень загрязнения атмосферного воздуха в качестве причины повышенной смертности населения и соответственно сокращения ожидаемой продолжительности жизни (ОПЖ). Так, по оценкам Европейского регионального Бюро ВОЗ, в Европе этот фактор риска привёл к сокращению ОПЖ на 8 мес, а на наиболее загрязнённых территориях — на 13 мес.

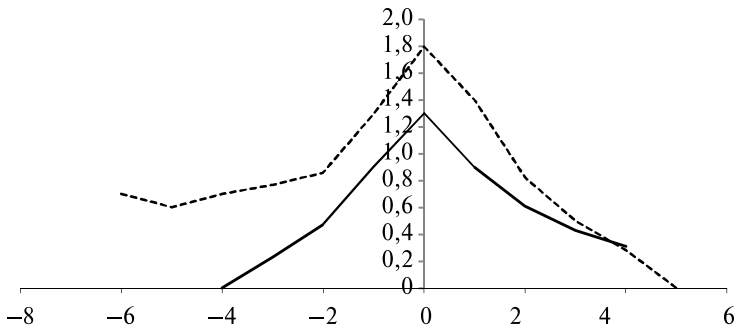


Рис. 1. Теснота связи между среднесуточной температурой и загрязнением воздуха PM10 (---) и O₃ (----) за три года: 2003, 2004 и 2005 гг. По оси X указан лаг в днях между измерением загрязнения и измерением температуры; по оси Y — коэффициенты линейной связи 24-ч PM10 и 8-ч O₃ на среднесуточную температуру воздуха, мкг/м³/°C

В России ежегодная дополнительная смертность вследствие повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха составляет около 40 тыс. чел. [Ревич и др., 2004].

Потепление климата сопровождается двумя противоположными эффектами — увеличением смертности из-за плавного повышения температур летом (точнее, лишь в те дни, когда температуры находятся выше точки минимума температурной кривой смертности) и снижением смертности из-за повышения температур во все остальные дни года (т.е. когда температуры находятся ниже точки минимума температурной кривой). Кроме того, смертность скачкообразно растёт во время тепловых волн, которые будут учащаться по мере потепления климата. Важно отметить, что оба температурных механизма («плавный» и «волновой»), хотя и связаны друг с другом, но различны с точки зрения используемых для их оценки статистических методов. Проще оценить изменение смертности с помощью «плавного» механизма, так как в отношении увеличения частоты и продолжительности температурных волн пока существует большая неопределённость.

Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе по большинству вредных веществ примерно соответствует данным показателям в других столицах мира, но концентрация PM10 (взвешенных веществ с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм) несколько выше, чем в Париже, Лондоне или Стокгольме. Среднегодовые концентрации PM10 в атмосферном воздухе за период с 2002 по 2010 г. находились в интервале от 27 до 43 мкг/м³.

Анализ данных о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе Москвы показал их увеличение в наиболее жаркие дни, т.е. краткосрочные колебания концентрации «повторяют» колебания температуры. Это следует из анализа простых регрессионных уравнений между загрязнением и температурой.

Относительная теснота связи концентраций озона и PM10 с температурой воздуха летом, взятой с различными лагами (по данным Мосэкомониторинга), показана на рис. 1. Наиболее сильная зависимость концентрации загрязнения от температуры наблюдалась при нулевом лаге, т.е. от температуры того же дня. При этом высота графиков (абсолютная величина регрес-

сионных коэффициентов) не столь важна, поскольку зависит от единиц измерения концентраций — ведь это не безразмерные величины. Важнее то, насколько быстро «спадают» кривые при увеличении временного лага. Когда кривая спадает до нуля, статистическая связь между загрязнением и температурой пропадает. Соответствующий лаг можно условно назвать «корреляционным радиусом» статистической зависимости. На рис. 1 хорошо видно, что зависимость концентрации озона от температуры падала с увеличением лага быстрее, чем PM10. Характерный корреляционный радиус зависимости для озона составляет 3...4 дня, а для PM10 — 5...6 дней. В данной работе не исследовались причины этого различия, но можно предположить, что они вызваны особенностями рассеяния озона и взвешенных веществ в атмосфере.

Отметим, что температуры соседних дней также не являются статистически независимыми переменными. Характерные периоды краткосрочного изменения температуры, например для Лондона, составляют до $\pm 8...10$ дней от «референтного» дня, т. е. характерная длина температурных волн должна быть до 16...20 дней [Keatinge, Donaldson, 2001]. Для Москвы среднесуточные летние температуры остаются статистически взаимосвязанными в течение $\pm 5...6$ дней, считая от «референтного» (рис. 2).

Особый интерес представляют данные о концентрации загрязняющих веществ в период высоких аномальных температур, так как в эти дни происходит суммация негативного влияния на здоровье населения летней жары и высоких концентраций загрязняющих веществ. К сожалению, в 2001 и 2002 гг., когда в Москве наблюдались две сильнейшие тепловые волны, система Мосэкомониторинга полностью ещё не функционировала, однако во время тепловой волны 18–24 августа 2004 г. концентрации NO_2 , O_3 и PM10 точно повторяли пик температуры, опережая температурную волну на день.

В день с максимальной температурой (25 °C 22 августа) наблюдалась максимальная концентрация O_3 , а максимальные концентрации NO_2 и PM10 были зафиксированы днём ранее, причём концентрация PM10 достигла экстремально высокого значения $\mu + 2\sigma$ (среднегодовое плюс два стандартных отклонения), так что она очень чутко отреагировала на температуру. Отсюда следует весьма важный вывод для последующей оценки результатов множественной регрессии смертности на температуру и загрязнение. При столь тесной связи между температурой и загрязнением определить степень влияния загрязнённого атмосферного воздуха на смертность на фоне тепловых волн весьма сложно.

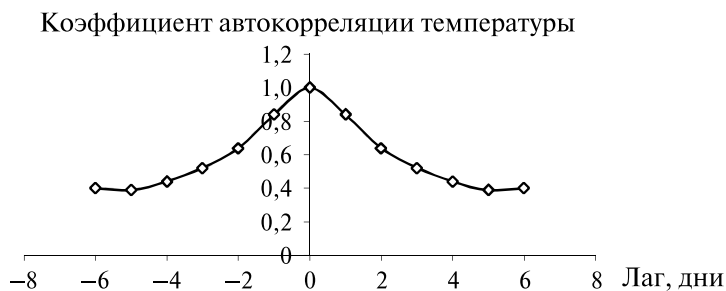


Рис. 2. Зависимость коэффициента автокорреляции среднесуточной температуры в Москве от лага (данные за три лета: 2003, 2004, 2005 гг.)

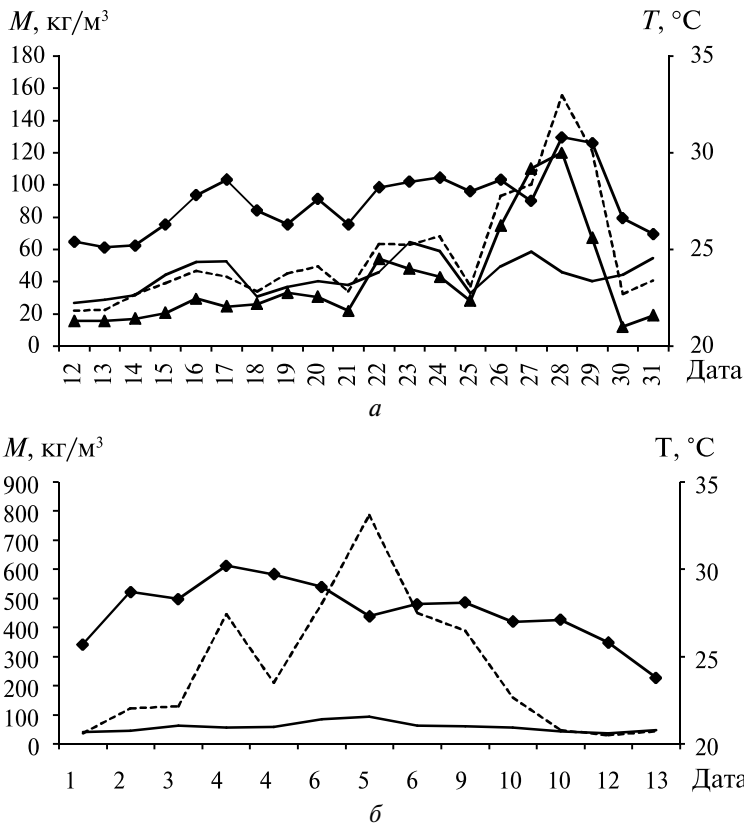


Рис. 3. Концентрации загрязняющих веществ (левая шкала) и температура воздуха (правая шкала) в июле (а) и августе (б) 2010 г. в Москве, по данным Мосэкомониторинга: \blacktriangle — $\text{PM}_{2.5}$; ---- — PM_{10} ; --- — NO_2 ; \blacklozenge — температура воздуха

В некоторых работах, однако, выделяется доминирующее влияние озона на избыточную смертность во время тепловых волн [Kusely, 2004].

Значительно более высокие концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе наблюдались в Москве во время аномальной жары 2010 г. вследствие мощных пожаров лесов и торфяников в Московском регионе и влияния антициклона, который препятствовал их рассеиванию. Наиболее высокие концентрации загрязняющих веществ были зарегистрированы в атмосферном воздухе Москвы, по данным Мосэкомониторинга, в период с 4 по 9 августа в условиях высокого атмосферного давления и температурной инверсии (рис. 3).

При среднем уровне загрязнения атмосферного воздуха в июле совпали пиковые значения концентраций PM_{10} и температуры, в августе в результате крупных пожаров содержание PM_{10} в воздухе возросло в несколько раз. Максимальные разовые концентрации монооксида углерода достигали $30 \text{ mg}/\text{m}^3$, PM_{10} — $1500 \text{ mcg}/\text{m}^3$; среднесуточные концентрации PM_{10} во время пожаров с 4 по 9 августа находились в пределах $431\text{--}906 \text{ mcg}/\text{m}^3$, превышая российскую среднесуточную ПДК ($60 \text{ mcg}/\text{m}^3$) в 7...15 раз, концентрация озона приближалась к 2ПДК. Концентрации в атмосферном воздухе

формальдегида, этилбензола, бензола, толуола, стирола и некоторых других органических веществ также были превышены (до 8ПДК) [Кузнецова и др., 2011; Air Quality..., 2010]. Высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха в этот период сформировался не только в Москве, но и в Подмоскowie. В атмосферном воздухе западной части Московской области, которая была наименее подвержена пожарам, концентрация монооксида углерода в 4 раза превысила ПДК [Гречко и др., 2010].

Для оценки влияния загрязнения атмосферного воздуха Москвы на показатели здоровья населения во время жары выбран метод оценки риска. При этом использовались данные Мосэкомониторинга, поскольку только эта организация проводит регулярные наблюдения за PM10, — именно эти мелкодисперсные частицы представляют особую опасность для здоровья населения. Дополнительная смертность, связанная с воздействием загрязнённого атмосферного воздуха, преимущественно обусловлена влиянием взвешенных частиц. Согласно исследованиям известного специалиста по пылевой патологии академика РАМН Б. Т. Величковского, в присутствии пылевых частиц резко повышается уровень потребления клеткой кислорода, т.е. происходит так называемый «дыхательный взрыв», причём этот весь дополнительно поглощённый кислород не используется ни на энергетические, ни на пластические потребности клетки. Мелкодисперсные твёрдые частицы, попадая в организм человека, вызывают образование избыточных количеств свободных радикалов, обладающих высокой химической активностью, которые в свою очередь вызывают асептическое воспаление органов дыхания. Такие воспаления приводят к развитию хронических заболеваний органов дыхания, особенно у детей [Величковский, 2002].

По данным, приведённым в Руководстве ВОЗ по оценке качества атмосферного воздуха [Air Quality..., 2006, р. 484], кратковременное воздействие PM10 увеличивает суточную смертность на 0,46...0,62 % при приросте на каждые 10 мкг/м³ среднесуточных концентраций этого загрязнителя. Возрастание суточной смертности примерно на 0,5 % на каждые 10 мкг/м³ PM10 в наибольшей степени характерно для городов развитых и развивающихся стран. Исходя из этих данных, эксперты ВОЗ пришли к выводу, что при кратковременном воздействии суточных концентраций PM10 на уровне 150 мкг/м³ ожидаемое возрастание случаев суточной смерти будет составлять 5 %, а на уровне 100 мкг/м³ — 2,5 %.

На основании этой информации и с учётом предоставленных Мосэкомониторингом данных было рассчитано, что ожидаемая дополнительная суточная смертность в Москве из-за загрязнения атмосферного воздуха в период аномальной жары 2010 г. составила 15...20 %, риски увеличения частоты симптомов со стороны органов дыхания — 30 % и обострения бронхиальной астмы — 45 % по отношению к фоновым уровням.

Что касается зимнего периода, то анализ данных за 2003–2005 гг. показал: концентрация взвешенных веществ в воздухе увеличивалась по мере снижения температуры. Наиболее сильная зависимость наблюдалась от температуры предыдущего дня (t -тест для коэффициента линейной регрессии $t=7,1$). Связь между температурой и концентрацией PM10 носит длительный характер — 6 дней и более, что объясняется худшими условиями рассеивания в зимнее время. Концентрация озона, наоборот, увеличивалась с повышением температуры в зимний период.

Оценка влияния загрязнения воздуха твёрдыми частицами и озоном на смертность в Москве. Общепринятым методом получения статистического доказательства зависимости смертности от загрязнения воздуха является ретроспективный анализ временных рядов суточной смертности и вычисление регрессионных коэффициентов между суточными мерами загрязнения воздуха и суточной смертностью. Такое исследование было предпринято нами в Москве [Revich, Shaposhnikov, 2010] на основе анализа данных за 2003–2005 гг. о суточной смертности от всех естественных причин, а также от таких «климатозависимых причин» как ишемическая болезнь сердца (ИБС, коды по Международной классификации болезней 10-го пересмотра I20–I25) и цереброваскулярные заболевания, в основном это инсульты (коды I60–I69). Кроме того, отдельно изучалась смертность населения всех возрастных групп и возрастной группы 75+. Таким образом, всего было изучено шесть показателей смертности.

Зависимость смертности от загрязнения изучалась с помощью пуассоновской регрессионной модели:

$$\log E(M_t) = \beta PM10_t + \gamma O_{3t} + S_t(Temp, 6) + Y_t(M, DF),$$

где $E(M_t)$ — ожидаемое число смертей в день t ; $PM10_t$ и O_{3t} — среднесуточные концентрации $PM10$ и озона, усреднённые по данным станций мониторинга в Москве в день t ; $S_t(Temp, 6)$ — множитель, введённый в модель для учёта поправки на зависимость смертности от температуры воздуха в день смерти, он моделировался кубическим сплайном — интерполяцией температуры с шестью степенями свободы; $Y_t(M, DF)$ — множитель, введённый в модель для учёта поправки на все медленные колебания смертности: сезонные, многолетние, зимние эпидемии и др., характерный временной период которых больше упомянутого выше корреляционного радиуса зависимости загрязнения от температуры $\pm(6...8)$ дней, т.е. примерно две недели. Этот множитель аппроксимировался непараметрической сглаживающей функцией ежедневной смертности M с числом степеней свободы $DF=182$ (т.е. зависящей от значений ежедневной смертности за предыдущие полгода).

Таблица 1. Относительное повышение уровня смертности при увеличении концентрации $PM10$ и O_3 на 10 мкг/м^3 [Revich, Shaposhnikov, 2010]

Причина смерти	Возрастная группа	Относительное повышение уровня смертности, % (95 % ДИ) и p -тест (уровень значимости)	
		на $10 \text{ мкг/м}^3 PM10$	на $10 \text{ мкг/м}^3 O_3$
Все естественные причины	Все возрасты	0,33 (0,09; 0,57) $p=0,006$	1,09 (0,71; 1,47) $p<0,001$
	75+	0,55 (0,21; 0,89) $p=0,002$	1,24 (0,68; 1,80) $p<0,001$
Ишемическая болезнь сердца	Все возрасты	0,66 (0,30; 1,02) $p<0,001$	1,61 (1,01; 2,21) $p<0,001$
	75+	0,81 (0,31; 1,31) $p=0,001$	1,88 (1,08; 2,68) $p<0,001$
Цереброваскулярные заболевания	Все возрасты	0,48 (0,02; 0,94) $p=0,035$	1,28 (0,54; 2,02) $p=0,001$
	75+	0,72 (0,14; 1,30) $p=0,014$	1,25 (0,31; 2,19) $p=0,008$

Результаты регрессионного анализа модели, линейной по концентрациям $PM10$ и O_3 , приведены в табл. 1. Регрессионные коэффициенты показывают

относительное повышение уровня смертности, соответствующее приросту концентрации загрязняющего вещества на каждые 10 мкг/м³ в среднем для всего диапазона концентраций, наблюдавшихся в Москве в течение периода исследования.

Наиболее сильная зависимость смертности от уровня загрязнения PM10 была получена при нулевом лаге, т.е. от концентрации в день смерти, а от уровня загрязнения O₃ при кумулятивном лаге 0-1, т.е. от концентраций, усреднённых за день смерти и предшествующий день. Как показывают данные табл. 1, для всех изученных показателей смертности были получены статистически достоверные риски воздействия как PM10, так и озона. В возрастной группе 75+ риски всегда оказывались выше, чем в группе «все возрасты», что указывает на повышенную чувствительность пожилых людей к загрязнению воздуха. Учитывая долю пожилых людей во всём населении (точнее, «вклад» этой возрастной группы в общую смертность населения), можно утверждать, что повышение уровня общей смертности, вызванной загрязнением, почти целиком объясняется приростом смертности среди пожилых людей. Дополнительная смертность связана в основном с увеличением смертности от заболеваний сердечно-сосудистой системы, обусловленной преимущественно воздействием PM10.

В Москве было также прослежено сочетательное действие двух загрязнителей (суммы взвешенных частиц и озона) на смертность, т.е. были установлены пределы применимости линейной по PM10 и O₃ статистической модели смертности. Для этого вычислили риски PM10 отдельно для выборки дней, в которые концентрация озона превышала 90-процентный перцентиль распределения среднесуточных концентраций озона за весь период исследования (уже в рамках одномерной по загрязнению модели, в которой смертность зависит только от PM10). Эти «скорректированные на высокий уровень озона» риски PM10 сравнили с исходными, вычисленными для всех дней периода исследования в рамках одномерной регрессионной модели. Разница оказалась весьма значительной.

Это свидетельствует о том, что линейную (по концентрациям) модель зависимости смертности от загрязнения нельзя применять при высоких концентрациях озона. Было получено статистическое доказательство того, что высокие уровни озона модифицируют риск PM10. При этом вычисленная по московским данным величина модификации оказалась очень значительной. Например, если проверять нулевую гипотезу о том, что шесть отношений рисков $\beta_{adj}/\beta_{crude}$ взяты случайным образом из нормально распределённой исходной совокупности со средним значением, равным единице (т.е. гипотезу об отсутствии взаимодействия между PM10 и озоном), то её придётся отвергнуть на очень высоком уровне значимости — двусторонний *t*-тест даёт уровень значимости $p=0,003$. Было показано, что в присутствии высоких уровней озона риски PM10 возрастают примерно в три раза. Обратное утверждение доказать не удалось — в присутствии высоких уровней PM10 риски озона не увеличивались.

Волны жары и холода как факторы риска увеличения смертности населения. Понятие волн жары и холода определяется индивидуально не только для каждой климатической зоны, но и для отдельных городов и особенно мегаполисов. Города с разной возрастной структурой и социально-экономическим

положением населения, возможно, имеют разные температурные пороги, даже если находятся в одном и том же климате. Эта гипотеза в настоящее время проверяется на основе анализа смертности городского населения различных европейских и африканских средиземноморских стран. С позиций здоровья большое значение имеет тот температурный порог, выше (жара) или ниже (холод) которого увеличиваются показатели смертности или наблюдаются какие-либо другие изменения здоровья репрезентативных групп населения.

Данные более 50 европейских исследований смертности населения в периоды летней жары показали, что она наиболее высока среди лиц пожилого возраста, особенно с хроническими заболеваниями сердечно-сосудистой системы, органов дыхания, диабетом, лиц с ограниченной подвижностью, в том числе лежачих больных, одиноких людей. Так, во Франции летом 2003 г., признанном самым жарким в Европе за последние 500 лет, уровень общей смертности был на 60 % выше, чем в аналогичный период в 2000–2002 гг. В отдельные дни число дополнительных случаев смерти достигало 2200. В 70 % случаев умирали люди старше 75 лет. После этого инцидента Министерство здравоохранения Франции разработало специальный план действий по оценке и профилактике острого воздействия погодных явлений на здоровье человека.

Климатические модели предсказывают, что в результате потепления климата будет увеличиваться вероятность наблюдения как отдельных дней с аномально высокими температурами, так и волн жары — нескольких последовательных аномально жарких дней. В XXI в. на территориях суши с большой степенью вероятности прогнозируется увеличение числа дней с высоким «индексом жары» (который характеризует сочетательное действие на организм человека температуры и влажности в жаркие дни) [Периоды..., 2005].

Волны жары и холода и смертность в Москве. Исследования временных рядов суточной смертности или заболеваемости весьма эффективны как для анализа плавных зависимостей между температурой воздуха и показателями здоровья в течение длительного времени, так и для анализа коротких (дискретных) погодных эпизодов — таких как волны жары или холода. Этот метод был использован для оценки влияния этих волн на показатели смертности населения Москвы и четырёх северных городов — Мурманска, Архангельска, Якутска и Магадана.

Первые исследования влияния температуры воздуха на смертность населения Москвы проведены нами с использованием метода временных рядов по данным ежедневной смертности и температуры воздуха за 2000–2006 гг. [Ревич, 2003; Ревич и др., 2008]. Изучались температурные зависимости смертности, которые можно определить в диапазоне как годовых температур, так и температурных волн. Результаты исследования плавных температурных зависимостей смертности методом временных рядов приведены в [Ревич, 2003]. Так, температурная кривая смертности аппроксимировалась *V*-образной функцией с двумя линейными участками, соответственно ниже и выше точки минимума температурной кривой. Такая аппроксимация позволяет вычислить коэффициенты линейной регрессии, которые имеют очень простую интерпретацию: коэффициент для холодных температур имеет смысл относительного увеличения смертности в среднем на каждый гра-

дус снижения температуры ниже точки оптимума (+18 °С для Москвы), соответственно коэффициент для жарких температур интерпретируется как относительное увеличение смертности в среднем на каждый градус повышения температуры выше точки оптимума. Приведённые в табл. 1 коэффициенты справедливы в среднем для каждого температурного диапазона, потому что в общем случае изучаемая зависимость нелинейная.

Для характеристики относительной силы корреляционной связи все рис-ки были приведены с соответствующими 95%-ми доверительными интервалами (ДИ). Для всех изученных причин смерти (кроме хронических болезней нижних дыхательных путей у лиц в возрастной группе 75+) установлена связь между температурой и смертностью.

Сравнение показателей смертности в разных возрастных группах жителей Москвы показало, что для всех причин смерти угол наклона регрессионной прямой для возрастной группы 75+ круче, чем для группы «все возраста», т.е. пожилые люди сильнее реагируют на колебания температуры. Эти расчёты особенно важны для России, поскольку ожидается, что в ближайшие 20...30 лет население России будет постепенно стареть; доля лиц старше трудоспособного возраста увеличится до 28,5 % в 2030 г. [Демографический..., 2010], а к 2050 г. может достигнуть 36 % [Население..., 2006].

Влияние тепловых и холодных волн на смертность изучалось методом анализа независимых выборок из временных рядов суточной смертности. На основе анализа многолетних распределений среднесуточных температур в столице были даны формальные определения температурных волн в Москве. В частности, тепловая волна должна состоять из пяти или более последовательных дней со среднесуточной температурой выше +22,7 °С, аналогично холодная волна — как минимум из девяти последовательных дней со среднесуточной температурой ниже -14,4 °С. За указанный период времени исключительно жаркими в Москве были июль 2001 г. и июль 2002 г. В июле 2001 г. столица пережила волну жары, во время которой среднесуточные температуры превышали порог в 25 °С в течение девяти последовательных дней (при средней многолетней «норме» три дня в год). В максимуме этой волны суточная смертность превысила среднее многолетнее значение (математическое ожидание) смертности для июля на 93 %. Однако количественной мерой воздействия тепловых и холодных волн на смертность служит не пиковая, а кумулятивная, т.е. усреднённая за период волны (с учётом лага между протеканием температуры и смертностью) избыточная смертность, которая может быть определена для каждой причины и возрастной группы по отношению к соответствующему ожидаемому среднему многолетнему значению за данный календарный период. Волна 2001 г. привела к чётко выраженному и статистически значимому увеличению уровня смертности во всех возрастных группах по всем рассмотренным причинам смерти. Абсолютная дополнительная смертность во время указанной тепловой волны составила 1177 случаев. Вторая тепловая волна 2002 г. была не столь продолжительной. Суммарная дополнительная смертность составила 283 случая, что в 4 раза меньше, чем во время более продолжительной тепловой волны 2001 г.

Эффект аномальных метеорологических условий другого типа — холодной волны — наглядно демонстрирует ситуация января — февраля 2006 г. В Москве в это время аномально низкие температуры наблюдались в течение 26 дней. Такие холода в Москве по законам вероятности не должны возникать

чаще, чем примерно раз в 10 лет. Поскольку эта волна холода состояла из двух эпизодов, разделённых краткосрочным потеплением, её эффект оказался статистически значим только для пожилых людей, поэтому в табл. 4 приведены результаты расчётов смертности только для этой возрастной группы.

В Москве было оценено изменение уровня смертности, обусловленное потеплением между «базовым» периодом 1980–1999 г. и периодом 2000–2005 г., в сумме за шесть лет исследуемого периода. Согласно нашим расчётам, снижение смертности в результате потепления климата в зимний период времени в Москве с 2000 по 2005 г. составило примерно 590 смертей в год, но за этот же период в результате увеличения среднемесячных температур летом дополнительное количество смертей составило 420 случаев. Таким образом, в сумме положительное и отрицательное воздействия потепления климата на смертность почти компенсируют друг друга: результирующая дополнительная смертность $\Delta M = 420 - 590 = -170,95\%$; доверительный интервал для ΔM составил $(-291; -49)$ смертей в год. Суммарное увеличение уровня смертности оказалось отрицательным, т.е. потепление климата в итоге ненамного снижает смертность. Однако следует иметь в виду, что результирующий эффект довольно мал и практически сравним с погрешностью самих вычислений, поэтому вывод о благоприятном воздействии потепления на здоровье был бы преждевременным.

Проведённые в период с 2006 по 2009 г. работы имели большое значение для дальнейших исследований. Новые данные о возрастании климатозависимой смертности были получены в 2010 г. В Москве протяжённость волны жары, когда среднесуточная температура более чем на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышала среднесезонную среднемесячную, в июле – августе 2010 г. составила 45 дней, из них 37 — с температурами выше $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Число температурных рекордов, т.е. дней с максимальной температурой для данной календарной даты за всё время регулярных метеорологических наблюдений с 1885 г., достигло в июле 10 дней, в августе — 9. Новый абсолютный максимум температуры $+38,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ был зафиксирован 28 июля 2010 г.

Антициклон в Московском регионе препятствовал рассеиванию загрязняющих веществ в атмосферном воздухе Москвы, и они из Подмоскovie перенеслись в столицу. В Москве длительная и непрерывная жара явилась значительным фактором риска для здоровья населения, так как при прерывистых волнах негативное влияние жары менее выражено. Во время жары 2010 г. смертность возросла на 11 тыс. случаев по сравнению с июлем – августом 2009 г., причём в августе во время пожаров произошёл более резкий её рост от заболеваний органов дыхания (табл. 2), значительный рост от инфекционных и паразитарных заболеваний (на $61,5\%$ по сравнению с июлем – августом 2009 г.), новообразований (на $70,2\%$), от внешних причин (в июле на $52,9\%$). Из внешних причин в наибольшей степени возросла смертность от суицидов — в июле на 63 случая, или $101,6\%$, и в августе на 38 случаев, или $52,1\%$. Об увеличении числа случаев суицидов во время жары сообщают и другие авторы [Najat Page, Kovats, 2007; Kim et al., 2010; Likhvar et al., 2011].

В сентябре 2010 г. общий уровень смертности населения Москвы был уже на уровне показателей сентября 2009 г., в октябре стал ниже уровня октября 2009 г. на $17,5\%$, в ноябре и декабре — на 14% , т.е. эффект «жатвы» длился почти всё время после августа до конца года (рис. 4). Следует также отметить увеличение смертности от заболеваний органов дыхания в октябре 2010 г.

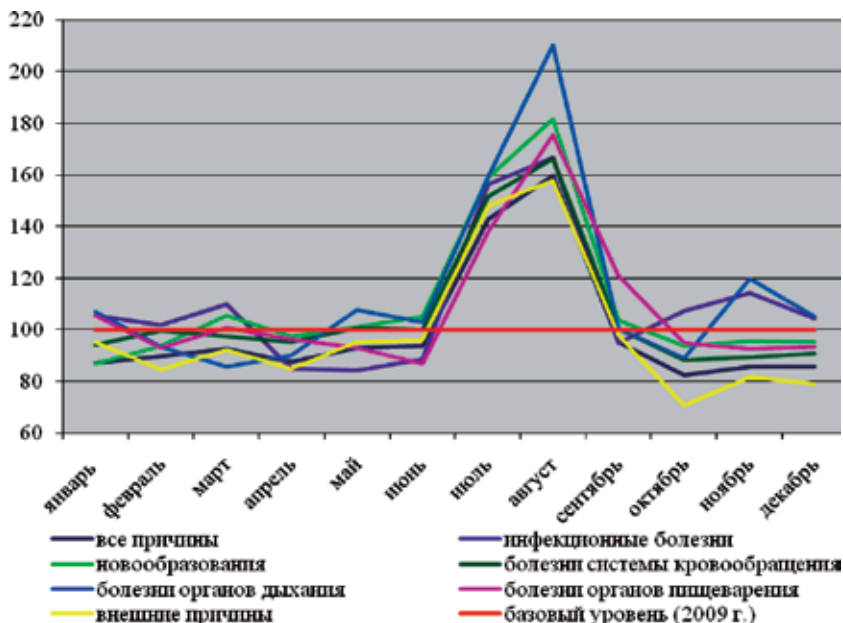


Рис. 4. Показатели смертности населения Москвы по месяцам 2010 г. по сравнению с соответствующими периодами 2009 г., %

Таблица 2. Волна жары и смертность в Москве в 2010 г. [Ревич, 2011]

Показатель	Июль	Август	Всего
Число дней с температурой выше многолетней среднемесячной на 5 °С (в июле — выше 23,4 °С, в августе — выше 21,4 °С)	27	18	45
Дополнительная смертность в 2010 г. по сравнению с 2009 г., абсолютное число (прирост, %)	+4824 (50,7)	+6111 (68,6)	+10 935 (59,6)
В том числе (прирост, %):			
болезни системы кровообращения	51,5	66,1	58,8
болезни органов дыхания,	59,1	110,1	84,5
инфекционные болезни	56,3	66,7	61,5
новообразования	58,8	81,6	70,2
внешние причины	48,0	57,8	52,9

Оценка влияния волн жары и холода на смертность населения северных городов. Для России характерен северо-восточный вектор нарастания уровня смертности, что было показано В. М. Школьниковым более 30 лет назад. За последние годы эта тенденция не изменилась: среди регионов с наиболее высокой смертностью лидируют многие северные территории. На севере Западной Сибири температура опускается до $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$, в Восточной Сибири — до $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$. В январе 2003 г. на Дальнем Востоке температура достигала $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$. В большинстве населённых пунктов в условиях столь холодного климата важное социальное значение имеет стабильность работы систем теплоснабжения. Холодóвый дискомфорт — это сложный комплекс физиологических вызываемых температурным переохлаждением реакций, которые создают эффект «холодóвого напряжения». С продвижением на Север осложняется течение

респираторных заболеваний, в том числе частота и тяжесть приступов бронхиальной астмы. Распространённость заболеваний органов дыхания среди детей в северных регионах страны выше средних показателей по России в 1,5...2 раза. Для населения северных территорий характерен эффект северной пневмонии, возникающей в результате развития «синдрома первичной северной артериальной гипертензии малого круга кровообращения» [Куликов, 1986]. Даже в тех странах, где в большинстве жилищ комфортный микроклимат (т.е. имеется отопление, кондиционирование, вентиляция), максимум заболеваемости и смертности всё равно приходится на зимний период. Заметим, что в Германии наибольшее количество инфарктов также происходит в декабре – январе, в Великобритании пик смертности в середине зимы превышает этот показатель в июне примерно на 30 % [Исаев, 2003].

Важно понять, как на фоне регулярных (квазипериодических) сезонных изменений смертности проявляется действие волн жары и холода. Для решения этой задачи было проведено исследование с использованием метода временных рядов ежедневных показателей смертности и температуры по четырём северным городам за девятилетний период (1999–2007)*. Перечислим их в направлении запад – восток и приведём численность населения на конец периода исследования (2007): Мурманск (318 тыс.), Архангельск (355 тыс.), Якутск (246 тыс.), Магадан (100 тыс.). По Архангельску и Якутску результаты исследования частично опубликованы в работах [Варакина и др., 2011; Revich, Shaposhnikov, 2010]. Анализ проводился отдельно для холодных и тепловых волн, что оправданно с точки зрения различия физиологического воздействия механизмов жары и холода (табл. 3).

Таблица 3. Волны жары и холода в четырёх северных городах (1999–2007)

Город, температурные волны (их число n и средняя длина N)	Волны жары			Волны холода		
	короткие	длинные	всего	короткие	длинные	всего
<i>Архангельск</i>						
n	5	4	9	4	3	7
N	6	10	8	6	13	10
<i>Мурманск</i>						
n	4	3	7	7	2	9
N	5	9	7	5	9	6
<i>Якутск</i>						
n	4	4	8	2	3	5
N	5	11	8	6	11	9
<i>Магадан</i>						
n	3	2	5	5	3	8
N	6	10	7	5	9	7

Кроме того, отдельно изучались выборки «коротких» волн (длительностью от 5 до 7 дней) и «длинных» волн (длительностью от 8 дней и более) и всех волн — т.е. объединённая выборка длинных и коротких волн.

Мета-анализ проведён по двум направлениям: поиск сходств и различий. Поиск сходств основан на предположении, что для каждого изучаемого показателя смертности (показатель сочетает «климатозависимую» причину смерти

* Анализ этих данных занял достаточно много времени и был завершён в 2011 г.

и возрастную группу) четыре оценки риска, полученные в указанных городах, есть по существу четыре выборочные оценки одной и той же величины, которая является средней оценкой риска для северных городов. Поэтому для вычисления дисперсии совокупной оценки применена теорема о дисперсии суммы случайных величин. Таким образом, всего по четырём городам в мета-анализ включено 29 холодных волн (18 коротких и 11 длинных) и 29 тепловых (16 коротких и 13 длинных), в результате были получены совокупные оценки риска.

Из анализа совокупной дисперсии следует несколько выводов.

1. Поскольку при слиянии выборок длинных и коротких волн статистическая мощность совокупной выборки повышается, то выборка «всех волн» дала больше (или, по крайней мере, столько же) статистически значимых эффектов, а для каждого показателя в отдельности точность оценки риска повысилась (доверительный интервал стал уже).

2. В северных городах волны холода оказывают более сильное влияние на уровень смертности населения, чем волны жары. Это проявилось в том, что общее для десяти включённых в исследование показателей число полученных статистически достоверных рисков было больше для холода, чем для жары. Так, для выборки всех холодных волн было получено пять достоверных рисков, а для выборки всех тепловых волн — всего два: для показателей «цереброваскулярные болезни в возрасте ≥ 65 » и «внешние причины смерти в возрасте 30...64 лет». Для первого из этих двух показателей можно непосредственно сравнить риски холодных и тепловых волн: они оказываются почти одинаковыми по величине, однако точность оценки риска холодных волн несколько выше: $RR_{\text{хол}} = 1,42 \pm 0,07$ и $RR_{\text{теп}} = 1,44 \pm 0,17$ соответственно.

3. Длинные волны холода сильнее влияют на уровень смертности, чем короткие. Объединённая оценка риска дала четыре достоверных эффекта длинных холодных волн и всего два — коротких. В обоих случаях оказалось выше абсолютное значение риска длинных волн, причём в одном из них (для причины смерти «все естественные причины в возрасте ≥ 65 ») разность между рисками статистически достоверна на 95-процентном уровне: $RR_{\text{дл}} = 1,25 \pm 0,05$ и $RR_{\text{кор}} = 1,10 \pm 0,05$ соответственно, т. е. получено прямое доказательство более сильного влияния длинных волн: разность рисков составила $\Delta RR = 0,15 \pm 0,07$.

4. В отношении волн жары можно сделать противоположный вывод: короткие волны жары оказывают более сильное влияние, чем длинные. Причём этот вывод следует из сравнения как числа полученных эффектов, так и их абсолютных величин. Так, для длинных волн была получена всего одна достоверная совокупная оценка риска (из десяти возможных): для показателя «внешние причины в возрасте 30...64 лет». Для коротких — две: для показателей «цереброваскулярные болезни в возрасте ≥ 65 » и «внешние причины в возрасте 30...64 лет», причём для последнего показателя величина риска коротких волн оказалась выше: $RR_{\text{дл}} = 1,26 \pm 0,11$ и $RR_{\text{кор}} = 1,39 \pm 1,40$. Возможное объяснение этому — эффект «жатвы» во время длинных тепловых волн, когда большое число дополнительных смертей оказывается приближённым на срок, меньший, чем сама продолжительность волны. В результате этого избыточная смертность в конце длинной волны компенсируется эффектом «жатвы» — краткосрочным смещением смертности в начале волны.

5. От воздействия волн холода в наибольшей степени страдают лица пожилого возраста. Мета-анализ позволил рассчитать, на сколько процентов риск смертности от инфарктов и от всех естественных причин для пожилых людей оказался выше, чем для работоспособной возрастной группы. Так, для инфарктов отношение рисков $RR_{\geq 65}/RR_{30...64} = 1,10$, т.е. относительное увеличение уровня смертности во время холодных волн для пожилых людей на 10 % выше, чем та же величина для работоспособной возрастной группы. Для смертности от всех естественных причин получена сходная оценка: увеличение уровня смертности среди пожилых людей оказалось на 9 % больше, чем среди работоспособной возрастной группы. Отметим, что для волн жары такие оценки получить не удалось, поскольку не было установлено ни одной достоверной пары рисков для прямого сравнения.

6. Существует и другой подход к анализу возрастных различий, основанный на анализе качественных признаков. В данном случае введён такой качественный признак: наличие либо отсутствие эффекта действия холодных волн. Эффектом является достоверное увеличение уровня смертности для каждого показателя в каждом городе, отдельно для выборок длинных и коротких волн (эти выборки не пересекаются, так что все эффекты можно рассматривать как независимые испытания Бернулли). В результате тестирования нулевых гипотез об отсутствии дополнительной смертности во время холодных волн для возрастной группы 30...64 лет нулевая гипотеза была отвергнута всего в 4 случаях, а для возрастной группы ≥ 65 — в 11 случаях. Всего число тестов для каждой возрастной группы равно 40 (4 города \times 5 причин смерти \times 2 выборки). Нулевая гипотеза об отсутствии возрастных различий в данном случае утверждает, что ожидаемое число достоверных приростов не должно зависеть от возраста, а только от чувствительности применённого критерия, т.е. должно распределиться поровну и быть равным $15/2 = 7,5$, поскольку число исследованных причин смертности в обеих возрастных группах было одинаково.

Для проверки сформулированной выше гипотезы об отсутствии возрастных различий, так как все ожидаемые числа > 5 , вычислен критерий $\chi^2 = \sum (O - E)^2 / E$, который даёт $\chi^2 = 4,02$. Это значение превышает $\chi_c^2 = 3,84$ для 95-процентного уровня значимости и одной степени свободы, так что в данном случае нулевую гипотезу об отсутствии возрастных различий также можно отвергнуть. (Отметим, что вычисление критерия χ^2 с поправкой Йейтса на непрерывность $\chi^2 = \sum (|O - E| - 1/2)^2 / E$ даёт $\chi^2 = 2,95$, т.е. «не дотягивает» до критической величины для уровня значимости 0,05, когда $\chi_c^2 = 3,84$, хотя и превышает 2,71 — критическую для уровня значимости 0,10.) Преимущество этого доказательства возрастных различий перед приведённым в п. 4 состоит в том, что в данном случае использована вся информация, полученная при изучении всех причин смертности и всех холодных волн в указанных городах.

7. Для волн жары аналогичное рассуждение показывает, что количество достоверных приростов в возрастной группе 30...64 лет, наоборот, больше, чем в возрастной группе ≥ 65 (пять против двух). Однако в данном случае количество достоверных приростов слишком мало, чтобы применять критерий χ^2 (ожидаемые числа меньше 5), а применение точного критерия

Фишера не позволяет отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии возрастных различий.

Сравнение величин рисков смертности от отдельных причин при воздействии холодных и тепловых волн. Результаты исследования, проведённого в четырёх северных городах, позволяют сравнить риски смертности от ИБС и цереброваскулярных заболеваний. Всего для прямого сравнения доступны две пары статистически достоверных рисков, усреднённых для указанных четырёх городов (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение относительных рисков смертности от ИБС и цереброваскулярных заболеваний в возрасте ≥ 65 во время волн холода в Архангельске, Мурманске, Магадане и Якутске

Волны холода	Причина смерти			<i>t</i> -тест для разности рисков инсультов и инфарктов
	ИБС	цереброваскулярные заболевания	все естественные причины	
Длинные холодные волны	1,40±0,09	1,41±0,11	1,25±0,05	0,07
Все холодные волны	1,28±0,06	1,42±0,07	1,16±0,03	1,52

Как следует из табл. 4, в обоих случаях риск инсультов оказывается выше, однако разность между рисками инсультов и инфарктов статистически недостоверна. Так, для всех холодных волн $RR_{\text{цереб}} - RR_{\text{ИБС}} = 0,14$ [95 % CI $-0,04$; $0,32$]. Увеличение уровня всей естественной смертности меньше увеличение уровня смертности от инфарктов и инсультов.

Население указанных городов характеризуется почти одинаковым «вкладом» ИБС и цереброваскулярных заболеваний в смертность от всех естественных причин в возрастной группе ≥ 65 : соответственно 30 и 31 %. Если бы эти сердечно-сосудистые заболевания обуславливали всё увеличение смертности от всех естественных причин, то для длинных холодных волн увеличение всей естественной смертности было бы равно $0,40 \times 0,30 + 0,41 \times 0,31 = 0,25$, а для всех холодных волн $0,28 \times 0,30 + 0,42 \times 0,31 = 0,22$.

Риски смертности от внешних причин, полученные в данном исследовании, оказались сравнимы с рисками инсультов: для коротких тепловых волн $RR_{\text{внеш}} = 1,39 \pm 0,14$ и $RR_{\text{ИБС}} = 1,44 \pm 0,17$, а для всех тепловых волн $RR_{\text{внеш}} = 1,34 \pm 0,09$ и $RR_{\text{ИБС}} = 1,35 \pm 0,11$. **Важным результатом следует признать** и то, что дополнительная смертность от внешних причин во время холодных волн была статистически значима только в одном городе — Архангельске, поэтому совокупная оценка риска оказалась недостоверной.

Влияние численности населения на достоверность оценки риска. Определена минимальная численность населения, для которой можно установить достоверные эффекты температурных волн. Статистическая чувствительность применённого в данном исследовании критерия равна

$$RR_c = 1 + t_c \frac{RSD}{\sqrt{n(w-1)}},$$

где RR_c — минимальная величина риска, который может быть статистически значимым; $t_c = 1,96$ — критическое значение двустороннего теста Стьюдента с уровнем значимости $p = 0,05$ и числом степеней свободы $DF = \infty$; RSD — относительная стандартная ошибка ежедневной смертности в данном городе; n — число волн, включённых в тестовую выборку; w — средняя длина волны в днях. В данном случае RSD , которая служит мерой вариабельности ежедневной смертности, быстро увеличивается по мере снижения численности популяции, соответственно растёт «пороговое» значение риска, ниже которого прирост смертности не может быть признан статистически значимым. Поэтому при численности населения ниже определённого порога вероятность обнаружения статистически значимого увеличения уровня смертности равна нулю. Этот вывод подтверждается результатами анализа влияния численности населения на количество достоверных оценок риска длинных холодных волн. Число обнаруженных статистически значимых эффектов составило: в Архангельске — 6, Мурманске — 2, Якутске — 2 и Магадане — 1 (из 10 возможных по каждому городу). Целесообразно рассматривать именно длинные холодные волны, так как выше было показано, что они более сильно влияют на смертность, чем короткие волны. Общее число достоверных эффектов волн жары оказалось слишком мало, чтобы установить зависимость от численности населения. Таким образом, результаты мета-анализа подтверждают, что чувствительность применённого критерия очень зависит от численности населения города. Численность населения Магадана (100 тыс.) близка к минимальной, ниже которой применённый в данной работе статистический метод уже не может дать значимых результатов.

Планы и меры по защите здоровья населения от воздействия температурных волн и прогнозы изменения уровней смертности в связи с глобальным потеплением. После осознания трагических последствий жары в Европе в 2003 г. Европейской комиссией был инициирован проект «Изменение климата и стратегии адаптации для здоровья человека» (проект cCASHh), поставивший задачи: оценить риски для здоровья населения, обусловленные неблагоприятными последствиями изменения климата; выявить меры, технологии и направления политики, которые являются наиболее эффективными и подходящими для успешной адаптации европейского населения к изменению климата; оценить пользу, которую могут принести конкретные стратегии адаптации уязвимых категорий населения при различных сценариях изменения климата; оценить затраты (на ликвидацию ущерба, связанного с изменением климата, и на осуществление мер по адаптации) и выгоды (как от изменения климата, так и от стратегий адаптации), в том числе дополнительные выгоды, не зависящие от изменения климата.

В европейских странах создаётся единая информационная база, включающая данные по метеорологии (средняя температура воздуха за каждые три часа, влажность, скорость ветра, направление ветра, высота над уровнем моря, площадь снегового покрова, уровень солнечной радиации, загрязнение атмосферного воздуха «классическими веществами»), данные о смертности и рассчитанные потерянные годы жизни. Для европейских городов определён температурный порог, выше которого начинает расти смертность населения. Для Хельсинки он равен $+23,6$ °С, для средиземноморских городов он, естественно, намного выше и в среднем составляет $+28$ °С. Предварительные

результаты, полученные в рамках этого проекта, свидетельствуют о том, что увеличение температуры на 1 °C выше определённого порога приводит к увеличению смертности населения на 1,8...3,0 % (без учёта внешних причин). Это совпадает с нашими данными по Твери и Москве [Ревич и др., 2005, 2008]. В ходе проекта cCASHh обсуждалась необходимость использования и других метеорологических показателей — максимальной и минимальной суточной температуры, перепадов температуры в течение дня.

Для каждого климатического сценария можно выполнить оценочный прогноз дополнительной смертности, зная температурную зависимость смертности и прогнозируемую динамику численности населения. Так, по одному из сценариев к 2080 г. в Лондоне дополнительная смертность людей в возрасте 75+ может достигнуть 9 тыс. в год, причём большая часть случаев смерти будет связана с низкими температурами. Однако другие исследователи считают, что в зоне умеренного климата негативное влияние холодных волн уменьшится, а увеличение связанной с жарой смертности превысит снижение обусловленной холодом смертности, особенно в странах с низким уровнем доходов и ограниченным адаптационным потенциалом [Wilkinson et al., 2007].

Региональные климатические модели были применены в Канаде и США для прогнозирования изменений уровней смертности, ожидаемых в связи с изменением температурного режима. В трёх городах канадской провинции Квебек исследовали изменения сезонной и годовой смертности. Из-за потепления климата к 2020 г. прогнозируется увеличение летней смертности на 2 %, а среднегодовой — на 0,5 %. К 2080 г. прогнозируется увеличение летней смертности на 10 %, а среднегодовой — на 3 % [Doyon et al., 2008]. Аналогичные оценки были получены в Нью-Йорке, но авторы американского исследования рассчитали не прирост сезонной смертности, а только прирост дополнительной смертности, обусловленной жарой в летние месяцы. Они прогнозируют, что к 2050 г. обусловленная стрессом из-за жаркой погоды смертность возрастёт на 47...95 % по сравнению с уровнем 1990-х гг., в зависимости от сценария выбросов парниковых газов и предположений об акклиматизации населения к зною [Knowlton et al., 2007]. Как считают авторы этого исследования, за счёт акклиматизации населения к жаре можно снизить ожидаемый относительный прирост дополнительной смертности примерно на 25 %.

Подобная оценка была получена нами в Архангельске на основе данных об увеличении уровня смертности во время волн жары и регионального климатического прогноза. Регионализация ансамбля климатических моделей, проведённая в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, показала, что за прогнозный период 2041...2060 гг. число волн жары в Архангельске должно возрасти в 1,8 [95 % ДИ 1,0...2,6] раза по сравнению с базовым периодом 1980–1999 гг. Соответственно дополнительная смертность, обусловленная этими волнами, в предположении об отсутствии адаптации и акклиматизации должна возрасти в среднем на 80 % [95 % ДИ 0...160 %]. Однако, если за 100 % взять не дополнительную смертность во время волн жары, а всю годовую смертность, прирост будет не столь значительным. Для такого пересчёта следует знать среднее число дней в году, во время которых ожидаются волны жары. В Архангельске в результате учащения таких волн относительное увеличение уровня смертности в среднем за период 2041...2060 гг. по сравнению с 1980–1999 гг. прогнозируется на уровне 0,5 %

[95 % ДИ 0...1,0 %] для цереброваскулярных болезней в возрастной группе от 65 лет и старше и 0,22 % [95 % ДИ 0...0,44 %] — для всей естественной смертности в этой же возрастной группе. Заметим, что только для этих двух показателей смертности в Архангельске было установлено достоверное увеличение уровня смертности во время волн жары. Возможно, что смертность во время волн жары может возрасти не только в центральных и северных, но и в южных регионах России. Превышение многолетних среднемесячных температур воздуха летом 2010 и 2011 гг. произошло в Астраханской, Волгоградской, Воронежской, Оренбургской, Самарской, Саратовской областях, Ставропольском и Краснодарском краях, в Калмыкии, Башкортостане, республиках Северного Кавказа (<http://pogoda.ru.net/>). На этих территориях проживает более 45 млн человек, т.е. практически каждый третий житель страны.

Одним из наиболее эффективных методов по защите здоровья населения от климатических изменений является внедрение систем раннего предупреждения о наступлении жары. Они разработаны в США, Канаде, Франции, Чехии и других странах мира как средство предупреждения органов здравоохранения о появлении нового риска. Например, во Франции в 2006 г. благодаря активной работе системы здравоохранения, получившей вовремя информацию о наступающей жаре, удалось на 30 % снизить прогнозируемое число дополнительных случаев смерти из-за жары [Fouillet et al., 2008].

В России на федеральном уровне зафиксирована необходимость оценки социальных последствий изменения климата в Климатической доктрине РФ, но на региональном уровне она ещё плохо осознаётся. Однако именно на региональном уровне в отдельных населённых пунктах важно определить, насколько опасны климатические изменения, регистрируемые метеослужбой, для здоровья различных возрастных, социальных и этнических групп населения (особенно для коренных малочисленных народов). Кроме того, необходимо разработать рекомендации по внедрению системы организационных и медицинских мер по предупреждению негативных последствий для здоровья в связи с наступлением сильной жары, резким похолоданием или другими существенными изменениями климата. Предупреждения медицинских работников наряду с прогнозами погоды способны смягчить негативное воздействие экстремальных погодных явлений на здоровье. Вместе с тем не совсем ясно, каким образом существующие прогнозы погоды могут предупреждать о столь аномальных явлениях как жара 2010 г. и соответственно быть основой мероприятий по защите здоровья населения. Для этого необходим государственный системный подход, опирающийся на инициативу региональных и местных органов власти, а также самого населения.

Исследование выполнено при поддержке Президиумом РАН, программа «Фундаментальные науки — медицине» (проект «Влияние региональных изменений климата на показатели смертности населения»), и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) (проект «Воздействие изменений климата на здоровье населения и оценка возможности адаптации на Севере Российской Федерации», организованный и финансируемый).

Авторы благодарят Т.Л. Харькову, сотрудника Института демографии НИУ ВШЭ, за помощь в подготовке статистических материалов по смертности; Е.Г. Семутникову — директора и Е.А. Лезину — начальника отдела ГУП

«Мосэкомониторинг» за помощь в систематизации данных о загрязнении атмосферного воздуха в Москве.

Работа по Архангельску проводилась в рамках проекта ВОЗ и Министерства по окружающей среде, природы и ядерной безопасности ФРГ, направленного на защиту здоровья от изменения климата в Европе, координируемого доктором В. Menne и доктором D. Nurse (Европейский региональный офис ВОЗ).

Анализ этих данных занял достаточно много времени и был завершён в 2011 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [Варакина и др., 2011] *Варакина Ж. Л., Юрасова Е. Д., Ревич Б. А.* и др. Оценка влияния температуры воздуха на смертность населения Архангельска в 1999–2008 годах // *Экология человека*. 2011. № 6.
- [Величковский, 2002] *Величковский Б. Т.* Патогенетическое значение пиковых подъёмов среднесуточных концентраций взвешенных частиц в атмосферном воздухе населённых мест // *Гигиена и санитария*. 2002. № 6.
- [Гречко и др., 2010] *Гречко Е. И., Горчаков Г. И., Джоло А. В.* и др. Результаты измерений содержания загрязняющих веществ в атмосфере Московского региона в период пожаров 2010 г. // Тез. докл. на конференциях и семинарах по научным направлениям Программы «Фундаментальные науки — медицине в 2010 г.». М.: Слово, 2010.
- [Демографический..., 2010] Демографический ежегодник России 2010. М.: Росстат, 2010.
- [Исаев, 2003] *Исаев А. А.* Экологическая климатология. М: Науч. мир, 2003.
- [Кузнецова и др., 2011] *Кузнецова И. Н., Звягинцев А. М., Семутникова Е. Г.* Экологические последствия погодных аномалий летом 2010 года. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года // Сб. докл. / Под. ред. Н. П. Шакиной. ГУ «Росгидромет России». М.: Триада, ЛТД, 2011.
- [Куликов, 1986] *Куликов В. Ю.* Клинические аспекты полярной медицины. М.: Медицина, 1986.
- [Население..., 2006] Население России. 2006: 14-й Ежегодный демографический доклад / Под ред. А. Г. Вишневого. М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2006.
- [Периоды..., 2005] Периоды сильной жары: угрозы и ответные меры. ВОЗ, 2005.
- [Ревич, 2003] *Ревич Б. А.* Изменение здоровья населения России в условиях меняющегося климата // *Проблемы прогнозирования*. 2003. № 3.
- [Ревич, 2011] *Ревич Б. А.* Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения Европейской части России летом 2010 // *Экология человека*. 2011. № 7.
- [Ревич и др., 2004] *Ревич Б. А., Авалиани С. Л., Тихонова Г. И.* Экологическая эпидемиология. М.: Изд. центр «Академия», 2004.
- [Ревич и др., 2005] *Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Галкин В. Т.* и др. Воздействие высоких температур атмосферного воздуха на здоровье населения в Твери // *Гигиена и санитария*. 2005. № 2.
- [Ревич и др., 2008] *Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Семутникова Е. Г.* Климатические условия и качество атмосферного воздуха как факторы риска смертности населения Москвы в 2000–2006 гг. // *Медицина труда и промышленная экология*. 2008. № 9.
- [Air Quality..., 2006] Air Quality Guidelines Global. Update 2005. WHO, 2006.

- [Air Quality..., 2010] Air Quality Monitoring in Moscow, 2010 News Letter WHO collaborating Centre for quality management and air pollution control at the Federal Environment Agency, Germany. 2010. V. 460.
- [Climate Change..., 2007] Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. N. Y., Cambridge. 2007.
- [Doyon et al., 2008] *Doyon D., Belanger O., Gosselin P.* The Potential Impact of Climate Change on Annual and Seasonal Mortals to Three Cities in Qwebec. Canada. 2008.
- [Fouillet et al., 2008] *Fouillet A., Rey G., Wagner V., Laaidi K., Empereur-Bissonnet P., Le Tertre A.* et al. Has the Impact of Heat Waves on Mortality Changed in France Since the European Heat Wave of Summer 2003? A Study of the 2006 Heat Wave // Intern. J. Epidemiology. 2008. V. 37. N. 2.
- [Hajat Page, Kovats, 2007] *Hajat Page S., Kovats S.* Relationship between Daily Suicide Counts and Temperature in England and Wales // British J. Psychiatry: J. Mental Science. 2007. V. 191.
- [Keatinge, Donaldson, 2001] *Keatinge W. R., Donaldson G. C.* Mortality Related to Cold and Air Pollution in London after Allowance for Effects of Associated Weather Patterns // Environmental Research. Sect. A. 2001. V. A86. P. 209–216.
- [Kim et al., 2010] *Kim Y., Kim H., Kim D. S.* Association between Daily Environmental Temperature and Suicide Mortality in Korea (2001–2005) // Psychiatric Research. 2010. V. 186. N. 2–3.
- [Knowlton et al., 2007] *Knowlton K. B., Lynn B., Goldberg R. A., Rosenzweig C., Hogrefe C., Rosenthal J. K., Kinney P. L.* Projecting Heat-Related Mortality Impacts Under a Changing Climate in the New York City region // American J. Public Health. 2007. V. 97. N. 11.
- [Kysely, 2004] *Kysely J.* Mortality and Displaced Mortality during Heat Waves in the Czech Republic // Intern. J. Biometeorol. 2004. V. 49.
- [Likhvar et al., 2011] *Likhvar V., Honda Y., Ono M.* Relation between Temperature and Suicide Mortality in Japan in the Presence of Other Confounding Factors Using Time-Series Analysis with a Semiparametric Approach Environmental Health and Preventive Medicine (EHPM). Med. 2011. V. 16. N. 1.
- [Parry et al., 2007] *Parry M. L.* et al. Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [Revich, Shaposhnikov, 2005] *Revich B. A., Shaposhnikov D. A.* The Effects of Particulate and Ozone Pollution on Mortality in Moscow // Russia Air Qual. Atmos. Health. 2010. V. 3.
- [Revich, Shaposhnikov, 2010] *Revich B. A., Shaposhnikov D. A.* Extreme Temperature Episodes and Mortality in Yakutsk, East Siberia // East Siberia Rural and Remote Health. 2010. V. 10. P. 1338 (see also: http://www.rrh.org.au/publishedarticles/article_print_1338.pdf).
- [Wilkinson et al., 2007] *Wilkinson P., Smith K. R., Joffe M., Haines A.* A Global Perspective on Energy: Health Effects and Injustices // Lancet. 2007. V. 15. N. 370 (9591). P. 965–978.

CLIMATE CHANGE, COLD AND HEAT WAVES AS RISK FACTORS FOR INCREASED POPULATION MORTALITY IN SOME REGIONS OF RUSSIA

B. A. Revich¹, D. A. Shaposhnikov¹, N. Tokarevich²

¹ Institute of Forecasting of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Paster Institute of Epidemiology and Microbiology, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: revich@ecfor.ru

One of the consequences of climate change is negative changes in health. The first studies using the method of time series, held in Moscow and Tver, showed an increase in mortality from blood circulatory diseases (coronary heart disease, angina pectoris, stroke, and others), and respiratory organs diseases, especially in those who were age more than 65. Thermal comfort zone in Moscow, which registers the lowest mortality rates is in the range of -20 to $+20$ °C, and the most significant increase occurs at $T = +23$ °C during the heat waves of 2010. Excess deaths in the European part of Russia amounted to 54 thousand cases, including 34.5 thousand cases of diseases of the circulatory system, and 1.3 thousand cases of diseases of the breath organs. In Moscow additional number of mortality cases was 11 thousand cases (or 60 %) compared with 2009.

РОЛЬ СВЕТОВОГО РЕЖИМА И МЕЛАТОНИНА В РАЗВИТИИ ВОЗРАСТНОЙ ПАТОЛОГИИ

*В. Н. Анисимов¹, И. А. Виноградова², А. В. Букалев², А. В. Панченко¹,
И. Г. Попович¹, А. В. Семенченко¹, М. А. Забежинский¹*

¹ Научно-исследовательский институт онкологии им. Н. Н. Петрова
Минздравсоцразвития РФ, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: aging@mail.ru

² Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

Воздействие света в ночное время (световое загрязнение) в последние годы увеличилось и стало существенной частью современного образа жизни, сопровождаясь множеством расстройств поведения и состояния здоровья, включая преждевременное старение, сердечно-сосудистые заболевания, ожирение, сахарный диабет и рак. Обнаружено совпадение карт глобального распределения интенсивности светового загрязнения и рака молочной железы и простаты у человека. Выявлена существенная положительная корреляция между географической широтой и частотой рака молочной железы, толстой кишки и матки. Воздействие света в ночные часы нарушает эндогенный циркадианный ритм, подавляет ночную секрецию эпифизом гормона мелатонина. Количество случаев спонтанных опухолей молочной железы и гибели из-за роста опухоли у мышей разных линий, включая трансгенных **HER-2/neu**, подвергнутых постоянному освещению или воздействию естественного светового режима Севера, было значительно большим, чем у мышей, содержащихся при обычном режиме освещения. Опухоли развивались раньше и чаще у крыс, содержащихся при постоянном освещении или естественном освещении Севера. Постоянное освещение обладает также промотирующим эффектом на химически индуцированный канцерогенез у грызунов. В опытах на различных моделях канцерогенеза было обнаружено, что применение мелатонина оказывает угнетающее влияние на развитие опухолей молочной железы, шейки матки и влагалища, кожи, подкожной клетчатки, лёгких, эндометрия, печени, толстой кишки у животных, что свидетельствует о значительной широте спектра антиканцерогенного эффекта этого гормона. Получены также убедительные экспериментальные доказательства того, что применение мелатонина препятствует преждевременному старению репродуктивной системы и организма в целом, предупреждает развитие иммунодепрессии, метаболического синдрома и опухолей различных локализаций, вызываемых световым загрязнением.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее существенное для живой природы явление на Земле — смена дня и ночи, света и темноты. Вращение Земли вокруг своей оси и одновременно вокруг Солнца отмеряет сутки, сезоны и годы нашей жизни. Всё больше сведений накапливается и о роли эпифиза (шишковидной железы) как основного ритмоводителя функций организма. Свет угнетает продукцию и секрецию мелатонина, и поэтому его максимальный уровень в эпифизе и крови у человека и животных многих видов наблюдается в ночные часы, а минимальный — в утренние и днём. В последние годы появились убедительные доказательства нарушения экспрессии генов циркадного ритма при старении [Hofman, Swaab, 2006; Anisimov, 2006]. При старении функция эпифиза снижается, что проявляется прежде всего нарушением ритма секреции мелатонина и снижением уровня его секреции [Анисимов, 2008; Anisimov, 2006; Hofman, Swaab, 2006; Touitou, 2001].

У людей в возрастной группе 60...74 года наблюдается положительный фазовый сдвиг циркадного ритма большинства физиологических показателей (~1,5...2 ч) с его последующей десинхронизацией у лиц старше 75 лет [Touitou, 2001]. С возрастом наблюдаются нарушения ритма секреции гормонов, температуры тела, сна и некоторых поведенческих ритмов [Анисимов, 2008; Комаров и др., 2004; Touitou, 2001]. Нарушения циркадных ритмов играют большую роль в патогенезе заболеваний сердечно-сосудистой системы и желудочно-кишечного тракта [Комаров и др., 2004].

Если эпифиз уподобить биологическим часам организма, то мелатонин можно уподобить маятнику, который обеспечивает ход этих часов и снижение амплитуды которого приводит к их остановке. Пожалуй, более точно будет сравнить эпифиз с солнечными часами, в которых мелатонин играет роль тени от гномона — стержня, отбрасывающего тень от солнца. Днём солнце высоко, и тень коротка (уровень мелатонина минимален), в середине ночи — пик синтеза мелатонина эпифизом и секреции его в кровь. При этом важно то, что мелатонин имеет суточный ритм, т. е. единицей его измерения является хронологический метроном — суточное вращение Земли вокруг своей оси.

Если эпифиз — солнечные часы организма, то, очевидно, любые изменения длительности светового дня должны существенным образом сказываться на его функциях и, в конечном счёте, на скорости его старения. Циркадный ритм весьма важен не только для временной организации физиологических функций организма, но и продолжительности его жизни. В ряде работ было показано, что нарушение фотопериодов может приводить к существенному уменьшению продолжительности жизни животных.

В работе [Hurd, Ralph, 1998] описывается роль циркадного ритма в старении организма на золотистых хомячках с мутацией ритмоводителя *tau* в супрахиазматическом ядре (СХЯ) гипоталамуса. Наблюдения показали, что мутантные хомячки имели на 20 % меньшую продолжительность жизни, чем контрольные. Когда же в головной мозг старых мутантных хомячков имплантировали СХЯ от плодов нормальных хомячков, было отмечено восстановление нормальной продолжительности жизни. Таким же эффектом, по мнению авторов, будут обладать любые воздействия, направленные на нормализацию циркадного ритма. Разрушение осциллятора (СХЯ) приводит к сокращению продолжительности жизни животных. Нарушение функции циркадного гена *Per2* вызывает преждевременное старение и увеличивает чувствительность мышечной ткани к гамма-радиации [Fu et al., 2002]. Мутации в генах циркадного ритма *Clock/Clock* у мышей приводит к развитию ожирения и метаболического синдрома, а также к преждевременным нарушениям эстрального цикла и снижению фертильности [Анисимов, 2008; Anisimov, 2006].

ВЛИЯНИЕ МЕЛАТОНИНА НА ГЕНОМ

Наряду с функциями передатчика циркадных ритмов и антиоксиданта, мелатонин также является важным модулятором транскрипционной активности генов. Экспрессия рецепторов мелатонина в тканях весьма существенная для реализации его избирательного действия. Выявлен довольно широкий спектр рецепторов мелатонина, локализующихся как на поверхности клеточных мембран (Mella (Mt1), Mellb (Mt2), Mellc), так и в клеточном ядре

(RZR/ROR α и NR1F2 (RZR/ROR β)), что обеспечивает многообразие и комплексность эффектов этого гормона в организме. Полагают, что существование множественных изоформ рецепторов мелатонина обеспечивает избирательность его взаимодействия с естественными лигандами, различия в регуляции экспрессии рецепторов как в отдельных тканях, так и в процессе развития организма [Anisimov, Popovic, 2004].

В последние годы было установлено, что мелатонин влияет на активность многих генов в ц. н. с., прежде всего в СХЯ и в *pars tuberalis* гипофиза и некоторых периферических тканях. Взаимодействие мелатонина с так называемыми «часовыми» генами (Per, Clock, Bmal, Cry и др.) определяет фотопериодический контроль циркадных и сезонных изменений физиологических функций организма [Анисимов, 2008].

Прогресс в развитии методов молекулярной биологии, в частности, метод микрочипов ДНК, оказал существенное влияние на понимание механизма действия мелатонина. Мы исследовали влияние мелатонина на экспрессию более 15 000 генов в сердце мышей СВА [Анисимов и др., 2002]. Анализ позволил идентифицировать 212 транскриптов (<1,4 % от всех исследованных клонов) с существенно изменённой экспрессией. Среди них экспрессия 146 генов стимулировалась, а 66 генов угнеталась более чем в 2 раза. Среди них были гены, контролирующие клеточный цикл, адгезию и транспорт. Эти данные соответствуют сведениям о влиянии мелатонина на клеточную пролиферацию, апоптоз и адгезию. Примечательно, что мелатонин существенно влиял на экспрессию генов, относящихся к онкогенезу (т.е. Myb11, Rasa1, Mlt3 и Enigma homolog 2) и обмену кальция. Важно отметить, что было обнаружено существенное влияние мелатонина на экспрессию некоторых митохондриальных генов, в частности, генов, кодирующих 16S рибосомальную РНК (mt-Rnr2), субъединицы I и III цитохрома с оксидазы (mt-Co1, mt-Co3) и NADH дегидрогеназы 1 (mt-Nd1), которую он стимулировал, и субъединицу 6 АТФ синтазы, активность которой он угнетал. При изучении эффекта мелатонина в мозге мышей было выявлено, что его введение модифицирует экспрессию лишь 38 из почти 17 000 изученных генов (<0,3 %) [Анисимов, 2008; Анисимов и др., 2002; Anisimov, Popovic, 2004]. Среди них стимулировалась активность 5 генов, и угнеталась 33 генов. Нами обнаружен только один ген, на который мелатонин оказывал действие как в сердце, так и в мозге — это ген NADH дегидрогеназы 4 (mt-Nd4), кодируемый митохондриальным геномом. Сравнительный анализ действия мелатонина на генную экспрессию в сердце и мозге мыши соответствует наблюдениям о тканеспецифическом характере биологических эффектов мелатонина и свидетельствует о важной роли митохондриальных генов в действии мелатонина на ткани-мишени.

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ГОМЕОСТАЗ И РЕПРОДУКТИВНУЮ СИСТЕМУ

Постоянное освещение приводит к нарушению гомеостаза, изменению гормонального баланса и ускорению процессов старения. При этом повышается порог чувствительности гипоталамуса к торможению эстрогенами, что рассматривается как ключевой механизм в старении репродуктивной системы [Анисимов, 2008]. Искусственное увеличение на несколько часов продолжи-

тельности световой фазы дня обычно приводит к увеличению длительности эстрального цикла и, в некоторых случаях, к его нарушениям, характерным для стареющего организма. Если свет будет включён круглосуточно, у большинства самок мышей и крыс сравнительно быстро (иногда за 3...4 недели) развивается синдром персистирующего эструса. В яичниках мышей и крыс с персистирующим эструсом находят фолликулярные кисты и гиперплазию тека-ткани, тогда как жёлтые тела отсутствуют. Как известно, в физиологических условиях этот синдром естественно возникает в определённом возрасте (у крыс обычно между 15 и 18 мес) и предшествует анэструсу, являясь эквивалентом климактерического синдрома и климакса у женщин.

При воздействии постоянного освещения, вместо циклической продукции гонадотропинов, пролактина, эстрогенов и прогестерона, характерных для нормального эстрального цикла в репродуктивном периоде, происходит их ациклическая выработка, приводящая к гиперпластическим процессам в молочной железе и матке. Отмечено снижение уровня рецепторов к эстрогенам в эпителии молочной железы крыс при их содержании в условиях постоянного освещения. Кроме того, у крыс с персистирующим эструсом при воздействии постоянного освещения наблюдается снижение толерантности к глюкозе и чувствительности к инсулину, что также характерно для старения [Анисимов, 2008; Анисимов, Виноградова, 2006; Vinogradova et al., 2009].

Ещё одним маркером старения является уровень свободно-радикальных процессов. Установлено, что содержание животных при круглосуточном освещении приводит к снижению общей антиокислительной активности в разных тканях и снижению уровня супероксиддисмутазы, что может способствовать накоплению вызываемых свободными радикалами повреждений и старению [Abarran et al., 2001; Vinogradova et al., 2009].

СВЕТОВОЙ РЕЖИМ И РИСК РАЗВИТИЯ РАКА

В ряде эпидемиологических исследований установлено, что воздействие света ночью, приводящее к подавлению ночного пика гормона эпифиза мелатонина, приводит к ановуляции и увеличивает риск возникновения злокачественных новообразований. При изучении состояния здоровья среди более чем 78 тыс. американских медсестёр, которые часто работали по ночам, было выявлено существенное увеличение относительного риска заболевания раком молочной железы и раком толстой кишки, которое повышается с увеличением стажа работы [Schernhammer, Schulmeister, 2004; Schernhammer et al., 2001, 2003].

Интересные результаты были получены в другом проведённом в США эпидемиологическом рандомизированном исследовании [Davis et al., 2001]. У 813 больных раком молочной железы женщин изучали особенности образа жизни за последние 10 лет по сравнению со здоровыми женщинами. При этом, учитывали экспозицию к свету в ночное время, основываясь на следующих показателях: ночная бессонница, уровень освещения в спальне ночью и работа в ночные смены (не менее 3 ночей в месяц) [Davis et al., 2001]. Оказалось, что риск рака возрастает с учащением ночной бессонницы, увеличением уровня ночного освещения и при работе в ночную смену. В последнем случае риск также возрастал с увеличением стажа работы.

Исследования, проведённые в Финляндии и Исландии, показали, что у стюардесс в 2–4 раза возрастает как суммарная частота рака, так и частота рака молочных желез [Pukkala et al., 2002]. Причиной отмеченного увеличения риска рака у стюардесс, по мнению исследователей, наряду с освещением в ночное время и нарушением суточных ритмов, могла быть также космическая радиация. На основании имеющихся экспериментальных и эпидемиологических данных Рабочая группа Международного агентства по изучению рака пришла к заключению, что сменная работа в ночные часы, возможно, канцерогенна для человека (группа 2А) [Straif et al., 2007].

Важная роль светового режима в развитии опухолей подтверждается также результатами изучения противоположного воздействия — световой депривации у женщин с нарушениями зрения, прежде всего слепых [Анисимов, Виноградова, 2006; Anisimov, 2006; Pukkala et al., 2002]. Было установлено, что снижение риска рака коррелирует со степенью потери зрения — наибольшее снижение риска наблюдается у лиц, полностью утративших световосприятие.

Известно, что в высоких широтах в весенне-летние месяцы года световой день значительно увеличен («белые ночи»), тогда как в осенне-зимний период, характеризующийся значительной длительностью тёмного времени суток («полярная ночь»), население подвержено избыточному искусственному освещению. Всё это создаёт ситуацию, которая отмечена выше у работающих по ночам или страдающих бессонницей. У медицинских сестёр, часто работающих по ночам и имеющих стаж более 6 лет, выявлено также увеличение риска инфарктов миокарда и инсультов [Knutsson, 2003]. Отмечено увеличение стресса, связанного с работой и психических, а также ряда соматических заболеваний у лиц, постоянно работающих по ночам [Graham, Cook, 2001; Ha, Park, 2005; Knutsson, 2003; Steenland, Fine, 1996; Stevens, 2009].

Установлено, что воздействие включённого ночью света приводит у молодых здоровых женщин к снижению уровня мелатонина в ночные часы и замедлению его ночного подъёма [Stevens, 2009]. Согласно «мелатониновой гипотезе» снижение выработки мелатонина эпифизом может увеличивать риск РМЖ у женщин, поскольку пониженная выработка мелатонина может приводить к увеличению уровня женских половых гормонов и стимулировать пролиферацию ткани молочной железы [Анисимов, 2008; Stevens, 2009].

В экспериментах на лабораторных мышах и крысах было убедительно показано, что постоянное освещение сопровождается, наряду с развитием гиперпластических процессов в молочной железе и мастопатии, развитием фиброаденом и аденокарцином молочной железы, а также кистозно-аденоматозной гиперплазии и фиброзных полипов эндометрия, а также развитием новообразований некоторых других локализаций [Анисимов, Виноградова, 2006; Anisimov, 2006; Vinogradova et al., 2009]. Постоянное освещение способствовало также стимуляции канцерогенеза, индуцируемого химическими канцерогенами в молочной железе, печени, толстой кишке и других органах. Напротив, содержание животных в условиях постоянной темноты производило противоположный эффект [Анисимов, Виноградова, 2006; Anisimov, 2006; Vinogradova et al., 2009].

В целом, опыты с грызунами убедительно свидетельствуют о стимулирующем влиянии постоянного освещения и ингибирующем действии световой депривации на канцерогенез молочной железы. Эпидемиологические данные также подтверждают такой вывод.

ВЛИЯНИЕ МЕЛАТОНИНА НА РАЗВИТИЕ ОПУХОЛЕЙ У ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА

В опытах на различных моделях канцерогенеза было обнаружено, что применение мелатонина оказывает угнетающее влияние на развитие опухолей у животных. Спектр антиканцерогенного эффекта мелатонина довольно широк — он тормозит канцерогенез кожи, подкожной клетчатки, молочной железы, шейки матки и влагалища, эндометрия, лёгких, печени и толстой кишки [Анисимов, Виноградова, 2006; Anisimov, 2006; Vinogradova et al., 2009]. Этому соответствуют результаты клинических наблюдений. Так, в работе канадских исследователей Е. Миллс и соавторами [Mills et al., 2005] представлены результаты мета-анализа 10 рандомизированных контролируемых исследований эффективности применения мелатонина для лечения онкологических больных с солидными формами опухолей. В общей сложности лечение получили 643 пациента. Применение мелатонина снижало относительный риск смерти в течение 1 года до 0,66, причём не было зарегистрировано серьёзных побочных эффектов препарата.

Возможные механизмы ингибирующего воздействия мелатонина на канцерогенез молочной железы интенсивно обсуждаются в последнее время [Анисимов, Виноградова, 2006; Комаров и др., 2004; Anisimov, 2006]. Установлено, что мелатонин производит эффект как на системном, так и на тканевом, клеточном и субклеточном уровнях. При этом действие мелатонина препятствует процессам, ведущим к старению и раку. В частности, на системном уровне мелатонин снижает продукцию гормонов, способствующих этим процессам, и стимулирует систему иммунного надзора. Одновременно подавляется продукция свободных радикалов кислорода и стимулируется система антиоксидантной защиты. Мелатонин тормозит пролиферативную активность клеток и повышает уровень апоптоза, препятствуя возникновению и развитию опухолевого процесса. На генетическом уровне он ингибирует эффект мутагенов и кластогенов, а также подавляет экспрессию онкогенов [Анисимов, Виноградова, 2006; Anisimov, 2006; Vinogradova et al., 2009].

ВЛИЯНИЕ МЕЛАТОНИНА НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ

В многочисленных исследованиях показана способность мелатонина замедлять процессы старения и увеличивать продолжительность жизни лабораторных животных (дрозофил, плоских червей, мышей, крыс) [Анисимов, 2008; Комаров и др., 2004]. Определённый оптимизм вызывают публикации о способности мелатонина повышать устойчивость к окислительному стрессу и ослаблять проявления некоторых ассоциированных с возрастом заболеваний, таких как макулодистрофия сетчатки, болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, сахарный диабет и др. [Комаров и др., 2004]. Необходимы всесторонние клинические испытания мелатонина при различных заболеваниях, которые, как нам представляется, существенно расширят его применение для лечения и профилактики возрастных десинхронозов.

ЛИТЕРАТУРА

- [Анисимов, 2008] *Анисимов В. Н.* Эпифиз, биоритмы и старение организма // Успехи физиол. наук. 2008. Т. 39. № 4. С. 40–65.
- [Анисимов, Виноградова, 2006] *Анисимов В. Н., Виноградова И. А.* Световой режим, мелатонин и риск развития рака // Вопросы онкологии. 2006. Т. 53. С. 491–498.
- [Анисимов и др., 2002] *Анисимов С. В., Богилер К. Р., Анисимов В. Н.* Изучение влияния мелатонина на экспрессию генов в сердце мышей с помощью микрочиповой технологии // Доклады РАН. 2002. Т. 383. С. 276–281.
- [Комаров и др., 2004] *Комаров Ф. И., Рапопорт С. И., Малиновская Н. К., Анисимов В. Н.* Мелатонин в норме и патологии. М.: ИД «Медпрактика-М», 2004. 308 с.
- [Abarran et al., 2001] *Abarran M. T., Lopez-Burillo S., Pablos M. I.* et al. Endogenous rhythms of melatonin, total antioxidant status and superoxide dismutase activity in several tissues of chick and their inhibition by light // J. Pineal Research. 2001. V. 30. P. 227–233.
- [Anisimov, 2006] *Anisimov V. N.* Light pollution, reproductive function and cancer risk // Neuroendocrinology Letters. 2006. V. 27. P. 35–52.
- [Anisimov, Popovic, 2004] *Anisimov S. V., Popovic N.* Genetic aspects of melatonin biology // Rev. Neurosciences. 2004. V. 15. P. 209–230.
- [Davis et al., 2001] *Davis S., Mirick D. K., Stevens R. G.* Night shift work, light at night, and risk of breast cancer // J. National Cancer Inst. 2001. V. 93. P. 1557–1562.
- [Fu et al., 2002] *Fu L., Pelicano H., Liu J.* et al. The circadian gene *Period2* plays an important role in tumor suppression and DNA damage response in vivo // Cell. 2002. V. 111. P. 41–50.
- [Graham, Cook, 2001] *Graham C., Cook M. R.* Examination of the melatonin hypothesis in women exposed at night to EMF or bright light // Environ. Health Perspect. 2001. V. 109. P. 501–507.
- [Ha, Park, 2005] *Ha M., Park J.* Shiftwork and metabolic risk factors of cardiovascular disease // J. Occupational Health. 2005. V. 47. P. 89–95.
- [Hofman, Swaab, 2006] *Hofman M. A., Swaab D. F.* Living by the clock: The circadian pacemaker in older people // Ageing research. Rev. 2006. V. 5. P. 33–51.
- [Hurd, Ralph, 1998] *Hurd M. W., Ralph M. R.* The significance of circadian organization for longevity in the golden hamster // J. Biological Rhythms (JBR). 1998. V. 13. P. 430–436.
- [Knutsson, 2003] *Knutsson A.* Health disorders of shift workers // Occupational Medicine. 2003. V. 53. P. 103–108.
- [Mills et al., 2005] *Mills E., Wu P., Seely D., Guyatt G.* Melatonin in the treatment of cancer: a systemic review of randomized controlled trials and meta-analysis // J. Pineal Research. 2005. V. 39. P. 360–366.
- [Pukkala et al., 2002] *Pukkala E., Aspholm R., Auvinen A.* et al. Incidence of cancer among Nordic airline pilots over five decades: occupational cohort study // British Medical J. (BMJ). 2002. V. 325. P. 567–571.
- [Schernhammer, Schulmeister, 2004] *Schernhammer E. S., Schulmeister K.* Melatonin and cancer risk: does light at night compromise physiologic cancer protection by lowering serum melatonin levels? // British J. Cancer. 2004. V. 90. P. 941–943.
- [Schernhammer et al., 2001] *Schernhammer E. S., Laden F., Speizer F. E.* et al. Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the nurses' health study // J. National Cancer Inst. 2001. V. 93. P. 1563–1568.
- [Schernhammer et al., 2003] *Schernhammer E. S., Laden F., Speizer F. E.* et al. Night-shift work and risk of colorectal cancer in the Nurses' Health Study // J. National Cancer Inst. 2003. V. 95. P. 825–828.
- [Steenland, Fine, 1996] *Steenland K., Fine L.* Shift work, shift change, and risk of death from heart disease at work // American J. Industrial Medicine. 1996. V. 29. P. 278–281.

- [Stevens, 2009] *Stevens RG*. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence // *Intern. J. Epidemiology*. 2009. V. 38. P. 963–970.
- [Straif et al., 2007] *Straif K., Baan R., Grosse Y.* et al. Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting // *Lancet Oncology*. 2007. V. 8. P. 1065–1066.
- [Touitou, 2001] *Touitou Y.* Human aging and melatonin // *Experimental Gerontology*. 2001. V. 36. P. 1083–1100.
- [Vinogradova et al., 2009] *Vinogradova I. A., Anisimov V. N., Bukalev A. V.* et al. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in rats // *Aging*. 2009. V. 1. P. 855–865.

LIGHT AT NIGHT-INDUCED CIRCADIAN DISRUPTION, AGING AND CANCER

*V. N. Anisimov¹, I. A. Vinogradova², A. V. Bukalev², A. V. Panchenko¹,
I. G. Popovich¹, A. V. Semenchenko¹, M. A. Zabezhinski¹*

¹ N. N. Petrov Research Institute of Oncology, St. Petersburg, Russia; e-mail: aging@mail.ru

² Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

Light-at-night has become an increasing and essential part of modern lifestyle and leads to a number of health problems, including excess of body mass index, cardiovascular diseases, diabetes and cancer. The International Agency for Research on Cancer (IARC) Working Group concluded that “shift-work that involves circadian disruption is probably carcinogenic to humans” (Group 2A). According to the circadian disruption hypothesis, light-at-night might disrupt the endogenous circadian rhythm, and specifically suppress nocturnal production of pineal hormone melatonin and its secretion in the blood. We evaluated the effect of various light/dark regimens on the survival, life span and spontaneous and chemical carcinogenesis in rodents. Exposure to constant illumination was followed by accelerate aging and tumor genesis in female CBA and transgenic HER-2/neu mice. Male and female rats were subdivided into 4 groups and kept at various light/dark regimens: standard 12:12 light/dark (LD); natural lighting of the North-West of Russia (NL); constant light (LL), and constant darkness (DD) since the age of 25 days until natural death. We found that exposure to NL and LL regimens accelerated switch-off of the estrous function (in females), development of metabolic syndrome and spontaneous tumor genesis, shortened life span both in male and female’s rats as compared to the standard LD regimen. Melatonin given in nocturnal drinking water prevented the adverse effect of the constant illumination (LL) and natural light (NL) regimens on the homeostasis, life span and tumor development both in mice and rats. The exposure to the LL regimen accelerated colon carcinogenesis induced by 1,2-dimethylhydrazine (DMH) in rats whereas the treatment with melatonin alleviated the effect of LL. The maintenance of rats at the DD regimen also inhibited DMH-induced carcinogenesis. The LL regimen accelerated whereas the DD regimen inhibits both mammary carcinogenesis induced by N-nitrosomethylurea and transplacental carcinogenesis induced by N-nitrosoethylurea in rats. These observations allow recommend to use melatonin for premature aging and cancer prevention in groups of humans at risk of light pollution.

МЕДИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СТРАХОВАНИЕ КАК ФОРМА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ К НЕБЛАГОПРИЯТНОМУ ВЛИЯНИЮ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А. А. Макоско, А. В. Матешева

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН), Москва, Россия, e-mail: aam@presidium.ras.ru, matesheva@rambler.ru

Разработаны основы медико-экологического страхования рисков заболеваний населения, обусловленных загрязнением атмосферы на урбанизированных территориях. В настоящее время система экологического страхования в нашей стране и за рубежом ориентирована на случаи внезапных, непреднамеренных интенсивных выбросов загрязняющих веществ и не предусматривает возмещения убытков, вреда, связанных с постоянным загрязнением окружающей среды. Страхование такого рода рисков находится вне интересов страховых компаний, для которых такой вид деятельности просто невыгоден.

Медико-экологическое страхование базируется на применении хеджирования — способа страхования рисков (в данном случае — рисков для здоровья) — и снижения таким образом финансовых потерь населения с использованием специальных контрактов (деривативов). При этом компенсация в случае повышенного риска для здоровья и возросших затрат на профилактику, лечение и реабилитацию перекладывается на объекты, загрязняющие атмосферу.

В случае повышенного риска заболеваний компенсация может иметь различные формы: адресные компенсационные выплаты, оплаченные мероприятия (услуги) по реабилитации (отдых, питание, спорт и др.), оплату части медицинских услуг (вне рамок общего медицинского страхования — ОМС).

Медико-экологическое страхование, помимо применения финансовых инструментов, предполагает использование методики долгосрочного прогноза риска для здоровья от загрязнения атмосферы, а также метода идентификации источников загрязнения атмосферы. Всё это вместе может служить основой системы риск-менеджмента в медицине, которая с помощью специально ориентированных финансово-правовых, организационных механизмов, медицинских технологий будет способствовать повышению адаптационных возможностей человека, проживающего в условиях неблагоприятной окружающей среды, снижению экологически обусловленной заболеваемости и улучшению социально-экономической защищённости населения.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть населения российских городов проживает в условиях повышенного риска для здоровья вследствие постоянного или частого загрязнения атмосферного воздуха. Дополнительно к этому наблюдаемое изменение климата приводит к повышению частоты экстремальных погодных явлений, способных значительно усугублять и без того напряжённую экологическую обстановку.

Заболевания, обусловленные негативным влиянием окружающей среды, вызывают у человека не только дополнительные боль и дискомфорт, но и приводят к негативным экономическим последствиям (затраты на лечение, восстановление, поддержание здоровья в удовлетворительном состоянии, а также упущенный заработок).

В настоящее время в России ещё недостаточно развито направление по экономической оценке заболеваемости. В качестве положительного примера приведём результаты одного из немногочисленных исследований

по оценке экономического ущерба от заболеваемости [Струкова и др., 2006], которые представлены ниже. Оценка выполнена только с учётом заболеваемости в городах с высоким уровнем загрязнения воздуха и включает, главным образом, стоимость лечения и потраченного на лечение времени, т.е. реальные экономические потери без адекватного учёта боли и дискомфорта от болезней. Из анализа этих результатов следует, что населению территорий, расположенных вблизи промышленных предприятий и транспортных объектов, может быть нанесён значительный ущерб вследствие загрязнения воздуха.

Оценка ежегодного ущерба от заболеваемости и других вредных эффектов для здоровья, вызванных загрязнением воздуха [Струкова и др., 2006]

Категории эффектов для здоровья	Общий ежегодный ущерб, млрд руб.
Хронический бронхит	2,1
Госпитализации	0,4
Экстренные посещения врача	0,7
Дни с ограниченной активностью (для взрослых)	4
Заболевания нижних дыхательных путей у детей	0,5
Респираторные симптомы (для взрослых)	0
Общая стоимость заболеваемости	7,7

Это является дополнительным фактором ухудшения качества жизни в городах, который характеризуется разновидностью экологического риска — риском для здоровья.

В целом современная российская нормативно-правовая база в области регулирования эколого-экономических отношений развита ещё недостаточно. Это, в первую очередь, связано с тем, что активно рассматриваться данная проблема стала лишь с 1991 г. с введением закона «Об охране окружающей природной среды» (ст. 23). Кроме этого, серьёзным сдерживающим фактором является недостаток опыта, квалифицированных кадров и общее кризисное состояние экономики.

Для возмещения ущерба, наносимого окружающей природной среде и здоровью человека в результате загрязнения, в России действует система экологических платежей и экологического страхования [Бринчук, 2010].

Экологические платежи представляют собой плату за загрязнение окружающей природной среды в результате нормальной хозяйственной деятельности различных объектов, которая необходима для проведения компенсационных мероприятий по улучшению и поддержанию окружающей среды в удовлетворительном состоянии. Таким образом, вред, наносимый при этом здоровью жителей прилегающих территорий, учитывается лишь косвенно, а этого недостаточно для возмещения убытков, которые в реальности несёт население экологически неблагополучных районов.

Существующая система экологического страхования в нашей стране ориентирована на случаи внезапных, непреднамеренных интенсивных выбросов загрязняющих веществ. При этом предусмотрено возмещение вреда, причинённого объектам природной среды, имуществу и здоровью людей. Компенсация экономического ущерба населению в результате постоянного (не аварийного) повышенного загрязнения окружающей среды и вызванного этим нарушения здоровья не является предметом рассмотрения страховых компаний, так как страхование такого рода рисков им просто невыгодно.

Для адаптации к негативному влиянию окружающей среды разработаны основы риск-менеджмента в медицине, в основе которого лежит медико-экологическое страхование риска для здоровья жителей экологически неблагоприятных территорий в результате проживания в условиях постоянного загрязнения окружающей среды. Данная форма страхования направлена на снижение экономических потерь от экологически обусловленных заболеваний и повышение качества жизни населения [Макоско, Матешева, 2010а, б].

Медико-экологическое страхование базируется на применении хеджирования. Хеджирование — это известный механизм управления рисками экономических потерь путём совершения операций (биржевых и внебиржевых) с производными финансовыми инструментами — деривативами. Важно подчеркнуть, что цель хеджирования — не извлечение дополнительной прибыли, а только снижение риска потенциальных потерь и стабилизация финансовых показателей.

В качестве примера приведём появившиеся в середине 1990-х гг. в США, Австралии и странах Западной Европы погодные деривативы, предназначенные для управления финансовыми рисками, обусловленными естественной изменчивостью погоды (не катастрофическими погодными явлениями), т.е. погодными рисками, влияющими на те части доходов компаний, которые чувствительны к погодным условиям. Эти контракты основаны не на традиционных финансовых активах, а погодных рисках, которым подвержено большинство отраслей хозяйственной сферы [Макоско и др., 2006]. В России погодные деривативы находятся в стадии заинтересованного обсуждения и внедрения в практику при участии Росгидромета и других организаций.

Хеджирование — это средство, которое можно с успехом использовать и для страхования экологических рисков, в частности, риска для здоровья от постоянного (регулярного или частого) загрязнения окружающей среды. При этом у страховых компаний появляется заинтересованность в использовании экологических деривативов, а у жителей загрязнённых территорий — возможность компенсации потерянных в связи с заболеваниями средств.

Значительную трудность в определении механизма экологического страхования, его нормативно-методического обеспечения представляет отсутствие необходимой статистики, что не позволяет с достаточной достоверностью оценить вероятность наступления страхового случая и определить величину страхового тарифа.

В случае с постоянным загрязнением атмосферы и обусловленным этим риском заболеваний проблема определения вероятности наступления страхового случая и цены страхового контракта может быть решена с помощью современных методов оценки риска здоровью на основе актуальной информации о загрязнении воздуха, метода идентификации источников выбросов и определения степени их участия в загрязнении атмосферы, а также современных численных моделей загрязнения атмосферы.

МЕДИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СТРАХОВАНИЕ

Итак, применительно к медико-экологическому страхованию хеджирование представляет собой способ управления риском для здоровья и снижения таким образом финансовых потерь населения с использованием специальных

экологических деривативов. При этом компенсация в случае повышенного риска для здоровья и возросших затрат на профилактику, лечение и реабилитацию перекладывается на объекты, загрязняющие атмосферу (рис. 1).

Рынок медико-экологического страхования предполагает взаимодействие трёх основных участников: жителя загрязнённой территории, объекта выбросов, загрязняющего данную территорию, и страхового фонда (фонд социального страхования, специальный медико-экологический страховой фонд и т. п.).

Это взаимодействие регулируется деривативом — специальным экологическим контрактом, в соответствии с которым одна из сторон (житель загрязнённой территории) «перекладывает» риск своему здоровью на другую сторону (за вознаграждение, премию, которую, однако, оплачивает не сам житель, а источник выбросов — загрязнитель). Экологический контракт может быть оформлен в различных вариантах, которые определяют схему платежа.

В случае повышенного риска заболеваний компенсация может иметь различные формы: адресные компенсационные выплаты, оплаченные мероприятия (услуги) по реабилитации (отдых, питание, спорт и др.), оплату части медицинских услуг (вне рамок ОМС).

Важной характеристикой экологического контракта является *базовый актив*, на который он выпускается. Его стоимость является основой для расчёта при исполнении контракта. Базовым активом экологического контракта служат канцерогенный риск и опасность неонкологических заболеваний.

Оценка риска наступления заболеваний, ведущих в итоге к ощутимым финансовым потерям, выполняется на основе использования данных медико-биологических исследований (например, референтных концентраций) и показателей загрязнения воздуха (концентраций веществ) на рассматриваемой территории.

При заключении контракта рассматривается (прогнозируется) уровень риска на определённый промежуток времени, обязательно указываемый в контракте.

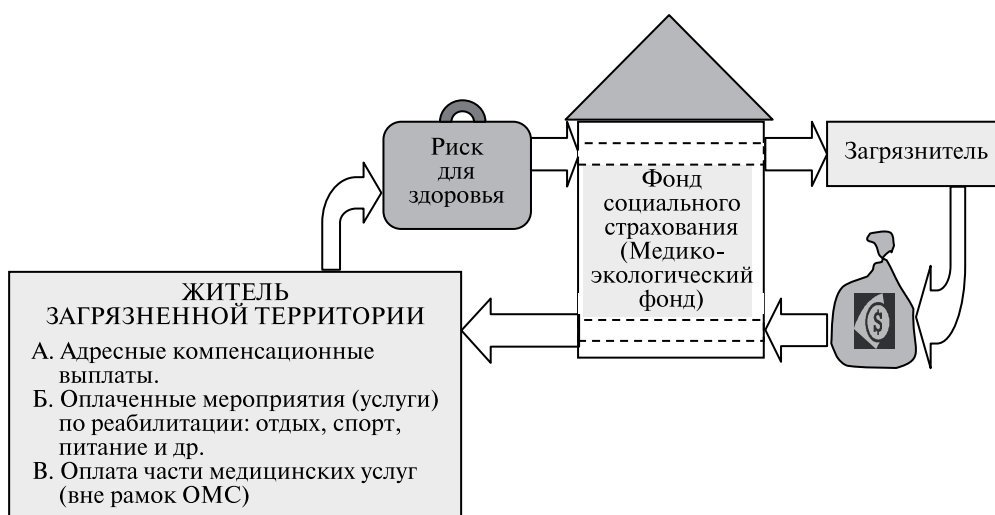


Рис. 1. Участники рынка медико-экологического страхования

Располагая данными о загрязнении воздуха и обусловленном им риске для здоровья, а также о наступающих при этом финансовых потерях населения, можно построить различные схемы хеджирования риска заболеваний. Наиболее соответствующие данной цели типы контрактов — это свопы и опционы [Макоско, Матешева, 2010а].

Наиболее сложным моментом в медико-экологическом страховании является определение цены экологического контракта (или размера премии), а также выявление источников выбросов, виновных в загрязнении воздуха, оценка их вклада в общий уровень загрязнения на конкретной территории и определение величины платы, которую загрязнитель должен перечислить в качестве компенсации за вред, причиняемый здоровью населения.

ЦЕНООБРАЗОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДЕРИВАТИВОВ

В практике хеджирования существуют разные подходы к определению цены деривативов. Так как в экологических деривативах базовым активом является риск для здоровья, то наиболее точно цену экологического контракта можно определить на основе прогноза риска для здоровья с учётом возможных изменений в работе источников выбросов и вариаций метеорологических характеристик за рассматриваемый период.

Для решения этой задачи разработана методика долгосрочного прогноза риска для здоровья населения при техногенном загрязнении атмосферы. Методика основана на использовании методов теории чувствительности, базирующихся на интегрировании конечно-разностного аналога трёхмерного уравнения переноса и диффузии загрязняющей примеси, записанного в вариациях относительно невозмущённого состояния атмосферы. Данная методика позволяет выполнять не только диагностику риска и его оценку при изменении количества выбросов, но и прогноз с учётом возможных изменений климата. Подробно методика долгосрочного прогноза риска для здоровья населения вследствие загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата описана в предыдущих работах авторов [Макоско, Матешева, 2009].

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Для выявления виновных в загрязнении воздуха и оценки их вклада в общий уровень загрязнения предложен метод идентификации источников загрязнения атмосферы [Макоско, 1998]. Данный метод основан на применении математического аппарата основных и сопряжённых уравнений переноса и диффузии загрязняющей примеси. Суть подхода заключается в том, что с помощью наблюдений на постах мониторинга за концентрацией примесей и результатов расчётов сопряжённых функций на основе специально построенного функционала, характеризующего концентрацию примеси в заданных зонах, установлена возможность идентифицировать мощность выбросов источника и его вклад в общий уровень загрязнения на конкретной территории.

Пусть в области Ω имеется m источников загрязнения воздуха, каждый из которых располагается в зоне G_i ($i = 1, \dots, m$) и характеризуется интенсивностью $I_i \delta(x - x_i)(y - y_i)(z - z_i)$, где δ — дельта-функция Дирака, а x_i, y_i, z_i —

координаты источников загрязнения. Предположим, что в n зонах D_k ($k=1, \dots, n$) области Ω имеются измерения концентрации загрязняющей примеси q_0, q_τ соответственно в моменты времени $t=0$ и $t=\tau$. Требуется в каждой i -й зоне определить среднюю за период τ интенсивность \bar{I}_i .

Следуя статье [Марчук, 1982], основной задаче эволюции примеси поставим в соответствие сопряжённую на основе тождества Лагранжа и получим для каждой из зон D_k функционал

$$J_k = \int_{\Omega} q_{k0} q_{k0}^* d\Omega' + \int_0^\tau dt \int_{\Omega} I q_k^* d\Omega', \quad k=1, \dots, n,$$

где q_k^* — решение сопряжённой задачи в зоне D_k ; q_{k0}^* — значение q_k^* при $t=0$; q_{k0} — концентрация примеси в момент $t=0$ в зоне D_k .

Полученное выражение перепишем в виде

$$J_k = \int_{\Omega} q_{k0} q_{k0}^* d\Omega' + \sum_{i=1}^m \bar{I}_i \int_0^\tau q_{ki}^* dt. \quad (1)$$

Здесь J_k — средняя концентрация примеси в зоне D_k за период τ , т.е. $J_k = \bar{q}_k = (q_{k0} + q_{k\tau})/2$.

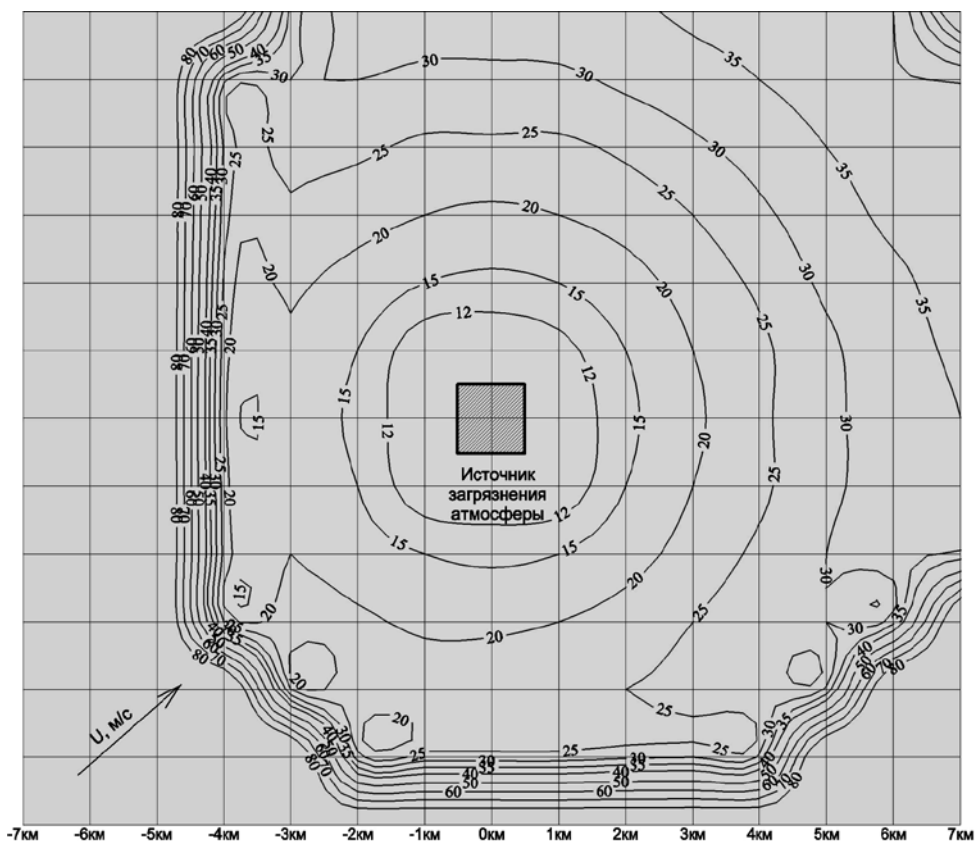


Рис. 2. Поле погрешностей идентификации источника загрязнения атмосферы

Из условия минимума разности $\varepsilon = (J_k - \bar{q}_k)$ стандартными методами (например, методом наименьших квадратов) легко получается система линейных уравнений относительно \bar{I}_i , подлежащих определению. Использование предлагаемого подхода позволяет с достаточной точностью идентифицировать источники выбросов в масштабе города или района мегаполиса (рис. 2).

ОЖИДАЕМЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ МЕДИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТРАХОВАНИЯ

Экономическая эффективность — снижение финансовых потерь (затраты на лечение, реабилитацию, поддержание здоровья в удовлетворительном состоянии, а также упущенный заработок), которые несёт население в результате заболеваний, вызванных постоянным загрязнением воздуха.

Финансовые обязательства по компенсации экономических потерь населению от экологически обусловленных заболеваний распределяются исключительно среди источников-загрязнителей. При этом федеральный бюджет дополнительных расходов не несёт.

Экологическая эффективность — создание у загрязнителя мотивации к снижению загрязнения воздуха и обусловленного этим риска здоровью населения. Введение необходимости оплаты за причинение вреда здоровью населения будет стимулировать загрязнителей к применению организационно-технических мер по снижению негативного воздействия на атмосферный воздух (сокращение выбросов, использование современного очистного оборудования и др.).

Социальная эффективность — улучшение качества жизни городского населения в связи со снижением дополнительных финансовых потерь, вызываемых заболеваниями вследствие постоянного загрязнения атмосферы, выражается в повышении социально-экономической защищённости в условиях проживания в неблагоприятной окружающей среде.

Средства, полученные в качестве компенсации, могут использоваться с целью повышения адаптационных возможностей населения (оплаченные мероприятия по реабилитации: отдых, спорт, питание и др.; оплата части медицинских услуг), проживающего на экологически неблагополучных территориях, что будет способствовать снижению числа и тяжести экологически обусловленных заболеваний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение экологического риск-менеджмента в медицине для смягчения негативных социально-экономических последствий от экологически обусловленных заболеваний может быть реализовано лишь при создании соответствующей правовой базы.

Учитывая широкие масштабы загрязнения атмосферы во многих городах России, в снижении финансовых потерь от экологически обусловленных заболеваний заинтересована большая часть населения. Поэтому есть все предпосылки для внедрения медико-экологического страхования риска для

здоровья в практику городского и муниципального управления в городах со сложной экологической обстановкой, прежде всего, в мегаполисах.

Таким образом, медико-экологическое страхование, основываясь на специально ориентированных финансово-правовых механизмах, современных разработках в области экологии и медицины, будет способствовать повышению адаптационных возможностей человека, проживающего в условиях неблагоприятной окружающей среды, снижению экологически обусловленной заболеваемости и улучшению социально-экономической защищённости населения.

Материал подготовлен при поддержке гранта РГНФ № 12-06-00375(а) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки — медицине».

ЛИТЕРАТУРА

- [Бринчук, 2010] *Бринчук М. М.* Экологическое право: Учебник для высших учебных заведений. Система ГАРАНТ, 2010.
- [Макоско, 1998] *Макоско А. А.* Идентификация распределённых источников загрязнения окружающей среды // 2-я Научно-производственная конф. «Экологическая безопасность транспортных магистралей»: Тез. докл. М.: МИИТ, 1998.
- [Макоско и др., 2006] *Макоско А. А., Гинзбург А. С., Солдатенко С. А., Матешева А. В.* Использование производных финансовых инструментов для уменьшения погодных рисков // Инновации. 2006. № 6. № 91. С. 61–70.
- [Макоско, Матешева, 2009] *Макоско А. А., Матешева А. В.* Методические основы долгосрочного прогноза риска здоровью населения мегаполиса при техногенном загрязнении атмосферы // Инновации. 2009. № 10. № 132. С. 46–50.
- [Макоско, Матешева, 2010а] *Макоско А. А., Матешева А. В.* О хеджировании рисков для здоровья населения в условиях постоянного воздействия загрязнённого воздуха // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2010. № 4. С. 374–382.
- [Макоско, Матешева, 2010б] *Макоско А. А., Матешева А. В.* О стратегии экологического риск-менеджмента в области загрязнения атмосферы для повышения качества жизни населения в городах // Инновации. 2010. № 6. 140. С. 86–89.
- [Марчук, 1982] *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.
- [Струкова и др., 2006] *Струкова Е. Б., Балбус Дж., Голуб А. А.* Риск для здоровья и экономическая оценка ущерба от загрязнения воздуха в России // Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей / Под ред. Б. А. Ревича. М., 2006. С. 141–175.

MEDICAL-ECOLOGICAL INSURANCE AS THE SOCIAL-ECONOMIC ADAPTATION FORM TO THE UNFAVORABLE EFFECT OF THE ENVIRONMENT

A. A. Makosko, A. V. Matesheva

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, e-mail: aam@presidium.ras.ru, matesheva@rambler.ru

The fundamentals of medical-ecological insurance risk of disease among the population caused by air pollution in urban areas have been developed.

Currently, the system of ecological insurance in this country and abroad is focused on cases of sudden, unintended intensive emissions of pollutants and does not provide for damages, resulting from the permanent pollution of the environment. Insurance of this kind of risk is outside the interests of insurance companies for which such activity is simply unprofitable.

Medical-ecological insurance is based on the use of hedging — a method of insuring the risks (in this case — the risks to health) — and thus reducing the financial losses of the population with the use of special contracts (derivatives). Thus, compensation in case of an increased health risk and increased costs for prevention, treatment and rehabilitation is shifted to the objects that pollute the atmosphere.

In the case of an increased risk of disease compensation can take many forms: targeted compensation, paid rehabilitation (rest, nutrition, sports, etc.) activities (services), payment of medical services (outside compulsory medical insurance).

Medical-ecological insurance, in addition to the use of financial instruments involves the use of methods of long-term prognosis risk to health from air pollution, as well as a method of identification of air pollution sources. All of this could be the basis of risk-management in medicine, which with the help of specially tailored financial and legal, institutional arrangements, medical technology will enhance the adaptive capacities of people living in an unfavorable environment, will reduce environmentally caused morbidity and improve the social-economic protection of the population

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ВСЛЕДСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

А. В. Матешева, А. А. Макоско

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН), Москва, Россия, e-mail: matesheva@rambler.ru; aam@presidium.ras.ru

Разработан методический подход к долгосрочному прогнозу риска для здоровья вследствие загрязнения атмосферы, позволяющий выполнять заблаговременную оценку опасности для здоровья человека различных видов антропогенного и природного загрязнения воздуха с учётом прогнозируемых изменений климата. Заблаговременность прогноза может составлять несколько десятилетий.

Данный подход основан на применении методов теории чувствительности, которые базируются на интегрировании конечно-разностных аналогов уравнений модели загрязнения атмосферы, записанных в вариациях относительно невозмущённого состояния.

На основе данного подхода построена численная модель загрязнения атмосферы и выполнены эксперименты по долгосрочному прогнозу канцерогенного риска и относительной опасности неонкологических заболеваний вследствие техногенного загрязнения воздуха на территории Москвы с учётом различных сценариев развития города и изменения климата.

В настоящее время разрабатываются основы долгосрочного прогноза аллергических заболеваний, вызываемых атмосферными поллютантами и аэроаллергенами, в условиях прогнозируемых изменений климата.

Учитывая повышение частоты экстремальных погодных и обусловленных ими экологических ситуаций, долгосрочный прогноз риска для здоровья является важным элементом в системе стратегического планирования в области медицины и экологии.

ВВЕДЕНИЕ

Большая часть населения урбанизированных территорий подвержена влиянию техногенного загрязнения воздушной среды, которое проявляется в повышении риска заболеваемости органов дыхания, сердечно-сосудистой, эндокринной и иммунной систем, риска злокачественных новообразований. При этом загрязнение атмосферы не всегда увеличивает число случаев заболеваний, но повышает тяжесть и ухудшает исход болезней в виде повышенной инвалидизации и летальности.

Комбинированное воздействие метеорологических и экологических факторов в условиях изменяющегося климата провоцирует повышение риска здоровью человека.

Изменение климата сопровождается повышением частоты неблагоприятных метеорологических ситуаций, способствующих накоплению в воздухе вредных примесей от техногенных источников.

В наибольшей степени наблюдаемые (и прогнозируемые) изменения климата проявляются в северных широтах.

Любые климатические изменения ведут к изменению потребности в энергии, что отражается на уровне загрязнения атмосферы. Потепление климата способно повысить долю сельского хозяйства в экономике северных регионов и таким образом изменить структуру загрязнения атмосферного воздуха вследствие использования химических удобрений. Кроме этого, вполне возможно появление нехарактерных для некоторых районов инфекционных

заболеваний. Таким образом, изменение климата способно существенно повлиять на уровень и характер заболеваемости населения.

Для предупреждения и смягчения негативных климатических и экологических последствий на здоровье необходимы усиление и разработка дополнительных мер по профилактике, а в случае заболеваний — по лечению и последующей реабилитации.

В связи с этим исключительную актуальность приобретает долгосрочный прогноз риска для здоровья населения от техногенного загрязнения атмосферы при различных сценариях изменения климата и развития промышленности, энергетики и транспорта.

С этой целью в Институте физики атмосферы РАН разработаны методические основы такого долгосрочного прогноза риска для здоровья, позволяющие выполнять заблаговременную оценку опасности для населения различных видов антропогенного и природного загрязнения воздуха с учётом прогнозируемых изменений климата. Заблаговременность прогноза может составлять несколько десятилетий. Построена численная модель прогноза загрязнения воздуха, реализующая данную методику и учитывающая результаты прогнозируемых изменений климата (на основе сценариев Межведомственной группы экспертов по изменению климата — МГЭИК).

МЕТОДОЛОГИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Данный подход основан на применении методов теории чувствительности, которые базируются на интегрировании конечно-разностного аналога трёхмерного уравнения переноса и диффузии загрязняющей примеси в атмосфере, записанного в вариациях относительно невозмущённого состояния. Полученные таким образом уравнения в вариациях при фиксированных значениях невозмущённых составляющих вектора состояния линейны. Ввиду этого представляется возможность, не прибегая к моделированию основного (невозмущённого) состояния, оценивать его вариации на больших масштабах времени, вплоть до климатических. Процесс расчёта предельно прост и состоит в перемножении вариаций параметров модели и заранее рассчитанных функций чувствительности. При этом через вариации параметров можно учитывать в модели влияние возмущений естественного и антропогенного происхождения, что представляется крайне важным для решения задачи прогноза риска.

Определим термины: вектор параметров и вектор состояния. Под вектором параметров понимается вектор $\alpha = (Y, f)$, составляющие которого описывают управляющие воздействия на модель рисков и относительной опасности заболеваний: климатические значения метеовеличин Y и характеристики источников f . Под вектором состояния понимается вектор $\mathbf{R} = (r, h)'$, составляющими которого являются канцерогенный риск $r = \sum_i r_i$ и показатель относительной опасности неонкологических заболеваний $h = \sum_j h_j$, обусловленные соответственно i -ми канцерогенными и j -ми неканцерогенными примесями. Здесь

$$r_i = r_i(q_j(Y, f)), \quad h_j = \frac{q_j(Y, f)}{q_{jm}}, \quad (1)$$

где q_{jm} — предельно допустимая концентрация j -го вещества.

Введём в рассмотрение функцию чувствительности [Анискина, Панин, 1992]

$$G = \frac{\partial R}{\partial \alpha}, \quad (2)$$

которая представляет собой изменения вектора состояния, соответствующие единичным вариациям составляющих вектора параметров, т. е. **частные производные** от решений уравнений (1) по составляющим вектора параметров в области невозмущённых решений.

Согласно выражениям (1) r_i и h_j есть функции от концентрации загрязняющей примеси. Поэтому преобразуем правую часть соотношения (2) к виду:

$$\frac{\partial R}{\partial \alpha} = \frac{\partial R}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \alpha}.$$

Рассмотрим производную $\partial R/\partial q = (\partial r/\partial q, \partial h/\partial q)'$, которая является функцией чувствительности вектора состояния к изменениям концентрации загрязняющих примесей.

Оценка канцерогенного риска базируется на использовании единичного фактора риска, который характеризует вероятность онкологического заболевания на протяжении жизни человека вследствие воздействия химического вещества со среднегодовой концентрацией в атмосфере, равной 1 мкг/м³ [Авалиани и др., 1996; Риск..., 2000]:

$$r = \sum_i F_i q_i,$$

где r — индивидуальный риск онкологического заболевания; q_i — среднегодовая концентрация i -го вещества в атмосферном воздухе, мкг/м³; $F_i = \partial r_i/\partial q_i$ — единичный фактор риска для i -го вещества, м³/мкг.

Оценка опасности неонкологических заболеваний выполняется путём сравнения фактического уровня воздействия вещества с установленными нормативными величинами (ПДК, референтными концентрациями и др.)

$$h = \sum_j \frac{q_j}{H_j},$$

где h — показатель (индекс) относительной опасности неонкологических заболеваний; $H_j = \partial r_j/\partial q_j$ — показатель относительной опасности j -го вещества, мкг/м³.

Из изложенного следует, что составляющими функции чувствительности $\partial R/\partial q$ являются известные *a priori* фактор риска F_i и показатель H_j , или в общем виде

$$\frac{\partial R}{\partial q} = (F, (H)^{-1})',$$

где $F = (F_i)'$, $H = (H_j)'$.

Что касается производной $\partial q/\partial \alpha = (\partial q/\partial Y, \partial q/\partial f)'$, то для расчёта её составляющих (полей функций чувствительности концентраций q_i к единичным изменениям источников выбросов и метеопараметров) используются уравнения модели прогноза загрязнения атмосферы, записанные в вариациях относительно невозмущённого состояния [Анискина, Панин, 1992; Макоско,

2001; Макоско, Матешева, 2004, 2006]. С этой целью используются представления векторов состояния и параметров в виде суммы невозмущённых значений \bar{q} , $\bar{\alpha}$ и малых возмущений δq , $\delta \alpha$, т. е. $q = \bar{q} + \eta \delta q$, $\alpha = \bar{\alpha} + \eta \delta \alpha$ (здесь η — вещественный параметр).

Обоснованно предполагалось, что рассматриваемые примеси, прежде всего, в силу своего мезомасштабного характера, не оказывают влияния на поля метеовеличин. Поэтому параметры атмосферы были определены заранее на основе результатов расчётов изменений климата с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана Института вычислительной математики (ИВМ) РАН.

Если записать структуру модели в виде операторного уравнения

$$B \frac{\partial q}{\partial t} + A(q, \alpha) = 0,$$

то уравнения в вариациях представляются в виде

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[B \frac{\partial}{\partial t} (\bar{q} + \eta \delta q) + A(\bar{q} + \eta \delta q, \bar{\alpha} + \eta \delta \alpha) \right] = 0,$$

где B — диагональная матрица; $A(q, \alpha)$ — нелинейный матричный дифференциальный оператор.

Уравнения в вариациях позволяют оценивать непосредственно функции чувствительности вектора состояния (концентрации) к единичным изменениям параметров атмосферы и источника выбросов. Для их вычисления осуществляется интегрирование по времени уравнений в вариациях. При каждом таком решении одна из компонент вектора параметров полагается равной единице, остальные компоненты — нулю. Полученные в результате реализации этого алгоритма поля функций чувствительности $Q = \partial q / \partial \alpha$ позволяют количественно оценивать изменения составляющих вектора состояния (Δq_i), соответствующих заданному полю вариаций параметров ($\Delta \alpha$), т. е. $\Delta q = Q \Delta \alpha$.

Таким образом, выражение в общем виде для расчёта канцерогенного риска и неканцерогенной опасности приобретает вид:

$$\Delta R = (F, (H)^{-1})' Q \Delta \alpha,$$

или в покомпонентном виде: $\Delta r_i = F_i Q_i \Delta \alpha_i$ — для канцерогенного риска; $\Delta h_j = (H_j)^{-1} Q_j \Delta \alpha_j$ — для опасности неонкологических заболеваний.

Полученные выражения для расчёта Δr_i и Δh_j составляют основу долгосрочного прогноза риска заболеваний населения вследствие техногенного загрязнения атмосферного воздуха.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ВАРИАЦИЯХ ОТНОСИТЕЛЬНО НЕВОЗМУЩЁННОГО СОСТОЯНИЯ

Для экспериментального подтверждения работоспособности предложенной методологии прогноза риска здоровью человека на больших масштабах времени с учётом возможных климатических изменений построена численная

модель долгосрочного прогноза загрязнения атмосферы (в вариациях относительно невозмущённого состояния) для территории Московского региона.

За основу была взята модель, построенная на основе трёхмерного уравнения переноса и диффузии примесей в атмосфере [Макоско, 2001; Марчук, 1982]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial q}{\partial z} + \sigma q - \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial q}{\partial z} - \mu \nabla^2 q = f, \quad (3)$$

где q — концентрация примеси; u, v, w — компоненты вектора скорости ветра вдоль осей x, y, z , соответственно; w_g — скорость седиментации примеси; σ — параметр, учитывающий взаимодействие с окружающей средой; k, μ — вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентности; ∇^2 — оператор Лапласа; f — интенсивность источников примеси.

В уравнении (3) отсутствует учёт недиагональных членов тензора турбулентной диффузии вследствие их крайне слабой изученности. Не учитываются в явном виде также фотохимические процессы, коагуляция, поглощение каплями тумана и осадков, радиоактивный распад. Учёт этих процессов осуществляется неявно, например, в f может быть дополнительно включена интенсивность фотохимической продукции, а в σ — интенсивность фотохимической деструкции, вымывание туманами и осадками, радиоактивный распад. Такой подход обусловлен тем, что целью данного исследования не являлось создание сложной модели с высокоточным описанием физических процессов, а ставилась задача лишь проверить работоспособность предложенной методологии к прогнозу риска. Более того, учёт дополнительных условий при столь большой заблаговременности расчётов может отрицательно сказаться на точности прогноза.

Для решения уравнения (3) привлекаются граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{ll} k \frac{\partial q}{\partial z} + (w_g - \beta)q = 0 & \text{при } z = z_0, \\ k \frac{\partial q}{\partial z} = 0 & \text{при } z = Z, \\ q|_{\Gamma} = 0 & \text{при } u_n < 0, \\ \left. \frac{\partial q}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0 & \text{при } u_n \geq 0, \end{array} \right.$$

где β — параметр, характеризующий взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью; Γ — боковая поверхность трёхмерной области решения; n — нормаль к Γ ; z_0 — уровень шероховатости; Z — верхняя граница области решения.

Для расчёта полей функций чувствительности концентрации к единичным изменениям параметров атмосферы и источников примеси данное уравнение представляется в вариациях относительно невозмущённого состояния

$$\frac{\partial \delta q}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \delta q}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \delta q}{\partial y} + (\bar{w} - w_g) \frac{\partial \delta q}{\partial z} + \sigma \delta q - \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \delta q}{\partial z} - \mu \nabla^2 \delta q = \delta f. \quad (4)$$

Здесь \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} — климатические параметры составляющих вектора скорости ветра, характеризующие соответствующие год и месяц численного интегрирования уравнения (4). Это позволило значительно упростить вид уравнения в вариациях, так как в этом случае следует считать $\delta u = 0$, $\delta v = 0$, $\delta w = 0$.

Главными особенностями уравнения (4) является то, что оно описывает существенно положительные функции, имеющие большие пространственные градиенты. Поэтому для решения уравнения (4) вводилась знакопеременная функция $p = q^{0,5}$, что избавило от первой особенности. Для преодоления второй применялась схема четвёртого порядка точности по горизонтальным координатам и второго порядка — по вертикальной координате и времени на основе двуциклического метода расщепления [Марчук, 1982]. Решение получающихся при этом одномерных уравнений осуществлялось по горизонтальным координатам методом прогонки для пятиточечных уравнений, а по вертикальной координате — методом прогонки для трехточечных уравнений [Марчук, 1980].

Численная модель реализована на ограниченной территории, имеющей вид прямоугольного параллелепипеда размером $108 \times 108 \times 0,25$ км. Соответствующая ей сеточная область представляет $36 \times 36 \times 3$ узлов с шагом по горизонтальным координатам 3 км. По вертикали счётные уровни располагаются на высотах 1; 50 и 250 м.

Построенная модель позволяет выполнять прогноз концентраций примесей с заблаговременностью, принятой в работах по оценке риска пожизненному сроку воздействия 70 лет для канцерогенов и 30 лет — для веществ с неканцерогенными эффектами.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДОЛГОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗУ РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Апробация разработанного методического подхода к долгосрочному прогнозу риска для здоровья выполнялась на территории Москвы. Прогноз выполнялся на 30- и 70-летний периоды для неонкологических и онкологических заболеваний соответственно. Начальная дата прогноза — 1 января 2005 г.

Рассматривалось пять загрязняющих веществ (диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, формальдегид, свинец), два из которых имеют также канцерогенный эффект (формальдегид, свинец). Информация о выбросах загрязняющих веществ в г. Москве получена из доклада [Государственный..., 2006]. Сведения о времени жизни загрязняющих примесей, размерах частиц и их плотности взяты из работы [Вредные..., 1976].

Для решения задачи долгосрочного прогноза используется климатическая метеорологическая информация для территории Московского региона, полученная по результатам экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН [Официальный сайт..., 2008]. В качестве источников выбросов рассматривались автотранспорт и промышленные зоны столицы. Рассматривался один площадной источник неправильной формы, который интегрально представлял информацию о выбросах передвижных и стационарных источников, расположенных по всей территории Москвы. Такое укрупнение является вполне разумным с точки зрения пространственно-временного масштаба решаемой задачи. Высота источника составляет 1 м,

что обусловлено доминирующим влиянием автотранспорта в загрязнении городского воздуха.

Для оценки достоверности построенной численной модели выполнено сравнение полученных с её помощью результатов с данными одной из апробированных моделей загрязнения воздуха (CALINE-3) и натурных измерений на одной и той же территории [Риск..., 2000]. Сравнительный анализ концентраций, рассчитанных по указанным моделям и измеренным данным, оказался удовлетворительным.

Для проведения экспериментов по долгосрочному прогнозу риска для здоровья на территории Москвы предварительно были определены сценарии возможных изменений климата, развития промышленности и автотранспорта.

Климат. Экспертные оценки возможных климатических изменений неоднозначны. Сегодня многие учёные склоняются к мысли о начале глобального похолодания. Но ещё несколько лет назад доминировало представление о глобальном потеплении, были рассчитаны возможные его сценарии. Именно эти сценарии, разработанные Межправительственной группой экспертов по изменению климата, легли в основу настоящих экспериментов.

В настоящее время проводится международная программа СМІР по сравнению прогнозов изменений климата, полученных с помощью данных моделей во всём мире [Дымников и др., 2006]. Прогноз изменений климата выполнялся по трём основным сценариям (А2, А1В, В1), основанным на количестве сжигаемого человеком ископаемого топлива [Дымников и др., 2006]. При сравнении прогнозов изменения глобально осреднённой температуры к 2100 г. при сценарии А2 среднее по всем моделям потепление составляет около 3,4°, при сценарии А1В — 2,7°, при сценарии В1 — 1,8°. В России подобная модель, участвующая в международной программе сравнения, разработана ИВМ РАН [Официальный сайт..., 2008]. Эта модель показывает удовлетворительные результаты по сравнению с другими моделями, как при воспроизведении климата XX столетия, так и при прогнозировании климата. Сценарии изменения климата А1В, А2 и В1 и результаты моделирования климата в XXI столетии с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН использованы в настоящем исследовании при проведении численных экспериментов по долгосрочному прогнозу риска для здоровья.

Промышленность [Баевский, Галушко, 2005]. По промышленности выбрано два сценария развития: нулевой, когда выбросы не меняются, и оптимистичный, когда сокращаются площади промзон и снижаются выбросы.

Выбросы загрязняющих веществ от промышленных объектов Москвы составляют 8 % от общей суммы выбросов. Начиная с 2000 г. выбросы в атмосферу от стационарных источников постепенно снижаются. В настоящее время промышленные, складские, транспортные, научные, коммунальные объекты города занимают около 20 % от всей городской территории. Загрязнение воздуха в большинстве случаев связано с нерациональным размещением производственных мощностей; несовершенством технологических процессов на промышленных предприятиях; низкой экологической культурой. Работа по выводу производственных объектов с территории города ведётся медленными темпами. Согласно Генплану развития Москвы до 2020 г., в столице предусмотрено сокращений территорий производственных зон до 15,6 тыс. га

за счёт ликвидации старых, нерентабельных экологически опасных предприятий, вывода некоторых объектов за территорию города, изменения функционального назначения части производственных территорий. Таким образом, можно выделить два ориентировочных сценария развития промышленности на период с 2005 по 2075 г.: П1 («пессимистичный» — не предполагается какой-либо динамики количества выбросов от производственных зон), П2 («оптимистичный» — уменьшение количества выбросов от предприятий вследствие заметного сокращения площадей промзон, а также изменения технологий промышленных предприятий, появления новых материалов, установки нового очистного оборудования, изменения функционального назначения территорий и др.).

Автотранспорт [Государственный..., 2006]. Развитие автотранспорта предполагает три сценария: пессимистичный (рост выбросов при отсутствии мер по улучшению дорожного движения, качества топлива и технического состояния автомобилей), нулевой (выбросы не меняются) и оптимистичный (сокращение выбросов за счёт проведения мероприятий по уменьшению негативного воздействия автотранспорта на окружающую среду).

В Москве с отработавшими газами автотранспортных средств в воздух поступает 92 % общих выбросов загрязняющих веществ. В последние 15...20 лет наблюдается резкое увеличение численности автомобильного парка, приводящее к обострению сопутствующих негативных факторов (заторы на дорогах и др.), влияющих на загрязнение воздуха столицы. Судя по динамике численности автотранспорта за последние годы, можно сделать вывод, что рост автопарка Москвы будет, вероятнее всего, происходить опережающими темпами относительно реализации различных мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения. В связи с этим можно выделить три ориентировочных сценария развития автотранспорта на период до 2075 г.: Т1 («пессимистичный» — рост автопарка при отсутствии мероприятий по снижению негативного воздействия автомобилей на окружающую среду), Т2 («нулевой» — численность автопарка не меняется, меры по снижению загрязнения воздуха автомобилями не предпринимаются), Т3 («оптимистичный» — сокращение численности автопарка на фоне мероприятий, программ и концепций по уменьшению негативного воздействия автотранспорта на окружающую среду).

Сценарии климата, промышленности и транспорта сформированы в группы в различных комбинациях.

Экспозиция населения. Данная задача представляет немалую трудность, так как в поведенческой модели различных категорий населения (работающих граждан, пенсионеров, детей) существуют большие отличия. В связи с этим в экспериментах принят упрощённый вариант, предусматривающий максимальную (пожизненную) экспозицию населения: 70 лет — для прогноза канцерогенного риска, 30 лет — для неканцерогенной опасности [Риск..., 2000].

Прогноз риска выполнялся для высот 1 м (у земной поверхности) и 50 м (верхние этажи жилых домов). Расчёты проводились исходя из принципа суммарного действия рассматриваемых веществ на организм.

В табл. 1, 2 приведены данные обобщённого анализа полученных результатов в виде средневзвешенных по территории Москвы показателей опасности заболеваний и уровней канцерогенного риска. Для сравнения в этих же таблицах представлены значения h и r по всем сценариям развития транспорта и промышленности, рассчитанные с климатическими данными 2005 г., т. е. без учёта изменения климата.

Таблица 1. Показатели опасности неонкологических заболеваний на территории Москвы при различных сценариях изменения климата и развития города

Сценарии развития транспорта и промзон	Высотный уровень, м	Показатель опасности заболеваний h , %			
		сценарий изменения климата А2	сценарий изменения климата А1В	сценарий изменения климата В1	климатические данные 2005 г.
Т1 + П1	1	8,08	7,94	8,29	8,19
	50	1,85	1,81	1,88	1,84
Т2 + П1	1	4,51	4,43	4,63	4,58
	50	1,03	1,00	1,05	1,02
Т3 + П2	1	2,34	2,30	2,40	2,37
	50	0,54	0,52	0,55	0,53

Таблица 2. Индивидуальные риски онкологических заболеваний на территории Москвы при различных сценариях изменения климата и развития города

Сценарии развития транспорта и промзон	Высотный уровень, м	Индивидуальный риск онкологических заболеваний r , %			
		сценарий изменения климата А2	сценарий изменения климата А1В	сценарий изменения климата В1	климатические данные 2005 г.
Т1	1	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$9,00 \cdot 10^{-5}$	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$9,50 \cdot 10^{-5}$
	50	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$
Т2	1	$5,18 \cdot 10^{-5}$	$4,48 \cdot 10^{-5}$	$3,61 \cdot 10^{-5}$	$4,73 \cdot 10^{-5}$
	50	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$6,62 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$
Т3	1	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$2,80 \cdot 10^{-5}$
	50	$7,77 \cdot 10^{-6}$	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$3,91 \cdot 10^{-6}$	$6,46 \cdot 10^{-6}$

Согласно результатам расчёта риска для здоровья на территории Москвы в 2005 г., загрязнение атмосферного воздуха диоксидами азота и серы, оксидом углерода, свинцом и формальдегидом создаёт повышенную опасность неонкологических заболеваний в столице, превышающую приемлемый уровень в 4...5 раз на уровне нижних этажей зданий; средневзвешенный по территории Москвы индекс h равен 4,6 на высоте 1 м и 1,0 на высоте 50 м. Средневзвешенные по Москве уровни канцерогенного риска, создаваемого выбросами свинца и формальдегида, составляют $4,7 \cdot 10^{-5}$ на высоте 1 м и $1,1 \cdot 10^{-5}$ на высоте 50 м и характеризуются как приемлемые.

Анализ полученных данных долгосрочного прогноза риска показал, что при всех заданных сценариях развития города и изменения климата ожидается

повышенная неканцерогенная опасность для населения вблизи земной поверхности и на уровне нижних этажей зданий (в 2...9 раз в зависимости от сценария), а при пессимистичном варианте — также на верхних этажах высотных домов (приблизительно в два раза). Индивидуальный риск онкологических заболеваний, обусловленный присутствием в воздухе формальдегида и соединений свинца, выбрасываемых автотранспортом, будет находиться в рамках допустимых уровней и на верхней границе приемлемого риска (канцерогенный риск, равный и менее $1 \cdot 10^{-6}$, считается пренебрежимо малым; от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ — приемлемым; равный и более $1 \cdot 10^{-4}$ — высоким, неприемлемым). При пессимистичном сценарии развития Москвы и сценарии климата А2 в отдельных районах города вблизи земной поверхности могут наблюдаться уровни канцерогенного риска, превышающие приемлемые значения.

Средние по территории Москвы и отдельным районам показатели неканцерогенной опасности, полученные по различным сценариям изменения климата, отличаются от данных 2005 г. до 4 %. При этом межсценарная (по климату) изменчивость прогнозных уровней опасности неонкологических заболеваний составляет до 5 %. Значения канцерогенного риска в отдельных районах города и средневзвешенные по Москве имеют отличия от данных 2005 г. от 3 до 41 % в зависимости от сценария и высотного уровня.

Межсценарная (по климату) изменчивость составляет 13...51 % и характеризует приблизительные рамки, в которых может меняться уровень риска для здоровья населения при различных вариантах развития.

Таким образом, выполненный прогноз даёт возможность оценить тенденции изменения уровня заболеваний в отдалённой перспективе, что весьма важно при заблаговременной оценке последствий загрязнения атмосферного воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на ряд существующих неопределённостей, результаты прогноза риска заболеваний населения позволяют обозначить границы, в которых может меняться уровень риска при возможных вариантах развития города и изменения климата, и могут использоваться в качестве основы для планирования мероприятий, направленных на минимизацию данного риска, адаптацию к воздействию изменений климата на здоровье.

На базе представленной методологии в настоящее время, совместно с Институтом иммунологии ФМБА, разрабатываются основы долгосрочного прогноза аллергических заболеваний, вызываемых атмосферными поллютантами и аэроаллергенами, в условиях прогнозируемых изменений климата.

Учитывая повышение частоты экстремальных погодных и обусловленных ими экологических ситуаций, долгосрочный прогноз риска для здоровья является важным элементом в системе стратегического планирования в области медицины и экологии.

Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ № 12-06-00375(а) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки — медицине».

ЛИТЕРАТУРА

- [Авалиани и др., 1996] *Авалиани С. Л., Андрианова М. М., Печенникова Е. В., Пономарёва О. В.* Окружающая среда. Оценка риска для здоровья (мировой опыт). М.: 1996. 159 с.
- [Анискина, Панин, 1992] *Анискина О. Г., Панин Б. Д.* Исследование чувствительности дискретной прогностической модели с помощью уравнений в вариациях // Межвузовский сб. Л.: ЛГМИ, 1992. Вып. 114. С. 4–11.
- [Баевский, Галушко, 2005] *Баевский О. А., Галушко О. Ю.* Перспективы развития производственных зон Москвы. М.: ГУП НИИПИ Генплана Москвы, 2005.
- [Вредные..., 1976] *Вредные вещества в промышленности: Справочник. В 3 т. / Под ред. Н. В. Лазарева.* Л.: Химия, 1976.
- [Государственный..., 2006] *Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2005 году».* М.: АНО «Центр международных проектов», 2006. 500 с.
- [Дымников и др., 2006] *Дымников В. П., Лысков В. Н., Володин Е. М.* Проблемы моделирования климата и его изменений // Изв. РАН. ФАО. 2006. Т. 42. № 5. С. 618–636.
- [Макоско, 2001] *Макоско А. А.* Теоретические основы защиты окружающей среды: Учеб. пособие. М.: МГУПС, 2001. 200 с.
- [Макоско, Матешева, 2004] *Макоско А. А., Матешева А. В.* Методический подход к долгосрочному прогнозу канцерогенного риска, обусловленного загрязнением воздуха транспортными потоками // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М.: ВИНТИ, 2004. № 3. С. 74–77.
- [Макоско, Матешева, 2006] *Макоско А. А., Матешева А. В.* Прогноз экологического риска на основе теории чувствительности: Учеб. пособие. М.: МИИТ, 2006. 32 с.
- [Марчук, 1980] *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики. М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. литературы, 1980. 536 с.
- [Марчук, 1982] *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. литературы, 1982. 320 с.
- [Официальный сайт..., 2008] *Официальный сайт Института вычислительной математики РАН. [Электрон. ресурс]: данные совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН. [Электрон. данные]. М.: ИВМ РАН, 2008. Режим доступа: http://ksv.inm.ras.ru/gcm_data_plotting/gcm_inm_data.html.*
- [Риск..., 2000] *Риск заболевания населения от загрязнения атмосферы автотранспортом: Отчёт по проекту ROLL «Выбросы автотранспорта и оценка риска заболеваний населения на городских территориях».* М.: ППКА «Экодизайн ЛТД», 2000. 90 с.

LONG-TERM PROGNOSIS OF THE RISK TO HEALTH DUE TO POLLUTION OF THE ATMOSPHERE IN TERMS OF A CHANGING CLIMATE

A. V. Matesheva, A. A. Makosko

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: matesheva@rambler.ru; aam@presidium.ras.ru

The majority of the population of urban areas lives under the influence of anthropogenic air pollution, which is manifested in the increased risk of respiratory diseases, cardiovascular, endocrine and immune systems, the risk of cancer. At the same time the air pollution does not

always raises the number of diseases' cases, but heightens the severity and worsens the outcome of the diseases in the form of increased invalidity and mortality.

The combined effect of meteorological and environmental factors in terms of a changing climate provokes an increase risk to human health. Climate change is accompanied by a heightened frequency of unfavorable weather situations that lead to the accumulation of harmful substances in the air from anthropogenic sources.

It is necessary to strengthen and develop the additional prophylactic measures for the prevention and easing of negative climatic and environmental effects on health, in the case of diseases — the treatment and subsequent rehabilitation measures. In this regard, long-term prognosis of the risk to population health from anthropogenic air pollution under various scenarios of a climate change and an industrial, energy and transport development is extremely urgent.

The methodical fundamentals of this prognosis at the Institute of Atmospheric Physics of RAS have been developed for this purpose. It enables to do an early hazard estimate of various kinds of natural and anthropogenic air pollution for the population, taking into account projected climate changes. The forecast may take several decades.

This approach is based on the application of sensitivity theory methods, based on the integration of finite-different analogues of the air pollution model equations recorded in the variations relative to the unperturbed state. Equations in the variations, derived with this method, under fixed values of unperturbed components of the state vector are linear. In view of this, it is possible without a modeling the basic (unperturbed) state to estimate its variations on a large time scale, up to the climatic. The process of calculation is very simple and consists in the multiplication of the variations of the model parameters and the pre-calculated sensitivity functions. At the same time, the influence of disturbances of natural and anthropogenic origin in the model is taken into account through the variations of the parameters.

A numerical model of long-term prognosis of the atmospheric pollution (in the variations relative to the unperturbed state), taking into account the results of projected climate changes (on the base of IPCC scenarios), has been created for experimental verification of efficiency of the proposed methodology.

The model is based on the three-dimensional equation of transfer and diffusion of pollutants in the atmosphere.

Testing of the developed methodical approach to long-term prognosis of the risk to health was realized in Moscow. Prognosis has been carried out for 30- and 70-year periods for non-oncological and oncological diseases, respectively. The start date of the forecast — January, 2005.

The prognostic meteorological information for the territory of Moscow, derived from the results of experiments with the Coupled Climate Model INM RAS, has been used to solve this problem.

Motor transport and industrial areas of the capital have been considered as the emission sources.

The five pollutants have been considered (nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, formaldehyde, lead), two of which also have got a carcinogenic effect (formaldehyde, lead).

A prognosis of risk has been carried out for heights of 1 m (at the earth's surface, the lower floors of houses) and 50 m (the upper floors of houses). The calculations were based on the principle of total effect of the substances in the organism.

The scenarios of possible climate changes, the industrial and transport development have been defined previously for the carrying out of the numerical experiments on the long-term prognosis of risk to health in Moscow. The climate change scenarios A1B, A2 and B1, developed by the IPCC, and the results of climate modeling in the twenty-first century with the Coupled Climate Model INM RAS were used in these experiments. The two scenarios by the industry have been selected: zero, when the emissions are not changed, and optimistic when the areas of industrial zones and the emissions are reduced. The development of transport involves three scenarios: a pessimistic (an increase of emissions under a lack of measures on the traffic improving, fuel quality and car technical state), zero (the emissions are not changed) and optimistic (the emissions' reduction by carrying out activities to reduce the negative influence of transport on the environment).

The results of long-term prognosis of the risk to health are the non-oncological diseases' hazard indices and the cancer risk levels, the average for the territory of Moscow and selected city areas. The values of the risk by all the scenarios of the transport and industry development, calculated with the climate data for 2005, that is without taking into account the climate change, also have been obtained for comparison.

According to the calculation of health risk in 2005, the air pollution due to nitrogen dioxides, sulfur dioxides, carbon monoxide, lead, formaldehyde produces an increased risk of non-oncological diseases in the capital, exceeding the tolerable level of 4...5 times at the lower floors of buildings. The hazard index, the average on the territory of Moscow, is 4.6 at a height of 1 m and 1.0 m at 50. Weighted average carcinogenic risk levels for Moscow, generated by the emissions of lead and formaldehyde, are $4.7 \dots 10^{-5}$ at a height of 1 m and $1.1 \dots 10^{-5}$ at a height of 50 m and are characterized as tolerable.

Analysis of the data of the long-term risk prognosis showed that the increased non-oncological diseases hazard to the population at the lower floors of buildings (of 2...9 times depending on the scenario) while under the pessimistic version also on the upper floors of tall buildings (approximately 2-fold) is expected for all given scenarios of the city development and climate change. Individual risk of cancer due to the formaldehyde and lead compounds emitted by motor transport will be within acceptable levels and at the upper limit of tolerable risk. Carcinogenic risk, equal to and less than $1 \dots 10^{-6}$, is considered as negligibly small; from $1 \dots 10^{-6}$ under $1 \dots 10^{-4}$ — tolerable; equal and more than $1 \dots 10^{-4}$ — a high, unacceptable. The levels of carcinogenic risk exceeding the tolerable values can be observed under the pessimistic scenario of Moscow development and the climate scenario A2 in certain areas of the city near the earth's surface.

The average for the territory of Moscow and its parts the non-carcinogenic hazard indices, obtained by different climate change scenarios, are different from the data 2005 to 4 %. At the same time the variability of forecasted levels of non-oncological diseases' hazard among the climate scenarios is to 5 %. The values of cancer risk in some areas of the city and the weighted average of Moscow have got differences from the data in 2005 from 3 to 41 % depending on the scenario and vertical level.

The variability among the climate scenarios is 13...51 % and characterizes the approximate framework in which the level of risk to the population health can change under the different development variants.

Despite a number of uncertainties, the performed prognosis allows to estimate the trends in levels of diseases in the long term, and to define the limits within which the level of the risk can vary with options for city development and climate change. This is a very important in the long-term assessment of the effects of air pollution.

The prognosis results of risk of diseases to the population can be used as a basis for planning of measures on minimization of this risk, adapt to the effects of climate change on health.

Given the increasing frequency of extreme weather and the environmental situations, long-term prognosis for the risk to health is an important element in the system of strategic planning in the field of medicine and ecology.

DOES SPACE WEATHER INFLUENCE ON OBSERVED INDICES OF AGRICULTURAL MARKETS?

L. A. Pustil'nik¹, G. Yom Din²

¹ Israel Space Weather and Cosmic Ray Center, Tel Aviv University, and Israel Space Agency, e-mail: evpust@post.tau.ac.il

² Open University of Israel, e-mail: gregory@openu.ac.il

Part 1. NECESSARY CONDITIONS AND POSSIBLE SCENARIOS

In this article (part 1) we provide a historical survey and recent results of the possible influence of space weather on the Earth agricultural markets. We present the following three conditions necessary for realization of this influence: 1) sensitivity of local weather (cloudiness, atmospheric circulation) to the state of space weather; 2) sensitivity of the zoned crops to weather anomalies (belonging to risky agricultural zones); 3) relative isolation of the market makes stabilization of price leaps by external food supply. Four possible scenarios of response of agricultural markets to possible modulation of local weather by space weather are described.

I. INTRODUCTION TO THE PROBLEM

I.1. Historical Introduction

The problem of the possible influence of solar activity on the Earth agriculture has a history of almost three centuries. One of the first records of this influence appears in the description of the Royal Society of Britain made by Jonathan Swift, a famous professor of theology and the father of the European satire, in his book devoted to the third travel of Gulliver to the island of Laputa [Swift, 1726]. In this biting satire, Swift mentions the main fears of Laputians as follows:

- a) *“That, the Earth very narrowly escaped a Brush from the Tail of the last Comet, which would have infallibly reduced it to Ashes; and that the next, which they have calculated for One and Thirty Years hence, will probably destroy us”;*
- b) *“That the Face of the Sun will by Degrees be encrusted with its own Effluvia, and give no more Light to the World”.*

These fears reflected theories prevailing in Swift's contemporary scientific society, particularly to the Derham's theory that sunspots arise from solar volcanoes [Renaker, 1979]. Interesting how enduring these fears are that can be met nowadays in science fiction novels and disaster films.

The next statement of the possible influence of the space weather on the agriculture was made by the father of the observational astronomy William Herschel, famous for the discovery of Uranus. He compared the grain prices from the fundamental study of Adam Smith (1776) with the data on the sunspots number, and made a far-reaching conclusion: **“five prolonged periods of few sunspots coincident with costly wheat”** [Herschel, 1801]. This work was presented to the Royal Society, and it was met extremely negatively by other members of the Society. According to a very sharp opinion of one of the Society's leaders (Lord Brougham), “since the publication of Gulliver's voyage to Laputa, nothing so ridiculous has ever been offered to the world” [Soon, Yaskell, 2003].

William Jevons, one of the founders of the mathematical school in economics, was the next victim of the interest to this problem. He was one of the first economists that paid attention on cyclicity in economic processes, and particularly, on cyclic recurrence of economic crises which average length he estimated as 10.2 years [Jevons, 1875, 1878, 1879]. Because of the striking closeness of the crises cycle length to the 11-year length of the sunspots cycle, discovered shortly before the works of Jevons, he assumed that the solar activity modulates economic processes in some way. As a possible causal-effect relationship that could explain the coincidence of the both cycle's length, Jevons assumed that in years of "unfavorable" solar activity weather anomalies happen. They cause to bad harvests, and consequently — to the rise in food price that generates stock exchange crisis. As one from the "weak element" in economics system of Great Britain Jevons pointed out the India ("pearl of the Britain crown" in this period). Harvest in India is very sensitive to summer monsoons from Indian Ocean and deficit or block of monsoon's circulation lead automatically to drought and famines). Moreover, Jevons extrapolated the series of coincidences between the times of the previous five stock exchange crises and the periods of the minimal solar activity, and also put attention on the rises in stock exchange activity immediately after those minimums. He dared to forecast the next economic crisis in the period of the next minimum of solar activity expected in 1879, and this caused the natural reaction in the stock exchange and in the media. Because neither in 1879 nor in later years the promised crisis did not happen*, the Jevons theory was completely discredited, and the new term "sun-spot equilibria" appeared in economic science**.

Further discovery of the exceptional constancy, within the range of 0.1 %, of the level of solar radiation that reaches the Earth (received the name of the "solar constant") deprived supporters of the solar activity influence on the Earth processes of their physical arguments for a long time. This "pessimistic" period continued till discovery of new channels of the solar activity influence on the Earth, united now by the term "space weather".

* In fact, the forecast of Jevons came true, in part. In the period of the minimal solar activity of 1876–1878 he mentioned, the monsoon transfer of the moist ocean air to India (the major part of the British Empire of that time) disappeared for three years. This caused a severe draught that brought to the humanitarian catastrophe known as Great Famine in India. As much as 6...10 million people died of starvation and another 60 million people turned into refugees. The scale of the catastrophe was caused mainly by decision of Great Britain government to refuse from help to famished population by mass purchase in unimpaired regions (caused by fear to provoke price burst and with next stock panics, predicted by Jevons).

** This term reflects high stock exchange sensitivity to any "significant" scientific, economic, or political information about threats to its stability. Such information forms pessimistic expectations of many participants of the stock exchange trade and can invite real panic in spite of unreliability of the initial forecast. The example of Jevons's forecast lays in the basis of the term «sunspot equilibria» in the modern economics. This is the state where speculators' expectations formed by a priori information, are taken into account. This information even being essentially irrelevant, can determine the speculators' behavior and influence the forecasted reality [Azariadis, 1981].

I.2. Introduction to Space Weather

At present, the term “space weather” describes a collection of factors of extraterrestrial origin that can essentially influence the Earth: particularly, solar wind and cosmic rays of high energy, solar flashes and coronal mass ejections*. The phenomenon of solar activity due to dynamic processes of magnetic fields in the Sun lays in the basis of these processes. As a result, sun spots and coronal holes appear on the sun surface, a high-temperature sun crown is formed, and its external part increases and turns into solar wind. This wind, by-turn, blows on the Earth magnetosphere and forms its borders. Magnetic fields of the solar wind are stretched with the wind towards the borders of the solar system and spiralized by the Sun’s rotation. This circumstance complicates galactic cosmic rays penetration into the inner heliosphere, and particularly, towards the Earth.

Variability is the major feature of space weather. For our purpose, the most important characteristic is quasi cyclic variability on 8...15 year periods (the so-called 11-year cycle of sunspots). During this cycle, the number of sunspots, expressed in Wolf sunspot numbers, and the related solar activity changes from zero (minimum) to a few hundreds (maximum of solar activity). Simultaneously with the sunspots number, other related to them manifestations of the space weather (solar wind, cosmic rays, activity of the Earth magnetosphere) change. On a shorter time scale, the space weather is revealed in a form of hours-long magnetic storms generated by solar wind gusts, coronal mass ejections, and impact waves of solar wind. Solar flashes being extremely fast release of magnetic energy in coronal structures accompanied by heating of the coronal plasma to very high temperature and acceleration of a small amount of particles to very high energy (the so-called solar cosmic rays) lay in the basis of this type of disturbances. Besides variability of the space weather on hour and days periods (sunspots), and decade periods (cycles of sunspots), long-run changes on hundred and thousand year periods are observed. In this case, solar activity and sunspots can disappear, like it was in periods of Maunder minimum and Shperer minimum. Let us emphasize that a part of solar activity (for example, ultraviolet, X-ray, radio radiation) can change synchronously with the number of sunspots that correspondents to the azimuthal fields intensity in the solar convection zone. At the same time, other manifestations of solar activity (coronal holes, solar flashes) related both to poloidal fields and to convection character, often change in antiphase with the number of sunspots, or with essential shift in phase. As a result, various components of the space weather (solar wind, magnetosphere activity, and dynamics of cosmic rays flows) show a complex picture of phase changes during the cycle [Georgieva, Kirov, 2011]. The picture becomes complex even more because of the long-run (decades and even centuries) variability of the relative contribution

* Other events, like asteroid-comet attacks (e.g. Tunguska event) and explosions of nearby supernovae are related to the space weather. For our work, however, factors caused by solar activity are important.

of various components of solar activity. As the result, the phase pattern of different manifestations of the space weather can change drastically*.

1.2.a. Influence of Space Weather on the Earth Weather

The influence of the space weather on the Earth magnetosphere and ionosphere is known already about 100 years. At the same time, a possibility of influence of the space weather on the Earth weather by changing conditions in the Earth atmosphere was discovered only in the last time. Until now, this subject is in the center of active scientific discussions**. **The following observations can serve as examples of manifestations of this influence.**

A. High correlation between cosmic rays flow in the Earth atmosphere and level of cloudiness in some regions, particularly, in the Northern Atlantics [Svensmark, Friis-Christinsen, 1997] (Figure 1). Let us emphasize that the sensitivity of the Earth cloudiness to cosmic rays discovered by these researchers, is not universal and is not discovered always and everywhere in the Earth atmosphere. On the contrary, such sensitivity is observed only in a certain height range, in certain geographic regions, and in certain, though long, periods [Marsh, Svensmark, 2000] (Figure 1b). Apparently, the main reason for such selectivity is in the necessity of the implementation of a certain necessary critical condition (threshold state) in the atmosphere in certain regions and periods. Due to this condition, ionization of the air leads to the additional significant effect of condensation of water vapors and promotes the observed increase in cloudiness***. **This picture corresponds to the last results of the CLOUD experiment obtained at the CERN Proton Synchrotron with high-energy protons irradiation on the atmosphere simulation condensation chamber.** According to the first results of the experiment, induced formation of aerosols and water vapors' on the generated ions and radicals, indeed intensifies [Kirkby et al., 2011].

* As an example, let us take the relationship between the Earth magnetosphere activity and solar activity: while during the first observation period (1868–1967) the correlation between the index of geomagnetic activity “aa” and number of sunspots “ssn” was highly significant (the significance interval $\Delta R_{95\%} = [0.4, 0.72]$), in the next 30 years (1969–1998) changes in the phase pattern of the variability in the magnetic activity made the correlation insignificant ($\Delta R_{95\%} = [-0.06, 0.58]$). Annual data of sunspots numbers from <http://sidc.oma.be/data/yearssn.dat> and annual data (total) of the aa index from ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/geomagnetic_data/aastar/aastar.lst.v12 were used.

** There is an especially active discussion on a possible contribution of space weather factors in “global warming” — climate change observed in the last decades.

*** As a possible example of such threshold state let us consider sensitivity of condensation of water vapors to contribution of ions from cosmic rays: in the regions with low initial water vapors density (in the desert region) no addition of ions to the air will not lead to clouds forming (because of water vapors deficit, simply). And vice versa, in the regions with surplus high initial water vapours density, condensation and clouds forming take place without additional contribution of ions in this process. Only under implementation of certain threshold conditions for condensation, significant influence of additional air ionization and of aerosols on water vapours condensation and on clouds forming in the considered region and in the given period can be expected.

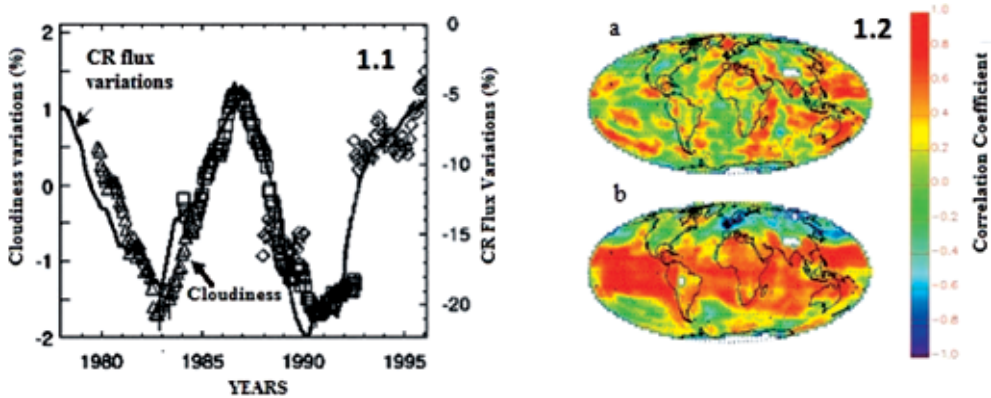


Figure 1. Correlation between cosmic rays flow and cloudiness over Northern Atlantic in 1976–1995 discovered by H. Svensmark and E. Friis-Christensen (1997) (data in 1993–1995 are under discussion because of ambiguity in accounting of device recalibration from this period) (a); a very inhomogeneous distribution of the observed sensitivity of cloudiness (correlation coefficient) to variability of the cosmic rays flow: b.1 — the local area of clouds; b.2 — the local temperature of clouds [Marsh, Svensmark, 2000] (b)

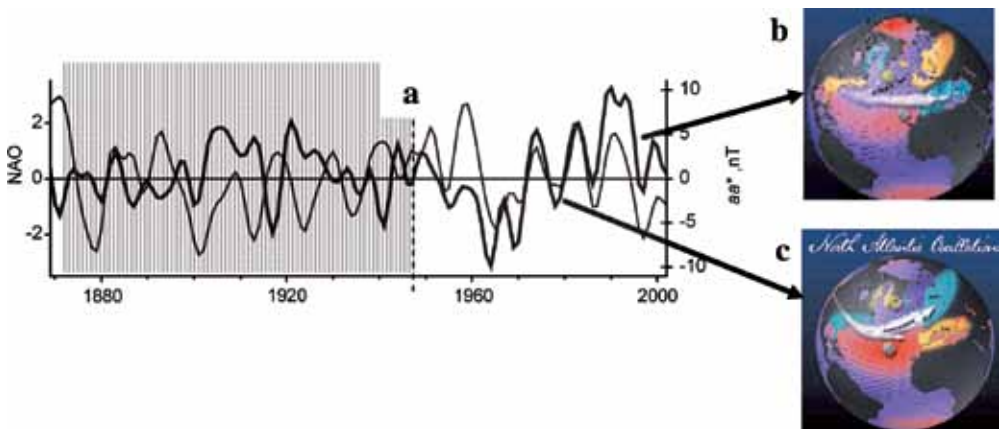


Figure 2. Changes in aa index (a thin line) and in NAO (a thick line) in 1868–2002. The vertical dashed line (1947) separates between periods of absence of correlation and its appearance (a); The dominating atmospheric circulation when NAO is negative (b); positive (<http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>) (c)

B. Dependence of the global circulation in the Earth atmosphere defined by the parameter NAO (North Atlantic Oscillation — the difference between sub-equatorial (Azores) and sub-polar (Iceland) atmospheric pressure*), on the magnetosphere activity level that is affected, in its turn, by space weather. As it is shown by researchers

* When NAO is positive, the main transfer of moist air of Atlantic by cyclones happens in Central and Northern Europe and continues over Russia to Yakutia with contribution to cloudiness and precipitation in this region with domination of dry and hot weather in the Mediterranean. When NAO is negative, the cyclones belt moves to the South to the Mediterranean with the corresponding increase in cloudiness and precipitation. At the same time, relatively dry weather sets in to north of this region.

from the Sankt-Petersburg Institute of Arctic and Antarctic [Lukianova, Alekseev, 2004], in the last 60 years a highly significant correlation between the magnetosphere activity level (aa index), especially in sub-polar regions (Pc-index), and variability of NAO index that defines global circulation of moist air of Atlantic, is observed (Figure 2).

Let us emphasize that like in the case of the correlation between cloudiness over Northern Atlantic and cosmic rays, the discovered sensitivity of the global atmospheric circulation to the space weather manifestations in a form of magnetosphere activity is not universal. It has been observed in certain regions and periods (after 1946). This selectivity, apparently, reflects the same necessity of a special threshold state of the local atmosphere needed for manifestation of atmospheric processes sensitivity to exposure, particularly, formed by the space weather. Convincing evidence of influence of the solar wind and geomagnetic activity on NAO index of global circulation was shown in the work of F. Boberg and H. Lundstedt (2002). Additional evidence of the space weather influence on the climate are presented in studies of [Lassen, Friis-Christensen, 1995; Fastrup et al., 2000; Shaviv, 2005; Harrison, Stephenson, 2006; Pudovkin, Raspopov, 1993; Dorman, 2009]. The possibility of nonlinear effects manifestation as a result of solar activity influence on climatic changes is considered in the study of [Ogurtsov et al., 2009]. **Locality and nonlinearity** of the reaction of high-altitude fluid flows in the region of tropopause on spectral changes in solar radiation caused by solar activity are shown in the study of [Haigh et al., 2010]. An additional contribution to the non-universal character of the relation between the space and Earth weather can be made due to variability of the phase portrait of different components of the space and Earth weather sensitive to different manifestations of the solar activity and/or states of global atmospheric circulation. An illustration of such instability can be found in the work of [Brázdil et al., 2010] about periodic disappearance of the relationship between NAO index and weather conditions in Southern Sweden while most of the time this relationship is observed. Let us especially emphasize the approach of [Ruzmaikin, 2007] to description of the Earth climate as a system that includes not one but a few states of dynamic equilibrium (phase trajectories attractors in the space of parameters that describe the system). These states are separated by boundary regions of metastable equilibrium. The system can move to the region of another attractor (of dynamic equilibrium) due to relatively small external disturbances (solar activity, volcanic emissions to the atmosphere, anthropogenic impact on the environment). For this transition, the phase trajectory needs to be in the boundary region when the external disturbance happens.

1.2.b. *The Earth Weather Influence on Harvest*

The fact of the harvest dependence on weather conditions is trivial and well-known. However, the threshold character of this dependence often is overlooked. For example, occasional light frosts in the period of blossoming or pouring rains at harvest can during a few days reduce productivity almost to zero. At the same time, average annual or monthly weather indices (of temperature, humidity, precipitation) for this region can remain almost the same. For various crops, the critical agrotechnical and weather conditions can be different. Thus, for the perennial crop like grapes high enough temperatures in the period of ripening is very important, and for annual grain crops the air humidity can be critical.

To minimize losses of harvest because of weather anomalies, the practice of long-term selection and zoning of the most suitable crops is used, as well as agrotechnologies optimal for type of weather prevailing in the region. However, it is this long-term crops zoning for standard weather that under conditions of fast climate change can cause a shift of dominating crops to the state of risky agriculture very sensitive to small local weather anomalies*. The importance of localized efforts to increase local adaptive capacity, take advantage of climate changes that may lead to increased agriculture productivity where this is possible, and to buffer the situations where increased stresses are likely, is underlined in the study of Thornton et al. (2009) who simulated cropping for Eastern Africa. A similar conclusion that climate change takes expression in local processes such as increased climatic variability, is made in the article of Head et al. (2011) using data of Australian wheat farming households.

1.3. Yield Deficit and Grain Market

In free market, the deficit of first-necessity goods (agricultural goods belong to this category, of course) causes price spikes that reduces the demand and brings the market to the state determined by the equilibrium between supply and demand. Shortages (or surpluses) can cause the market reaction in a form of panic when prices spikes (or slumps) make them much higher (or lower) than the equilibrium level**. Such market panic reaction can be revealed in the case of food deficit caused by bad yield because of local weather anomalies. The food prices bursts stimulate import from regions not stricken with the bad weather what serves to dampen prices and to restore the market equilibrium. This mechanism, however, not always works effectively. First, transport costs are included into the final price of agricultural products. Second, transfer of agricultural goods is restricted often by geographic, economic, and political barriers — relative market isolation, high customs, and low quotes protecting local producers***. **Thus, in the markets isolated from the external supply and/or needed to pay expensive transport costs****, there can be a panic reaction to the deficit of agricultural products, particularly, of grain, with burst price spikes.**

* Shifts in the opposite direction are possible when climate changes lead to an increase in productivity and a decrease in its variability for crops traditional in the region. This is the conclusion of the study of [Richter, Semenov, 2005] where the influence of possible climate changes on winter wheat yield in England and Wales is modeled.

** R. J. Shiller (1990) studied stock market crashes and “hot” real estate markets in USA and Japan. Most of the respondents in this study picked up the answer “There is panic buying, and price becomes irrelevant” explaining the burst in housing prices.

*** Other possible solution of the supply deficit and panic increase in vital goods prices (food, fuel) is imposition of a rationing system. In this system ration, cards distributed by the authorities are used to balance between supply and demand, and not prices (widely used in USSR and many European countries during and after the World War II).

**** Here is an example of influence of transport costs on the grain market: the difference between prices in Britain (importer) and in the USA (exporter) was reduced significantly in the end of the 19 century after beginning of wide use of inexpensive steamships for freight transport [Ejrnæs et al., 2008].

II. THE NECESSARY CONDITIONS AND POSSIBLE SCENARIOS OF AGRICULTURE MARKETS SENSITIVITY TO SPACE WEATHER ABNORMALITIES

II.1. Three necessary conditions for implementation of the relationship between space weather and the Earth prices

Summarizing the above analysis, we formulate the following three necessary conditions for a possible implementation of the causal relationship between anomalies of the space weather and grain prices bursts caused by them.

1. High sensitivity of weather (local — in space and time) to the space weather factors, for example — to cosmic rays, sun ultraviolet radiation, and magnetosphere activity).

2. High sensitivity of the major grain crops yield in the region to weather anomalies (belonging to a risky agricultural region) in the studied period.

3. High sensitivity of the grain market to the supply deficit due to limited import capacity that can cause burst (panic) price leaps.

II.2. Causal relationships between space weather and grain markets

The scheme in Figure 3 illustrates a possible chain of relationships that lead to the prices reaction to the unfavorable states of space weather in the regions where the above necessary conditions are fulfilled.

A specific feature of this scheme is existence of nonlinear sensitivity between selected elements of the scheme (imaged by bold arrows). In result, final connection “solar activity — price level” in terms of theory of catastrophes (Arnold, 1992) must be presented not as “hard dependence” like to $Y = \sum k_i X_i + Noise$, but as “soft

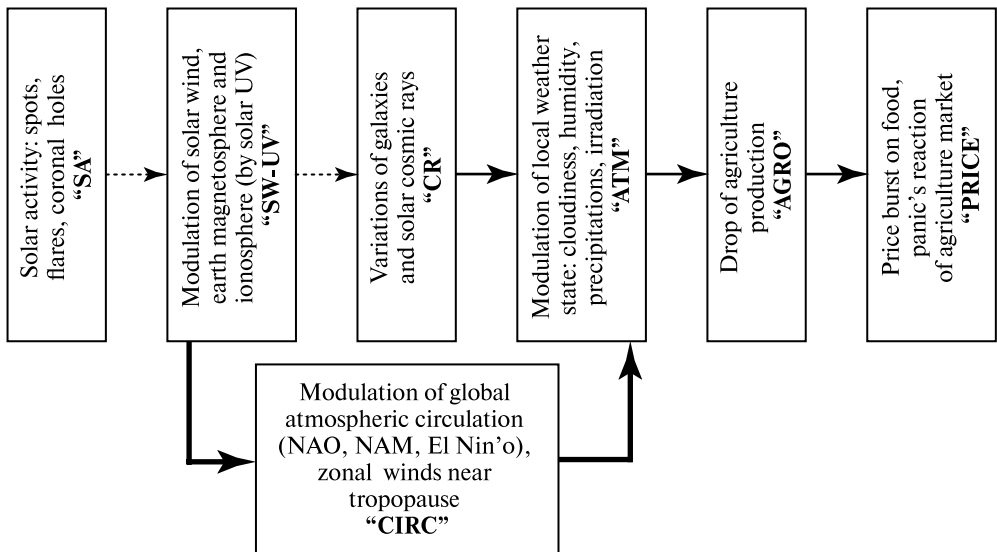


Figure 3. A possible causal chains between space weather and earth agriculture markets. Thin arrows — direct relations without threshold effects, bold arrows — non-linear relations and existence of threshold states

type dependence” $Y = \sum k_i(X_i, Y) * X_i(t - \tau) + Noise$ taking in account both feedback, possible phase delay and existence of external factors of influence caused by sources of another nature. Here X is vector of inputted variables (solar activity space weather state, conditions in the Earth atmosphere, market state); Y — output response (prices, social reaction); k_i — coefficients (functions) of connection; τ — phase delay.

II.3. Four possible scenarios of price reaction on space weather

In the frame of the proposed causal scheme, four variants of the agriculture reaction on space weather/local weather are possible for different climatic zones and for different crops. The proposed set of scenarios is based on cosmic rays as a modulation factor that initiates cloudiness, deficit of radiation, lower temperature and excess of participation. We would like to note here that possible space weather — earth weather relationship through the causal chain “cosmic ray” — “cloudiness” is not a unique channel of space weather influence. A full list of possible influence mechanisms is wider. In this paragraph, we limit our analysis by this only chain to illustrate possible scenarios of response that depend on local climate state and agriculture conditions.

All these scenarios are presented in Figure 4 and include:

A. Zone I of risky agriculture is sensitive to deficit of solar irradiance, cold weather and redundant rains. The most probable candidates are northern Europe, particularly England. The most unfavorable state of space weather/solar activity is a minimum of sunspots with minimal solar wind and maximal cosmic ray flux that

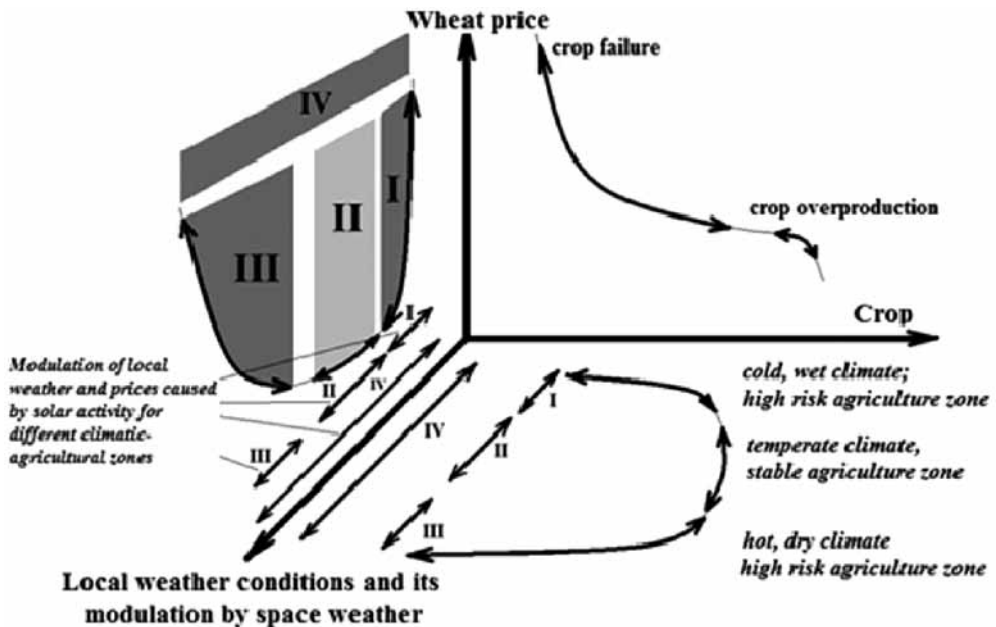


Figure 4. Four possible scenarios of responses of agricultural production and markets on possible modulation of local weather by solar activity/space weather

penetrate into the Earth's atmosphere and stimulate cloudiness formation in regions sensitive to this link (e.g., Northern Atlantic).

B. Zone II of risky agriculture is sensitive to dry and hot weather with droughts. The most probable candidates are southern Europe and the Mediterranean (Italy, Spain, North Africa). The most unfavorable state of space weather/solar activity is a maximum of sunspots with maximal solar wind and minimal cosmic ray flux that diminishes cloudiness formation above Atlantics.

C. Zone III includes specific cases of risky agriculture which is sensitive either to a deficit of precipitation (droughts) or to excess rains/cloudiness. This situation may take place in zones with the climate unfavorable for agriculture where it can succeed only in a very narrow range of weather condition (rains, temperature, humidity, solar irradiation). In this specific situation we can expect unfavorable conditions for agriculture production both in maximum and minimum states of solar activity. A possible candidate is Iceland in the 18th and 19th centuries.

D. Zone IV where agriculture is not risky and its sensitivity to local weather fluctuations is relatively low. This situation leads to a neutral reaction of the agriculture market on the space weather and the phase of solar activity. The most probable candidate is Central Europe.

These four types of reactions describe possible scenarios of causal chains between the space weather and the Earth agriculture production for the suggested relationship “cosmic ray” — “cloudiness”. Our analysis aims to reveal examples of the above scenarios in specific regions and historical periods in Europe and North America.

Accordingly to the above description, we may expect systematical price bursts in solar minimum states for cold and wet regions (zone I in Figure 4). Similar price bursts are expected in hot and dry regions in states of solar maximum (zone III on Figure 4). For these two cases a typical time interval between price bursts is caused by a period of solar activity — 9...13 years. For specific regions, crops sensitive both to excess of participation and to its deficit (zone IV) can fail, and thus price bursts are possible both in minimal and maximal states of solar activity with typical time intervals between price bursts close to half of a solar cycle period — 4...6 years. The same typical time of price bursts can be caused by a formal mixing of data from different zones with opposite type of price reaction into one joined series. The example of this situation can be found in the work of [Beveridge, 1921] where the “Beveridge index of price“ was calculated by averaging price indexes for approximately 50 markets from Western and Central Europe with different type of market's reaction on space weather (see part 2). In this work, Fourier response was revealed on periods 4...5 years.

In Part 2 of this article, we describe sources of observational data, used in our analysis, discuss methods of statistical analysis relevant for search of space weather influences on market's reaction, and apply described approach to specific zones and historical periods for the identification of influence of the space weather on prices. We analyze possible input of space weather factor to statistics of famines in Iceland in 19-th century and show that in this case role of space weather is high reliable.

REFERENCES

- [Пудовкин, Распопов, 1993] *Пудовкин М. И., Распопов О. М.* Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат // *Успехи физ. наук.* 1993. Т. 163. № 7. С. 113–116.
- [Arnold, 1992] *Arnold V. I.* Catastrophe Theory. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [Azariadis, 1981] *Azariadis C.* Self-Fulfilling Prophecies // *J. Economic Theory.* 1981. V. 25. P. 380–396.
- [Beveridge, 1921] *Beveridge W. H.* Weather and Harvest Cycles // *Economic J.* 1921. V. 31. P. 429–453.
- [Boberg, Lundstedt, 2002] *Boberg F., Lundstedt H.* Solar Wind Variations Related to Fluctuations of the North Atlantic Oscillation // *Geophysical Research Letters.* 2009. V. 29. N. 15. P. 13.
- [Brázdil et al., 2010] *Brázdil R., Dobrovolný P., Luterbacher J., Moberg A., Pfister C., Wheeler D., Zorita E.* European climate of the past 500 years: new challenges for historical climatology // *Climatic Change.* 2010. V. 101. P. 7–40.
- [Dorman, 2009] *Dorman L. I.* Ch. 3. The Role of Space Weather and Cosmic Ray Effects in Climate Change // *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth* / Ed. Trevor M. Letcher, Elsevier, 2009.
- [Ejrnæs et al., 2008] *Ejrnæs M., Persson K. G., Rich S.* Feeding the British: convergence and market efficiency in the nineteenth-century grain trade // *The Economic History Review.* 2008. V. 61. N. s1. P. 140–171.
- [Fastrup et al., 2000] *Fastrup B., Pedersen E., Lillestol E.* et al. (CLOUD Collaboration). A study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS: Preprint CERN/SPSC. 2000-021, SPSC/P317. (see also: http://cloud.web.cern.ch/cloud/documents_cloud/cloud_proposal.pdf)
- [Georgieva, Kirov, 2011] *Georgieva K., Kirov B.* Solar dynamo and geomagnetic activity // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2011. V. 73. Iss. 2–3. P. 207–222.
- [Haigh et al., 2010] *Haigh J. D., Winning A. R., Toumi R., Harder J. W.* An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate // *Nature.* 2010. V. 467. N. 7. P. 696–699.
- [Harrison, Stephenson, 2006] *Harrison G., Stephenson D.* Empirical evidence for a non-linear effect of galactic cosmic rays on clouds // *Proc. Royal Society A.* 2006. V. A 462. N. 2068. P. 1221–1233. doi: 10.1098/rspa.2005.1628.
- [Head et al., 2011] *Head L., Atchison J., Gates A., Muir P.* A Fine-Grained Study of the Experience of Drought, Risk and Climate Change Among Australian Wheat Farming Households // *Annals of the Association of American Geographers.* 2011. V. 101. N. 5. P. 1089–1108.
- [Herschel, 1801] *Herschel W.* Observations Tending to Investigate the Nature of the Sun // *Order to Find the Causes and Symptoms of its Variable Emission of Light and Heat.* *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* 1801. V. 91. P. 261–331.
- [Jevons, 1875] *Jevons W. S.* Influence of the Sun-Spot Period on the Price of Corn // *Nature.* 1875.
- [Jevons, 1878] *Jevons W. S.* Sun-spots and Commercial Crises. Pt. 1 // *Nature.* 1878.
- [Jevons, 1879] *Jevons W. S.* Sun-spots and Commercial Crises. Pt. 2 // *Nature.* 1879.
- [Kirkby et al., 2011] *Kirkby J.* and CLOUD collaboration **Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol formation** // *Nature.* 2011. 10343. V. 476. P. 429–433.

- [Lassen, Friis-Christensen, 1995] *Lassen K., Friis-Christensen E.* Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1995. V. 57. P. 835–845.
- [Lukianova, Alekseev, 2004] *Lukianova R., Alekseev G.* Long-Term Correlation between the NAO and Solar Activity // *Solar Physics*. 2004. V. 224. N. 1–2. P. 445–454.
- [Marsh, Svensmark, 2000] *Marsh N.D., Svensmark H.* Low cloud properties influenced by cosmic rays // *Physical Review Letters*. 2000. V. 85. P. 5004.
- [Ogurtsov et al., 2003] *Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Nagovitsyn Yu.A.* Solar Cyclicity during the Maunder Minimum // *Astronomy Reports*. 2003. V. 47. Iss. 6. P. 517–524.
- [Renaker, 1979] *Renaker D.* Swift's Laputians as a Caricature of the Cartesians // *Modern Language Association*. 1979. V. 94. N. 5. P. 936–944.
- [Richter, Semenov, 2005] *Richter G.M., Semenov M.A.* Modeling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales — assessing drought risks // *Agricultural Systems*. 2005. V. 84. N. 1. P. 77–97.
- [Ruzmaikin, 2007] *Ruzmaikin A.* Effect of solar variability on the Earth's climate pattern // *Advances in Space Research*. 2007. V. 40. P. 1146–1151.
- [Shaviv, 2005] *Shaviv N.J.* On Climate Response to Changes in the Cosmic Ray Flux and Radiative Budget // *J. Geophysical Research. Space Physics*. 2005. V. 110. N. A8. P. A08105.
- [Shiller, 1990] *Shiller R.J.* Speculative Prices and Popular Models // *J. Economic Perspectives*. 1990. V. 4. N. 2. P. 55–65.
- [Smith, 1776] *Smith A.* *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. L.: W. Strahan & T. Cadell, 1776.
- [Soon, Yaskell, 2003] *Soon W., Yaskell S.* *The Maunder Minimum and the Variable Sun-Earth Connection*. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [Svensmark, Friis-Christensen, 1997] *Svensmark H., Friis-Christensen E.* Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships // *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*. 1997. V. 59. P. 1225.
- [Swift, 1726] *Swift J.* *Gulliver's Travels*. Pt 3. A Voyage to Laputa, Balnibarbi, Luggnagg, Glubbdubdrib, and Japan. 1726.
- [Thornton et al., 2009] *Thornton P.K., Jones P.G., Alagarswamy G., Andresen J.* The temporal dynamics of crop yield responses to climate change in East Africa // *Global Environmental Change*. 2009. V. 19. P. 54–65.

Part 2. SOURCES OF DATA, METHODS OF ANALYSIS AND RESULTS OF APPLICATION TO MEDIEVAL EUROPE, MODERN USA AND FAMINES IN ICELAND

In part 1 of this article a possibility of a causal relationship between space weather and agricultural prices has been analyzed. Three necessary conditions for realization of such relationship and four possible scenarios of its revealing for different climatic zones are described. In the part 2 wheat price dynamics in 22 European medieval grain markets has been analyzed, particularly during the period of Maunder minimum. We show with high reliability that in this sample we observe realization of different scenarios of space weather influence on wheat prices in different regions. Main manifestations of this influence are observed in statistics of intervals and price asymmetry correlated with phase of solar activity. The effect of prices phase asymmetry is discovered even in the modern age in USA for hard wheat “durum”. For Iceland of 18–19th centuries we study manifestation of space weather influence on famines and death toll as extreme form of the reaction on food deficit. We show that all 6 events of mass population decrease are synchronized with moments of extremum of solar activity. The confidence level of the discovered correlation of famines events with extremum states of solar activity in phase space is >99.5 %. Possible consequences of global climate change for sensitivity of risky agricultural regions to the space weather are discussed.

I. MATERIALS AND METHODS

I.1. Data used for analysis

I.1.1. *Data on solar activity*

The main source of data on solar activity that is the driver of space weather is “sunspot number”. In spite of starting observations in 1611 after Galileo discovered these numbers, the further minimum of Maunder interrupted regular sunspot observations. Regular and daily sunspot observations were renewed by several scientists only in the 18th century after solar activity returned. It allowed constructing a catalog of solar activity (sunspots numbers) from 1700 up to present time*. **Later, sunspot data were restored for the previous period (the 17th century) using days when any manifestations of sunspots were observed on the Sun episodically**.**

Another approach used for estimation of solar activity in the period of Maunder Minimum and the previous period is an indirect method of restoration of the solar activity level based on the measurement of isotope Be¹⁰ in the Greenland ice [Beer et al., 1998]. Although this method cannot give reliable quantitative estimation of sunspot numbers themselves, it enables identifying moments of maximal and minimal states of solar activity. We would like to note here that the data based on Be¹⁰ measurement are sensitive directly to cosmic ray flux penetrated into atmosphere that is much more important than sunspot numbers. Cosmic rays are an agent of direct influence of space weather on atmospheric processes, controlled ionization and vapor condensation. On the opposite, the causal chain from sunspots to atmospheric

* <http://sidc.oma.be/DATA/yearssn.dat>.

** Results of restoration are discussed in [Ogurtsov et al., 2003; Nagovitsyn, 2007] and presented in free FTP site of NOAA/NGDC: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sunspot_numbers/ancient_data/earlyssn.dat.

process includes a lot of intermediate elements (solar wind, state of Earth magnetosphere and global atmospheric circulation). These intermediate elements in the causal chain are able to mask a possible link between sunspots and local atmosphere states.

1.1.2. *Data on agriculture markets (wheat prices)*

The first data on wheat price used by William Hershel for his analysis was published in the famous work of Adam Smith “An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations” [Smith, 1776]. The most full and reliable database on wheat prices in the Middle Age England was created one hundred years later as a result of selfless work of a great economist and statistician Prof. J. E. T. Rogers [Rogers, 1887].

His database:

1. Cover the period from 1259 to the middle of the 18th century.
2. Uses only price data for wheat purchased by monasteries and colleges that enjoyed from tax exemption in this period. This circumstance made unnecessary “tax optimization” considerations during registration of the transactions that increased reliability of this data source.

In addition to data on wheat prices, in our analysis we use the 700 years database [1264–1954] on consumable basket prices [Brown, Hopkins, 1956].

An additional database that we used was an archive of wheat prices for 90 wheat markets of Middle Age Europe. We used the fullest part of the database from the period of 1590–1702 that covered the period of Maunder Minimum and the small Ice Age in Europe. The source of this database is the International Institute of Social History [International..., 2005].

To search for possible manifestations of space weather influence on agriculture markets in the New Time we used data of Agriculture Department of USA for the period of 1866–2002 of “durum” wheat prices (durum wheat is used for bread and bakery).

We used also the comparative analyses of wheat production and wheat prices in Middle Age England and France [Appleby, 1979]; the wheat prices analysis for Middle Age England from the article of W. H. Beveridge (1921); the analysis of the correlation between local weather and crops in the end of 19th century — first decades of 20th century from the work of Hooker (1907); analysis of wheat production in USA during first decades of 20th century from the article of H. Arctowski (1910).

To analyze a possible influence of forage crop failure on drop of livestock in Iceland 18–19th centuries that in turn caused famine and increased mortality toll we used the work of D. A. Vasey (2001).

1.2. Methods of analysis

The main difficulties in search for response of agriculture indices used as indicators of possible relationships, on abnormal states of space weather/solar activity are caused by the following two factors:

1. Solar cycles of activity as a generator of variations in space weather is not stable both in frequencies of variations and in amplitudes of cycles. Time intervals between minimums of solar activity (a cycle period) change in a wide interval from 8

to 15 years. The amplitude of cycles described as Wolf numbers changes from tens to hundreds and often decreases to zero on periods of a few tens of years.

2. Solar activity includes different components (sunspots, flares, coronal holes) formed by different elements of dynamo process or by their combinations (poloidal and azimuthal magnetic fields under photosphere, convection, differential rotation and meridional circulation). As a result, different components of solar activity have different phase patterns (change with phase during cycle) and their behavior during a cycle of activity changes. For example, input of coronal holes (and recurrent fluxes in solar wind accelerated from coronal holes) to space weather is maximal in minimum state of solar activity and is absent in maximal state. Solar flares of small amplitude have a very good correlation with sunspot numbers but for big solar flares with coronal mass ejections and acceleration of strong proton fluxes the situation is much more complicated and dynamic. The distribution of proton flares changes from cycle to cycle radically, and for some cycles their frequency is maximal not in the maximum of sunspot number but predominantly in the phase of rise or decay of sunspot activity (Shea and Smart, 1992). Additional difficulties are caused by instability of a relative input of different components of solar activity into space weather formation. It explains, for example, the observed drastic change during the last 100 years in the phase pattern of geomagnetic activity as a result of the change of relative input of coronal holes and sunspot during dynamo process in the Sun [Georgieva, Kirov, 2011; Kishcha et al., 1999].

3. The impact of space weather factors on the Earth atmosphere has a place on the background of complex and yet not explained global atmospheric circulation with effects of long-range action*, phase instability and possible transitions like a strange attractor [Ruzmaikin, 2007].

4. Influence of the space weather on the local weather and on agriculture markets, if it has place, must happen on the background of another factors of influences that act simultaneously with space weather factors. These influences may have a comparable amplitude and may have both random and regular nature with periodical components on the same times as space weather (10...20 years). As examples, we may refer on climate variations, political or military events that lead to economic shocks, scientific and technological revolutions.

This situation makes use of classical statistical methods non-effective. As an example, we can mention methods aimed at selection of a harmonic signal (Fourier analysis, periodogram analysis) with a selected period (for example, 11-year period), or at search for a direct linear relationship (regression or correlation analysis). It means that to search for a space weather influence we have to use another methods and statistics, much more robust to variability of period of solar cycle and amplitude of solar activity, to non-stability of atmospheric circulation and other external factors.

In the frame of our approach we may use the next robust statistics:

1. Comparison of interval statistics both between price bursts and between extreme states of solar activity (minimums, for example).

* This effect may be illustrated by a situation when a local weather cataclysm like El-Nino near the west coast of South and Central America leads to a drastic weather response in the opposite side of the Earth in North Atlantic as a result of the atmospheric and oceanic mass and heat transfers. There are researchers that claim a relationship between solar activity and El Nino is possible [Ruzmaikin, 1999].

2. Search of a systematical phase asymmetry of wheat prices in “favorable” and “unfavorable” states of space weather/solar activity.
3. Regression analysis that uses dichotomous “dummy” variables “yes”/”no” related to the solar activity state (for example, “yes” or “no” for the minimum of solar activity).

In some regions, we must take into account a possibility of “long-range action” when regions located far from a region of space weather influence on the earth weather may be nevertheless sensitive to space weather action as a result of global circulation and cyclonic transfer of formed clouds over thousands kilometers (for example, from North Atlantic to East Siberia).

Another effect that we have to take into account is a possible phase delay in price reaction on “unfavorable” states of space weather. These delays may be caused by reserves of the crop from the previous yield and by a natural inertia of agricultural markets.

Sensitivity of agriculture production to local weather conditions may be much higher in a case when a crop is concentrated in a compacted region with a certain type of weather conditions than in a case of a crop dispersed through thousands of kilometers with different climate conditions in different regions and, accordingly, with different (or even opposite) type of sensitivity to external factors.

These are factors and parameters we take into account in the analysis of data for different regions in different historical periods that meet the above defined criteria

II. RESULTS

II.1. Wheat markets sensitivity to space weather in Medieval England

Medieval England is an ideal testing region for searching for manifestations of space weather influence on agricultural prices. In this period, this region met all three the above mentioned conditions necessary for this relationship to be realized.

1. The weather in the region depends on the space weather factors in the zone of cloudiness formation in the North Atlantic that is sensitive to the cosmic rays variations during changes of solar activity.
2. The region belonged to the zone of risky agriculture, particularly, for wheat that is highly sensitive to weather anomalies in the vegetation period.
3. Relative isolation from European markets amplified price reaction to shortage in grain.

Another advantage of using this region in the research is availability of the reliable data collection of grain prices from 1259 to the 18th century due to the distinguished effort of Prof. J.E. T. Rogers (1887). The initial curve of the changes of yearly wheat prices is presented in Figure 1a.

To search for space weather influences we used the above described methods of comparison between statistics of intervals and of search for price asymmetry.

First, we compared statistics of intervals between wheat price bursts and of intervals between states of solar activity minimum [Pustil'nik, Yom Din, 2004a, b]. The statistics were compared both for the distributions of the intervals by length (Figure 1b) and for statistical characteristics of these distributions (average length of the intervals, medians, standard deviations — Table 1).

It follows both from the results in Table 1 for statistical characteristics and from the histograms of these characteristics (see Figure 1b) that the hypothesis that the distributions of intervals for wheat price and consumer basket price bursts and the distribution of solar activity minimums are not different one from another is significant (99 %).

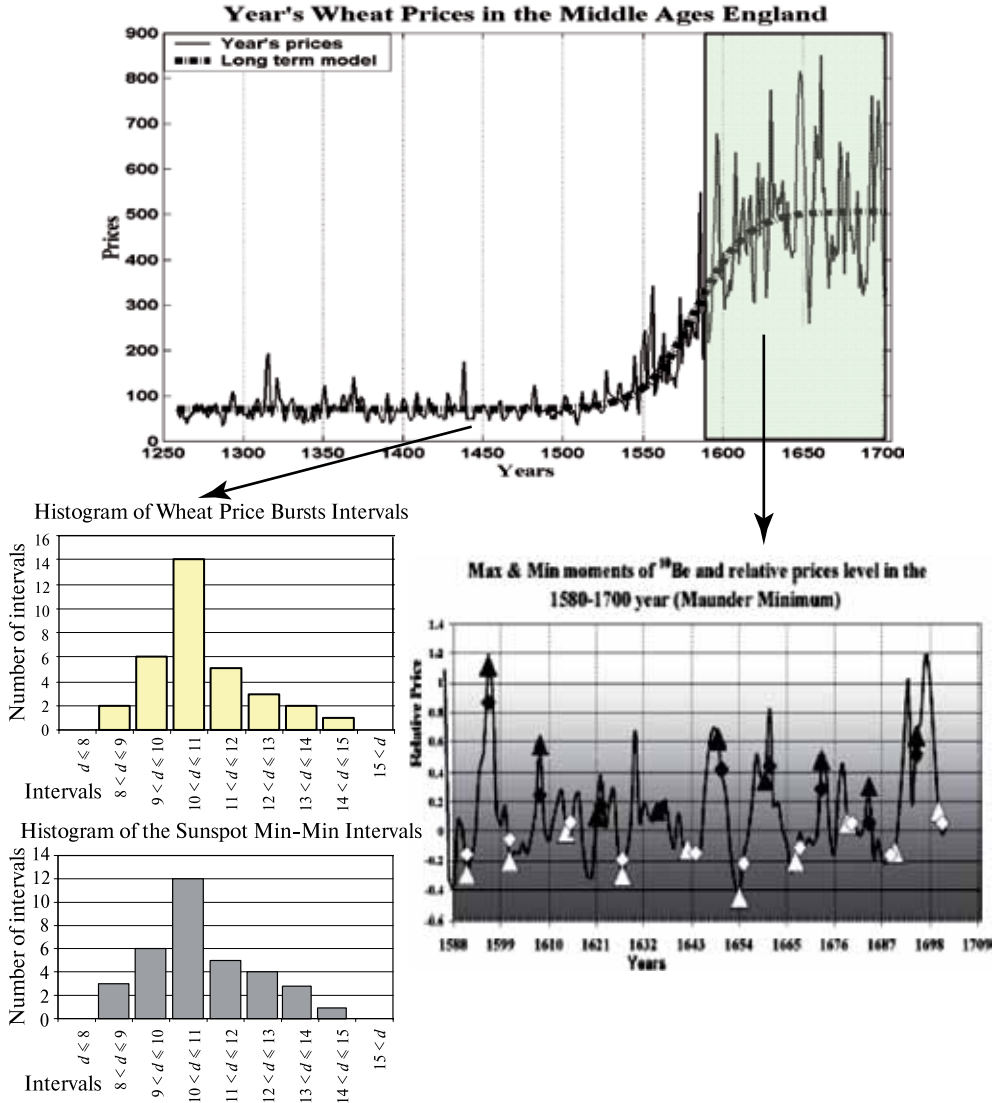


Figure 1. Wheat prices in Medieval England smoothed by a logistic function (a); comparison of histograms of intervals between minimal states of solar activity and of intervals between wheat price bursts. The range of intervals is 8...16 years. For both histograms the maximum is achieved in the point of 11 years (b); price asymmetry in states of minimum/maximum of solar activity identified by the method of Be^{10} in Maunder Minimum: white triangular are prices in states of maximum, white diamonds are prices average for three years that include the state of maximum, black triangular and diamonds are prices defined similarly for states of minimum of solar activity (c)

Table 1. Statistical characteristics (average, median, standard deviation) for two samples of intervals between price bursts (wheat price and consumer basket price) and for the sample of intervals between minimal states of solar activity

Samples	Median	Average	Standard deviation
Min-Min intervals for sunspots	10.7	11.02	1.53
Intervals between wheat price bursts	11.00	11.14	1.44
Intervals between consumer basket price bursts	11.00	10.5	1.28

Highly significant price asymmetry for minimum and maximum states of solar activity in the period of Maunder Minimum is another evidence of the space weather influence on wheat prices in Medieval England (Figure 1c). As it can be seen in this figure, wheat prices in years of solar activity minimum are higher (on the average, twice as many) than prices in years of the nearest solar activity maximum for all nine cycles of solar activity. In this examination, the significance level is 99 %, too.

These results show that realization of the above described causal chain between the space weather and grain markets is possible for the case study of Medieval England. The observed market reaction corresponds to case I (zone of risky agriculture sensitive to deficit of solar irradiance, cold weather and redundant rains) described in Part 1, Section II.2. The results are in good agreement with those expected for this climatic zone.

II.2. Wheat markets sensitivity to space weather in Medieval Europe

In the next stage of the analysis we tried to answer the following question. Is the discovered sensitivity of the grain markets in Medieval England a universal feature for all markets in the earth (like dependence of the same prices on the seasonal “winter–summer” changes) or this feature realizes only in isolated zones and in certain historic periods when the three necessary conditions for the causal chain “space weather” – “earth prices” (see Part 1, Section II.1.) are satisfied? To answer the question we fulfilled regression analysis of data from 22 European grain markets that were presented by relatively full data from all markets in the database of the International Institute of Social History [International..., 2005].

We used the well-known method of regression analysis with dummy variables (first introduced by [Suits, 1957])* . In our study we used this method for establishing relationships between states of grain markets with states of minimum or maximum of solar activity. We tested the hypothesis of existence of such relationship between solar activity and prices, and estimated its significance for samples for markets from different European zones. For this purpose, we introduced a dummy variable d_{\min} that takes a value 1 in the years of solar activity minimum, and a value 0 otherwise. In a similar way, we introduced a dummy variable d_{\max} for years of solar activity maximum. In a certain way, this method develops the method of the direct search for the price asymmetry of minimal and maximal phases of solar activity used above for the wheat market in Medieval England (see Figure 1c). However, the method of dummy variables is more accurate and enables clear estimating of the significance level of the hypothesis about existence of such phase asymmetry.

* These variables describe qualitative data, for example, of the kind “yes” – “no”.

For our analysis we used the period of 1590–1702 that includes the Maunder Minimum when the solar activity fell sharply. The following two reasons led to choose this period.

1. Europe went through a little ice age in this period. A considerable part of areas moved to risky agriculture zones with an increased influence of weather anomalies on grain production.
2. Only for this period special measurements of the isotope Be^{10} were carried out to reflect directly contribution of cosmic rays that are a probable factor of influence on weather [Beer, 1998]*.

We present significance level of the influence of minimal and maximal states of solar activity on wheat prices for a number of markets in Figure 2 where the Europe map of precipitation is shown.

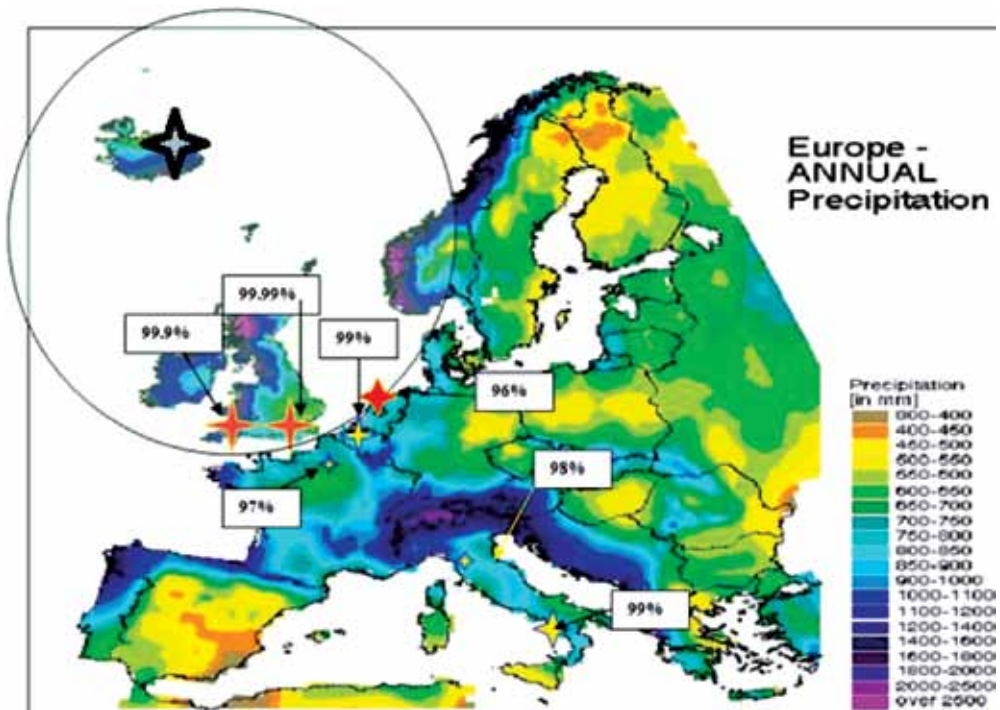


Figure 2. The Europe map of precipitation presented climate zones distribution. Localization of wheat markets that show high sensitivity to the space weather and its significance level, are shown. Red stars show markets sensitive to states of minimal solar activity (London, Exeter — England; Leiden — the Netherlands), yellow stars show markets sensitive to states of maximal solar activity (Napoli, Bassano — Italy). The stars size corresponds to the significance level

* Additional analysis for other periods using regression with dummy variables showed a significant relationship between solar activity extrema and wheat prices in England up to 1840's. Weak market sensitivity to the space weather after this period we explain by a sharp increase of the grain import — from 5...8 % during 1801–1840 up to 17–18 % beginning from 1841 [Ejrnæs et al., 2008]. This growth of import broke the causal chain in the part “sensitivity of the isolated market to supply shortage”.

As it is shown in this figure, in the researched period all grain markets in England were highly sensitive (larger than 99 %) to space weather states of both minimal (d_{\min}) and maximal (d_{\max}) solar activity. The wheat market in Leiden, the Netherlands, where climate is similar to England, was sensitive (95 %) to solar activity minimums, too. At the same time, some of the markets in Belgium, France and especially in Italy (Napoli, Bassano) demonstrated high sensitivity to solar activity maximums.

Because modulation of cloudiness in the North Atlantic by a cosmic rays flux is one of the channels of the possible influence of the space weather on the Earth weather, one can expect excess precipitation and deficit of solar radiation (unfavorable for agriculture in cold and damp climate) in states of minimal solar activity. At the same time, the cosmic rays flux and the related cloudiness drop in states of maximal solar activity, and draughts are possible. The latter are unfavorable for agriculture in the South Europe influenced by hot and dry North Africa climate, especially in Italy and Spain.

These results show that the observed sensitivity of wheat markets to the space weather is not a universal property invariable for all regions and periods. On the contrary, depending on satisfaction (full or partial) of the above formulated conditions (Part 1, Section II.5) a few cases are possible.

1. Any influence of the space weather/solar activity cannot be observed (for most markets of Central Europe).
2. Highly significant sensitivity to states of minimal solar activity is observed (England and neighboring markets of the continental Europe).
3. Significant influence of states of maximal solar activity in zones sensitive to draughts is observed (particularly, in Italy influenced by North Africa climate).

Thus either the observed distribution of zones sensitive to the space weather or the sign of this sensitivity are in good agreement with the above described scheme of the causal relationships between the space weather and grain markets.

II.3. The US wheat market sensitivity to the space weather in 20th century

The previous analysis regarded grain markets in the Middle Ages or in the very beginning of the New Time. Our next question is whether the above described scenarios of the space weather influence on Earth markets can be observed in the New Time? From the first glance, the all over the world implementation of modern agro techniques methods that increase the plant resistance to unfavorable weather, should cause breaking the second condition — belonging to risky agriculture zone (see Part 1, Section II.1) — necessary for the above influence. Another factor of suppressing a possible sensitivity of grain markets to external anomalies is globalization of the world economics in the 20th century. This process made it easier in a drastic way to access external supply for markets with supply deficit. Nevertheless, we decided to analyze the US grain market in the New Time searching for possible manifestation of the space weather influence on prices. For this purpose, we used wheat prices from the period 1908–1993 based on data of USDA (2004). Wheat price variability for the researched period is shown in Figure 3.

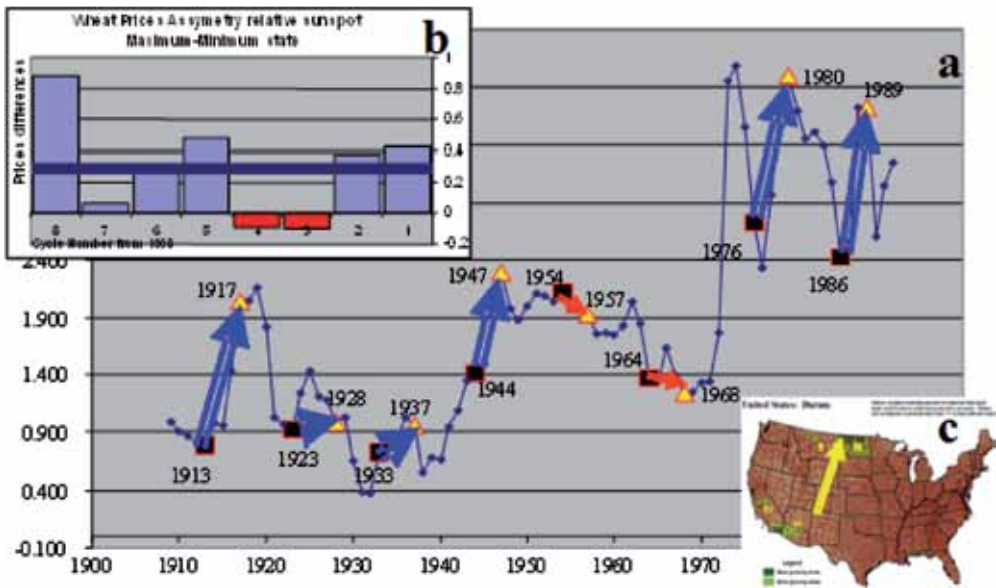


Figure 3. Changes in durum wheat prices in USA in the period 1908–1993. Blue points and lines show price dynamics, yellow triangular — years of solar activity maximums, black squares — years of solar activity minimums, blue double arrows — price changes from a solar activity minimum to the next maximum (a); histogram of price asymmetry = a price difference between the maximum and the predecessor minimum of solar activity — depending on number the solar activity cycle (b); high concentration of the durum wheat crop: more than 2/3 of the harvest area is concentrated in 3 % of the USA area, in the state of North Dakota (c)

The small sample that includes only 8 solar activity cycles does not enable researching statistical properties of the intervals between price bursts as this was made for Medieval England where the 500 years statistics is available. In this situation we can hope only that the phase asymmetry of prices can be revealed with significant differences between prices in states of maximal and minimal solar activity. Indeed, for the researched sample a significant price asymmetry for maximums and minimums of solar activity is observed (see Figure 3): prices in states of maximal solar activity are systematically higher than prices in states of minimal solar activity.

To estimate significance level of this asymmetry we used the Student criterion. For the average price asymmetry $\overline{\Delta Price} = 0.29$ (as it is defined in the legend of Figure 3b) and standard deviation $s(\Delta Price) = 0.12$ the significance level for rejecting the zero hypothesis of asymmetry is 97 %. Therefore, for the researched sample of wheat prices in USA one can infer that even in the New Times a significant influence of the space weather on agricultural markets is observed though the significance is a bit lower that that for observations during the Maunder Minimum (see Figure 1c). This unexpected, to some extent, result can be explained, maybe, by a very high concentration of the durum crop in a small area in North Dakota on the border with Canada (see Figure 3c). This zone is influenced by the North Atlantic Oscillation (NAO) that, in turn, is sensitive to the space weather.

Using the method of regression with dummy variables gave a similar significance level of 96 % for the relationship “solar activity – prices” (see Section II.2).

II.4. Manifestation of space weather influence on famines and death toll: a case study of Iceland of 18–19 centuries

One of the most tragic manifestations of sharp rises of grain prices caused by poor harvest under adverse weather conditions is famine and mortality from it. The above described effect of the space weather influence on the Earth weather that becomes apparent in a form of bad harvest and grain price rises, generally speaking should remain a trace in this sad statistics too. Obviously, such manifestation of the space weather can take place only in that regions and periods for which all three necessary conditions of the relationship “space weather” – “agricultural prices” take place. We chose Iceland of 18–19 centuries as a possible region for searching for such manifestations*.

The key source of data about bad feed harvest and the caused cases of decrease in population is the work of the US researcher D. A. Vasey (2001). As this is shown in this work, all periods of decrease in population of Iceland coincide with falls in livestock caused by bad feed harvest. The appropriate famine periods are marked by black squares in Figure 4.

It is striking that the periods of famine years always coincide or close to extremes of solar activity (minima or maxima). To examine this hypothesis we marked out the periods of cycles around famine years. These periods were marked out from minimum to minimum for events that happened during the period of the cycle maximum, and on the opposite, from maximum to maximum for events that happened during the period of the cycle minimum. To combine data from various cycles that differ one from another in duration and amplitude, in one homogeneous sample, sunspots numbers were normalized in relative amplitudes and times were normalized in relative phases of the cycle. For this purpose, for events close to the cycle maximum the normalized amplitude y_{norm} was defined as deviation from the minimal value normalized by the range of changes during the cycle:

$$y_{norm} = \frac{ssn_i - ssn_{min}}{ssn_{max} - ssn_{min}}, \quad (1)$$

where ssn_i is a sun spots number in year I ; ssn_{min} is a number of sun spots in year of minimum; ssn_{max} is a number of sun spots in year of maximum, and for events in the

* The reasons for choosing just this region and period are as follows:

A. Location of Iceland in the region subject to weather fluctuations sensitive to the space weather factors (cosmic rays-cloudiness, North Atlantic Oscillation) corresponds to the first necessary condition from II.5.

B. Iceland belonged to a risky agricultural region because of specific features of that time agriculture very sensitive to weather. In the researched period, animal husbandry fully dependent of pasture harvest was a major source of food, and not coastal fishery as it was in the later time. Iceland pastures are considered one of the best in Europe due to a long solar day in the short period of the cool summer. Thus, at those time the agriculture of the country was very sensitive to weather conditions (cloudiness, precipitations), and through them to the space weather. Let us emphasize that in the situation of Iceland the reason for bad feed harvest could be both in excess of precipitations and deficit of solar radiation, and in deficit of precipitation and draught (similar to case IV in Figure 4 in Part 1). Thus for Iceland of that time we could expect a negative reaction to both extreme states of the solar activity (either minimum or maximum).

C. Obvious isolation of Iceland in the researched period from major agricultural markets supply from whom could temper the impact of bad harvest.

neighborhood of the cycle minimum the absolute value of deviation from the maximal value was used, also normalized by the range of changes:

$$y_{norm} = \frac{SSN_{max} - SSN_i}{SSN_{max} - SSN_{min}}. \quad (2)$$

The times t_i were recalculated as cycle phases Φ_i according to the following formula:

$$\Phi_i = \frac{|t_i - t_{ext}|}{T_{cycle}}, \quad (3)$$

where t_{ext} are times of minimum or maximum of the cycle where famine has had happened; T_{cycle} is duration of the cycle.

Normalized phase data for 6 cycles during which mass population decrease happened because of bad harvest and famine, are united in a sample presented in Figure 5. As it is seen in this figure, all 6 events of population decrease because of famine in Iceland in the period 1784–1900 are concentrated in a small part ($\Delta\Phi_0 = 20\%$) of the phase space of sun cycle around the cycle extremums (maximum or minimum). From other side our binding of observed famine events to nearest extremums of solar activity (both maximum and minimum) constrict volume of independent phase space twice, recalculated part of phase interval included all famine's events must be corrected as $\Delta\Phi^* = 2\Delta\Phi_0 \leq 0.4$. Probability of the random realization of such accurate phasing of two independent processes is estimated as $P = (0.4)^6 \approx 0.004 < 0.5\%$.

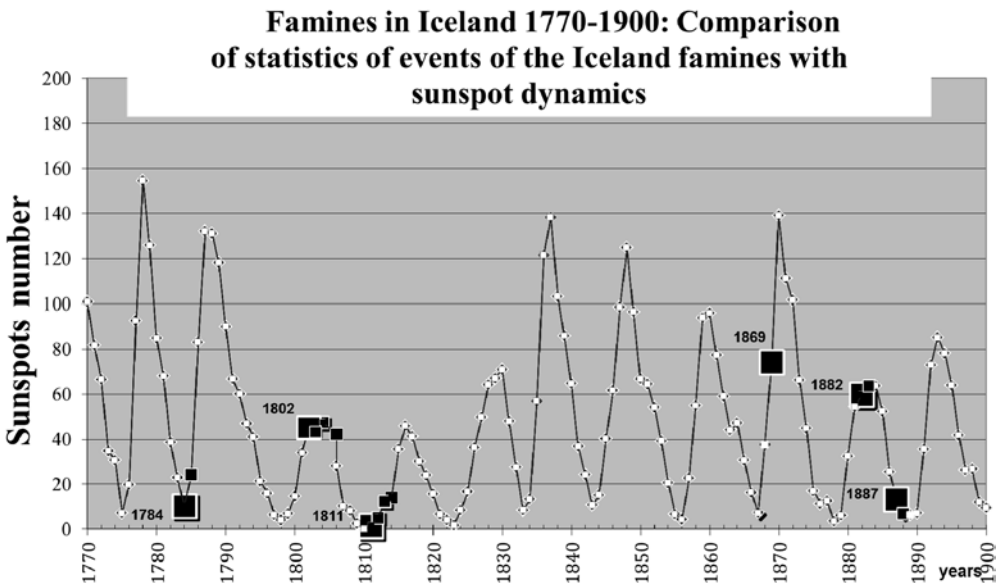


Figure 4. A relationship between solar activity and periods of human population decrease in Iceland of 18–19 centuries (caused by falls in livestock in result caused by bad feed harvest caused by weather abnormalities) on the curve of sunspots number changes in 1780–1890 years; black squares mark years of years of population decreases, big black squares mark start of famines

The revealed phase linkage of the periods of famine because of weather anomalies in Iceland, to the solar activity extremums enables to claim about the highly significant manifestation of the negative influence of the space weather/solar activity on the state of the agricultural market in the region at the researched period.

III. CONCLUSION AND DISCUSSION

III.1. Conclusion

In this study the model of a possible influence of the space weather on the agricultural markets is presented based on the causal chain “space weather” – “earth weather” – “agricultural production” – “market prices”.

1. It is shown that realization of this causal chain demands simultaneous satisfaction of several necessary conditions for specific zone and period. The influence of the space weather on agricultural markets is not a universal phenomenon, but, in opposite, has place only in that zones and historical periods when and where all necessary conditions are satisfied (atmospheric, agro, market).

2. A manifestation of this influence for the case of Medieval England is shown, particularly, for the period of the Maunder Minimum.

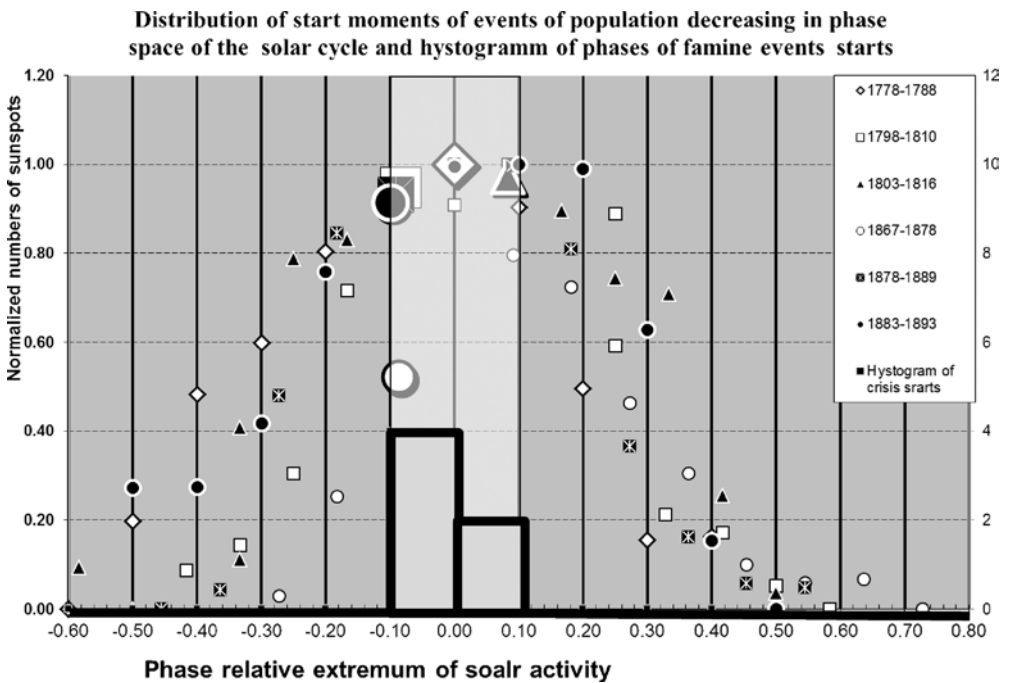


Figure 5. A phase diagram of the result of superposition of 6 solar activity periods during which fall in population happened because of the famine caused by decrease in livestock. In the horizontal axes phases of the cycle related to the cycle extremes (maximum or minimum), small marks show normalized sunspot numbers for different cycles (time intervals for different cycles are different and are given in descriptions of marks (up-right), large marks show phases of the starts of human population decreasing for corresponding cycles of solar activity. The grey rectangle in the center of the figure bounds the part of the phase space of cycles during which famines happened and human population decreased

3. The dependence of the European markets sensitivity to the space weather (including the sign of the sensitivity) on localization in the corresponding climatic zone is shown.

4. It is shown that even in the New Time epoch the sensitivity of wheat prices to the space weather/solar activity is observed in the USA. This dependence is revealed for durum wheat produced in a small geographical zone sensitive to the influence of the North Atlantic Oscillation.

5. The coincidence of the periods of decrease in population in Iceland of the 18–19 centuries (caused by bad feed harvest and the following drop of livestock), from the one hand, and phases of solar activity extrema, from the other hand, is shown. We explain this coincidence as a manifestation of the earth agriculture dependence on extremes of the space weather state.

The presented results clearly indicate on significant input of space weather influence on the Earth agricultural markets, and first of all, on grain markets. This is true for the zones where the presented necessary conditions (Section II.1 from the Part I of this article) for the causal chain (Figure 3 from the Part I of this article) are satisfied in the researched period.

III.2. Discussion: Space Weather Effects on Agricultural Markets under Condition of the Modern Climate Change

Continuous progress in the development of agro technology using achievements in gene engineering, biotechnology, irrigation, agro chemistry and plant protection should result in augmentation of steadiness of crops toward external factors like weather anomalies. This process should disturb the causal chain “space weather” – “agricultural prices” breaking the key link “weather–yield”. Accordingly, in the nearest future one could assume gradual weakening of grain and other crops prices sensitivity to the space weather. Unfortunately, the global and sharp climate change observed in the last years can bring to the opposite results. The main feature of this change is the sharp growth of the amount and amplitude of weather anomalies especially shifts of the usual time bounds of seasonal weather states. Under these conditions, in many regions the long-term selection of crops most suitable for the zone can turn out to be not optimal. Sharp deviations of the local weather from the “standard” can move zones to the category of risky agriculture zones highly sensitive to weather anomalies. If such movement happens in the zone where the weather, in turn, is sensitive to the solar activity state and the external supply of agricultural production is limited for some reasons, the causal chain “space weather” – “agricultural prices” can become working even under the modern conditions of the technological progress and globalization. For a more specific identification of the regions where this negative phenomenon can take place in the nearest future, a progress in understanding various physical and technological processes is needed — global climate change and its consequences for local weather in various regions, zoned crops steadiness and mechanisms of solar-earth relationships regarding their influence on weather in the researched regions. To cope with this problem joined efforts of specialists from various fields are needed — agrarian researchers and meteorologists, astrophysics, and specialists in the space weather.

REFERENCE

- [Appleby, 1979] *Appleby A. B.* Grain Prices and Subsistence Crises in England and France, 1590–1740 // *J. Economic History*. 1979. V. 39. N. 4. P. 865–887.
- [Arctowski, 1910] *Arctowski H.* Studies on climate and crops // *Bull. American Geographical Soc.* 1910. V. 42. N. 4. P. 270–282, N. 7. P. 481–495.
- [Beer et al., 1998] *Beer J., Tobias S., Weiss N.* An active sun throughout the maunder minimum // *Solar Physics*. 1998. V. 181. P. 237.
- [Beveridge, 1921] *Beveridge W. H.* Weather and Harvest // *Economic J.* 1921. V. 31. P. 429–453.
- [Brown, Hopkins, 1956] *Brown E. H. P., Hopkins S. V.* Seven centuries of the prices of consumables, compared with builders' wage-rates // *Economica*. 1956. V. 23. N. 89–92. P. 296–314.
- [Ejrnæset et al., 2008] *Ejrnæset M., Persson K. G., Rich S.* Feeding the British: convergence and market efficiency in the nineteenth-century grain trade // *Economic History Rev.* 2008. V. 61. N. s1. P. 140–171.
- [Georgieva, Kirov, 2011] *Georgieva K., Kirov B.* Solar dynamo and geomagnetic activity // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. V. 73. Iss. 2–3. P. 207–222.
- [Herschel, 1801] *Herschel W.* Observations Tending to Investigate the Nature of the Sun, in Order to Find the Causes and Symptoms of its Variable Emission of Light and Heat // *Philosophical Transactions of the Royal Soc. of London*. 1801. V. 91. P. 261–331.
- [Hooker, 1907] *Hooker P. H.* Correlations of the weather and crops // *J. Royal Statistical Society*. 1907. V. 70. N. 1.
- [International..., 2005] International Institute of Social History. 2005. (see also: <http://www.iisg.nl/index.php>.)
- [Kishcha et al., 1999] *Kishcha P. V., Dmitrieva I. V., Obridko V. N.* Long-term variations of the solar-geomagnetic correlation, total solar irradiance, and northern hemispheric temperature (1868–1997) // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1999. V. 61. P. 799–808.
- [Nagovitsyn, 2007] *Nagovitsyn Yu. A.* Solar cycles during the Maunder minimum // *Astronomy Letters*. 2007. V. 33. N. 5. P. 385–391.
- [Ogurtsov et al., 2003] *Ogurtsov M. G., Kocharov G. E., Nagovitsyn Yu. A.* Solar Cyclicity during the Maunder Minimum // *Astronomy Reports*. 2003. V. 47. Iss. 6. P. 517–524.
- [Pustil'nik, Yom Din, 2004a] *Pustil'nik L. A., Yom Din G.* Influence of solar activity on the state of the wheat market in medieval England // *Solar Physics*. 2004. V. 223. N. 1–2. P. 335–356.
- [Pustil'nik, Yom Din, 2004a] *Pustil'nik L. A., Yom Din G.* Space Climate Manifestation in Earth Prices from Medieval England up to Modern U. S. A. // *Solar Physics*. 2004. V. 224. N. 1–2. P. 473–481.
- [Rogers, 1887] *Rogers J. E. T.* Agriculture and Prices in England. 1887. Volume I–VIII. Clarendon Press: Oxford, Reprinted by Kraus Reprint Ltd, 1963: Vaduz.
- [Ruzmaikin, 1999] *Ruzmaikin A.* Can El Nino amplify the solar forcing of climate // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. N. 15. P. 2255–2258.
- [Ruzmaikin, 2007] *Ruzmaikin A.* Effect of solar variability on the Earth's climate pattern // *Advances in Space Research*. 2007. V. 40. P. 1146–1151.
- [Shea, Smart, 1992] *Shea M. A., Smart D. F.* Recent and Historical Solar Proton Events // *Radiocarbon*. 1992. V. 34. N. 2. P. 255–262.
- [Smith, 1776] *Smith A.* An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. L.: W. Strahan & T. Cadell, 1776.
- [Suits, 1957] *Suits D. B.* Use of Dummy Variables in Regression Equations // *J. American Statistical Association*. 1957. V. 52. N. 280. P. 548–551.

- [USDA, 2004] USDA. Prices Received by Farmers: Historic Prices & Indexes 1908–1992 (92152). National Agricultural Statistics Service. (see also: <http://usda.mannlib.cornell.edu>. Accessed 23 July 2004.)
- [Vasey, 2001] Vasey D.A. A quantitative assessment of buffer among temperature variations, livestock, and Human Population of Iceland, 1784 to 1900 // Climatic Change. 2001. V. 48. P. 243–263.

О ВОЗМОЖНОСТИ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ РЫНОК

Л. А. Пустыльник, Г. Йом Дин

Израильский центр космической погоды и космических лучей, Университет Тель-Авива,
Космическое агентство Израиля, e-mail: levpust2149@gmail.com
Открытый университет Израиля

Часть 1. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ

В первой части этой публикации представляются исторический обзор и последние результаты исследований возможного влияния космической погоды на сельскохозяйственный рынок. Подчеркивается, что в рамках современной картины такая причинно-следственная связь возможна только в тех географических зонах и в такие исторические периоды, при которых выполняются три необходимых для этого условия:

- 1) локальная погода (облачность, атмосферная циркуляция и т. п.) является чувствительной к факторам космической погоды (космические лучи, магнитная активность, солнечный ультрафиолет и т. п.);
- 2) данная зона является областью «рискованного земледелия» крайне чувствительной к погодным аномалиям;
- 3) относительная изоляция сельскохозяйственного рынка, делающая невозможным или неэффективным демпфирование скачка цен, как реакции на возникающий дефицит продуктов питания, путём массированных поставок из внешних непострадавших источников.

Описываются четыре сценария возможных ценовых откликов, знак и амплитуда которых определяется доминирующим типом климата и чувствительности локальной погоды к космической.

Часть 2. ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ, МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ПРояВЛЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ПОВЕДЕНИИ РЫНКОВ СРЕДНЕВЕКОВОЙ ЕВРОПЫ, СОВРЕМЕННЫХ США И В СТАТИСТИКЕ ПЕРИОДОВ ГОЛОДА В ИСЛАНДИИ

В первой части этой работы мы представили схему возможных связей между космической погодой и состоянием сельскохозяйственных рынков, сформулировали три условия, необходимые для реализации такой причинно-следственной цепочки и описали четыре возможных сценария и типов отклика, зависящих от доминирующего в данной местности типа климата. Во второй части мы описываем источники данных и статистические методы, используемые для обнаружения случаев реализации подобной связи для конкретных регионов и в определённые исторические периоды. Исследование динамики сельскохозяйственного рынка в средневековой Европе и, в частности в период климатических аномалий, соотносящихся с Минимумом Маундера, показало, что описанные нами в части 1 типы ценовых реакций действительно имеют место, и знак реакций хорошо соответствует предсказанному.

Главными доказательствами реальности обнаруженной связи являются: а) идентичные статистики интервалов между экстремумами солнечной активности и интервалов между скачками цен на зерновых биржах; б) систематическая фазовая асимметрия цен в противоположных фазах солнечной активности. Мы показываем, что эффект фазовой асимметрии цен сохраняется даже в Новое Время для производства в США твёрдой пшеницы «дурум», сосредоточенного в компактном регионе на севере США, чувствительном к погодным аномалиям и аномалиям космической погоды. Другим примером проявлений космической погоды в сельскохозяйственной продуктивности является статистика уменьшений численности населения Исландии в период XVII–XVIII вв. из-за падения поголовья скота, обусловленного дефицитом кормов, вызванным погодными аномалиями. Мы показываем, что все шесть случаев падения численности населения в указанный период были сфазированы с моментами экстремумов солнечной активности (минимумов или максимумов числа солнечных пятен). Уровень отвержения гипотезы о случайной природе такой синхронизации превышает 99,5 %. В заключение мы обсуждаем возможное влияние глобального изменения климата, наблюдаемое в последние годы, на изменение чувствительности сельскохозяйственных районов к космической погоде за счёт формирования новых зон рискованного земледелия.

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГЕМОДИНАМИКУ БОЛЬНЫХ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТОНИЕЙ И ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СЕРДЦА И ПОИСК ФАРМАКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Э. А. Щербань¹, Р. М. Заславская², М. М. Тейблум³

¹ Белгородский государственный университет, Белгород, Россия,
e-mail: andreyella@yandex.ru

² Городская клиническая больница № 60, Москва, Россия,
e-mail: info@gkb60.mosgorzdrav.ru

³ МСК «Солидарность для жизни», Москва, Россия,
e-mail: misha@tejblum.pp.ru

Изучены корреляционные отношения между факторами метеорологической и геомагнитной активности и показателями гемодинамики 188 пациентов с разным уровнем артериального давления, включая пациентов с артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца, а также поиск фармакологической защиты. Произведена оценка данных суточного мониторирования артериального давления, эхокардиографии, транскраниальной доплерографии сосудов головного мозга до и после лечения с использованием адаптогенов. Все пациенты были разделены на 7 групп в зависимости от вида терапии: без терапии (2 группы), получающие традиционную терапию (2 группы), лечение с включением препаратов с адаптогенным действием (мелаксена, мебикара, элтацина). Мелаксен — синтетический аналог нейрогормона эпифиза (мелатонин, Unipharm, Inc., USA), мебикар — анксиолитик («Татхимфармпрепараты», Россия), элтацин — комбинация аминокислот: глицина, глутаминовой кислоты, цистина (НИИ цитохимии и молекулярной фармакологии, Москва). Величины погодных факторов получали из сервера «Погода России» (meteo.infospace.ru).

На основании корреляционного анализа установлено, что пациенты с нормальным, пониженным и умеренно повышенным артериальным давлением (АД) в одинаковой степени подвержены воздействию метеофакторов; при высокой степени артериальной гипертензии (АГ) число корреляций между показателями АД и факторами погоды увеличивается практически втрое.

Традиционная терапия пациентов с артериальной гипертензией II–III стадии, 2–3-й степени и ИБС обладает гипотензивным эффектом, влияя в основном на систолическое АД; оказывает антиангинальное действие, улучшая систолическую и диастолическую функции левого желудочка (ЛЖ), нормализует скоростные показатели мозгового кровотока, но при этом не уменьшает влияния метеофакторов на показатели гемодинамики.

Включение в терапию мелаксена усиливает гипотензивное действие традиционной терапии, уменьшая систолическое и диастолическое АД, нормализует суточный профиль АД, улучшает процессы сокращения и расслабления миокарда ЛЖ. Включение в терапию мебикара нормализует сосудистый тонус и скоростные показатели мозгового кровотока, усиливает гипотензивное действие традиционной терапии, влияет на диастолическую функцию левого желудочка. Элтацин на фоне традиционной терапии улучшает сократительную функцию миокарда левого желудочка, усиливает гипотензивное действие. Нормализация показателей гемодинамики пациентов с артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца под влиянием лечения с адаптогенами сопровождается уменьшением корреляционных связей с метеофакторами.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая распространённость АГ и ИБС в мире, а также огромное социальное бремя этих заболеваний и их осложнений — основа поиска путей повышения эффективности лечения больных [Оганов, Масленникова, 2007; Чазов, 2002].

До настоящего времени лечение больных АГ остаётся малоэффективным. Так, в реальной практике снижение повышенного АД до целевого уровня достигается лишь у 12...30 % больных [Чазова, Беленков, 2004]. Существует целый ряд причин, препятствующих достижению конечной цели гипотензивного лечения, одна из которых — метеозависимость [Бреус, 2010; Заславская и др., 2009; Савенков, 2005; Савенков и др., 2007]. Установлено, что 1/3 мужчин и 1/2 женщин чувствительны к изменениям погодных условий. 65...75 % пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями страдают болезненной метеочувствительностью. 10...15 % населения Земли страдают от магнитных бурь, именно в эти опасные дни приходится 2/3 всех инсультов и инфарктов. В магнитную бурю число инфарктов возрастает на 76,4 %; число инсультов — на 30,8 % [Результаты..., 2006; Эффекты..., 2006]. Изучение метео- и магниточувствительности больных с АГ и ИБС, а также поиск фармакологической защиты от патологического влияния погоды на состояние гемодинамики, является своевременным и актуальным [Шальнова, Деев, 2011; Some aspects..., 2008; Special report..., 2009].

ЦЕЛЬ

Изучение влияния метеорологической и геомагнитной активности на показатели гемодинамики пациентов с разным уровнем АД, включая АГ в сочетании с ИБС, а также исследование метеопротективного действия препаратов с адаптогенными свойствами (мелаксена, мебикара, элтацина).

ЗАДАЧИ

1. Изучить корреляционные отношения между метеорологическими, геомагнитными факторами и основными гемодинамическими показателями у лиц с нормальным, высоким нормальным и повышенным АД.

2. Исследовать корреляционную зависимость между метеорологическими, геомагнитными факторами и основными показателями гемодинамики у больных с АГ в сочетании с ИБС на фоне традиционного лечения.

3. Исследовать влияние препаратов с адаптогенным действием (мелаксена, мебикара, элтацина) на корреляционные отношения между метеорологическими и геомагнитными факторами и основными показателями гемодинамики у больных с АГ и ИБС.

4. Изучить сравнительную эффективность влияния мелаксена, мебикара и элтацина на клиническую симптоматику метео- и магниточувствительных больных с АГ и ИБС.

5. Изучить сравнительную эффективность влияния указанных адаптогенов на показатели суточного мониторирования АД (СМАД) у больных с АГ и ИБС с учётом воздействия метеорологических и геомагнитных факторов.

6. Исследовать сравнительную эффективность влияния мелаксена, мебикара и элтацина на структурно-функциональные показатели центральной гемодинамики у больных с АГ и ИБС по данным эхокардиографии с учётом метео- и магниточувствительности.

7. Проанализировать сравнительную эффективность влияния мелаксена, мебикара и элтацина на состояние церебральной гемодинамики у метео-

и магниточувствительных больных с АГ и ИБС по данным транскраниальной доплерографии (ТКДГ) сосудов головного мозга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучены показатели гемодинамики у 188 пациентов среднего и пожилого возраста с разным уровнем артериального давления (АД), в том числе при АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС, получающих традиционную терапию (ТТ) и лечение с включением препаратов с адаптогенным действием (мелаксена, мебикара, элтацина). Первая группа состояла из 14 пациентов с нормальным артериальным давлением (АД менее 129/84 мм рт. ст), среди которых 4 мужчин и 10 женщин (средний возраст $51,2 \pm 1,4$ лет). Во вторую группу входили 13 человек с незначительным повышением АД. Среди них были 8 женщин и 5 мужчин (средний возраст $50,1 \pm 1,6$ лет). У 10 пациентов диагностировано высокое нормальное АД (САД не превышало 139 мм рт. ст, а ДАД не более 89 мм рт. ст). Трое больных страдали АГ I степени (САД колебалось в пределах 140...159 мм рт. ст, ДАД — в пределах 90...99 мм рт. ст). Гипотензивного лечения пациенты не получали. Третья группа состояла из 16 больных, страдающих АГ II стадии, 2-й степени и получающих традиционное гипотензивное лечение (ингибиторы АПФ, диуретики, антагонисты кальция). Среди них были 13 женщин и 3 мужчин (средний возраст $55,3 \pm 1,9$ лет). Риск развития сердечно-сосудистых осложнений 3 (высокий) — у 16 пациентов.

Четвёртая группа больных, страдающих АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС и получающих ТТ, состояла из 38 человек. Среди пациентов были 23 женщины и 15 мужчин (средний возраст составил $58,6 \pm 1,5$ лет). Длительность заболевания в этой группе колебалась от 1 до 11 лет (в среднем $7,2 \pm 1,5$ лет). АГ II стадии, 3-й степени страдали 24 пациента; АГ III стадии, 2-й степени диагностирована у 14 больных. Риск развития сердечно-сосудистых осложнений 4 (очень высокий) — у 38 пациентов. 14 пациентов страдали стенокардией напряжения I–II функционального класса (ФК), у 9 больных был диагностирован постинфарктный кардиосклероз. Традиционная гипотензивная и антиангинальная терапия включала те же ингибиторы АПФ, диуретики, антагонисты кальция, а также β -адреноблокаторы, антиагреганты и нитраты при ангинозных приступах.

Пятую группу больных с АГ II–III стадии, 2–3-й степени и ИБС, получающих комплексную терапию с мелаксеном, составили 36 пациентов. Среди них были 17 женщин и 19 мужчин (средний возраст $55,5 \pm 1,4$ лет). Длительность заболевания в этой группе колебалась от 4 до 12 лет (в среднем $9,0 \pm 1,4$ лет). АГ II стадии, 3-й степени страдали 25 пациентов; АГ III стадии, 2-й степени — 11 пациентов. Определён риск развития сердечно-сосудистых осложнений как очень высокий — у 36 пациентов. 11 больных страдали стенокардией напряжения I–II ФК, у 8 пациентов был диагностирован постинфарктный кардиосклероз. Традиционная терапия включала те же лекарственные препараты, которые получали пациенты четвёртой группы, а также мелаксен (мелатонин, Unipharm, Inc., USA) в дозе 3 мг в 22 ч. Мелаксен — синтетический аналог нейrogормона эпифиза мелатонина с уникальными адатпивными возможностями, является корректором эндогенных ритмов

относительно экзогенных ритмов окружающей среды, обладает биоритмологическим, антиоксидантным и иммуномодулирующим эффектами.

Шестую группу больных с АГ II–III стадии, 2–3-й степени и ИБС, получающих мебикар на фоне ТТ, составили 36 пациентов. Среди них были 25 женщин и 11 мужчин (средний возраст $63,5 \pm 1,5$ лет). Длительность заболевания в этой группе колебалась от 6 до 17 лет (в среднем $10,7 \pm 2,0$ лет). АГ II стадии, 3-й степени страдали 22 пациента; АГ III стадии, 2-й степени — 14 пациентов. Определён риск развития сердечно-сосудистых осложнений как очень высокий у 36 пациентов. 14 больных страдали стенокардией напряжения I–II ФК, у 7 пациентов был постинфарктный кардиосклероз. Пациенты получали мебикар (производства ОАО «Татхимфармпрепараты») в дозе 0,3 мг по 1 таблетке 3 раза в день на фоне ТТ. Мебикар — анксиолитик, относится к фармакологической группе дневных транквилизаторов, обладает противотревожным, ноотропным, адаптогенным, гиполипидемическим действием. Под его влиянием улучшается интеграция и сбалансированность психических функций, а это способствует оптимизации психической деятельности, трудовой и социальной адаптации.

Седьмую группу больных с АГ II–III стадии, 2–3-й степени и ИБС, получающих элтацин на фоне ТТ, составили 35 пациентов. Среди них были 17 женщин и 18 мужчин (средний возраст $61,1 \pm 1,8$ лет). Длительность заболевания в этой группе колебалась от 4 до 20 лет (в среднем $13,3 \pm 2,1$ лет). АГ II стадии, 3-й степени страдали 22 человека; АГ III стадии, 2-й степени — 13 пациентов. Риск развития сердечно-сосудистых осложнений 4 (очень высокий) — у 35 пациентов. 13 больных страдали стенокардией напряжения I–II ФК, у 9 пациентов был постинфарктный кардиосклероз. Пациенты получали на фоне ТТ элтацин (НИИ цитохимии и молекулярной фармакологии, Москва), представляющий комплекс заменимых аминокислот — глицина, глутаминовой кислоты, цистина, в дозе 220 мг 3 раза в день сублингвально. Элтацин — является регулятором обмена веществ, оказывает антиоксидантное действие, повышает сократительную способность миокарда, повышает толерантность организма к физическим нагрузкам, нормализует работу сердечно-сосудистой системы при сильном стрессе, резких перепадах температуры воздуха, улучшает качество жизни больных.

В каждой группе в динамике оценивали клинические показатели: число эпизодов головных болей, их продолжительность, ангинозные боли, их количество, продолжительность, количество принимаемых таблеток нитроглицерина, фиксировали время появления болей, одышки, аритмий и других неприятных ощущений в области сердца и за грудиной. Проводили нагрузочный тест с 6-минутной ходьбой (6МТХ), на основании которого определяли толерантность больного к физической нагрузке. Всем пациентам измеряли уровень АД, а также пульс в утренние и вечерние часы на протяжении всего периода наблюдения (в течение трёх месяцев, из них 14...16 дней стационарного лечения). Оценивали показатели систолического АД (САД), диастолического АД (ДАД), пульсового АД (ПАД), среднего АД (AD_{cp}), двойного произведения (ДП) и пульса. Больным с АГ и ИБС до и после курсов лечения проводили СМАД с помощью портативного аппарата BR-102 Schiller (Швейцария), эхокардиографию и ТКДГ сосудов головного мозга на ультразвуковом сканере экспертного класса Vivid 7 (GE, USA). Для статистической проверки гипотез различий средних независимых выборок с одинаковыми

и различными дисперсиями использовали соответствующий двухвыборочный параметрический критерий Стьюдента (t). Для сравнения зависимых (связанных) выборок применяли парный двухвыборочный t -тест для средних. Вычисляли среднее значение (M), среднеквадратичное отклонение (σ), ошибку средней арифметической (m). Различия считали достоверными при $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***) . Была проведена оценка влияния погодных факторов: температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности, точки росы, облачности, направления и скорости ветра, а также геомагнитной активности на состояние сердечно-сосудистой системы. В качестве индексов геомагнитной активности были использованы суточные значения планетарных индексов (сумма 3-часовых значений Кр-индекса). Корреляционному анализу подверглись показатели самоконтроля АД в утренние и вечерние часы, параметры СМАД, эхокардиографии, ТКДГ до и после проводимых курсов лечения и погодные факторы, величины которых получали из сервера «Погода России» (meteo.infospace.ru). **Наличие статистической связи между основными показателями гемодинамики и параметрами погоды оценивали по уровню значимости коэффициентов линейной корреляции Пирсона, расчёт которых проводили для нескольких значений сдвига рядов друг относительно друга (от дня измерений, когда гемодинамические значения были синхронны со значениями метео- и геомагнитных факторов, до +1 часа или дня, что соответствовало запаздыванию, и -1 часа или дня, что соответствовало опережению данных гемодинамических измерений относительно значений факторов погоды).**

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование мы начали с изучения корреляционных отношений между факторами метеорологической, геомагнитной активности и показателями АД и пульса, измеренными в дневные и вечерние часы на протяжении всего периода наблюдения у пациентов с разным уровнем артериального давления, в том числе с АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС (рис. 1). Характерное время сдвига реакции организма относительно момента измерения метеорологических факторов сильно варьирует и соответствовало нулевому сдвигу (моменту измерения), следующему дню (запаздывание) или дню накануне исследования (опережение). Выявлены изменения факторов гемодинамики, которые совпадали с перепадом погодных факторов. Обнаружены также отрицательные линейные корреляционные связи, которые означают разнонаправленность реакции гемодинамики и изменений факторов погоды.

У пациентов с нормальным уровнем АД выявлено **43** слабых, но статистически достоверных корреляций. Установлено, что на гемодинамику пациентов этой группы наибольшее влияние оказывает атмосферное давление ($0,16 < r < 0,22$; $p < 0,02$) и верхняя облачность ($0,14 < r < 0,20$; $p < 0,03$). Линейной взаимосвязи параметров нижней облачности с показателями гемодинамики пациентов не было выявлено. Состояние гемодинамики наименее подвержено воздействию температуры воздуха, точки росы, параметров ветра. Корреляционным связям с метеофакторами наиболее подвержены утренние показатели ДАД и АД_{ср}. Корреляционных отношений между утренними показателями ПАД, ДП с метеофакторами не выявлено. Практически не влияет погода на вечерние значения ПАД и ДП.



Рис. 1. Влияние факторов погоды на показатели гемодинамики пациентов с разным уровнем АД, в том числе с АГ и ИБС

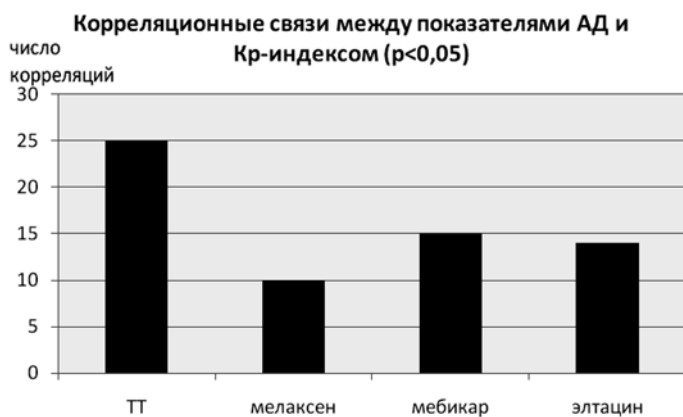


Рис. 2. Влияние геомагнитной активности на показатели гемодинамики пациентов с АГ и ИБС, получающих ТТ и лечение с адаптогенами

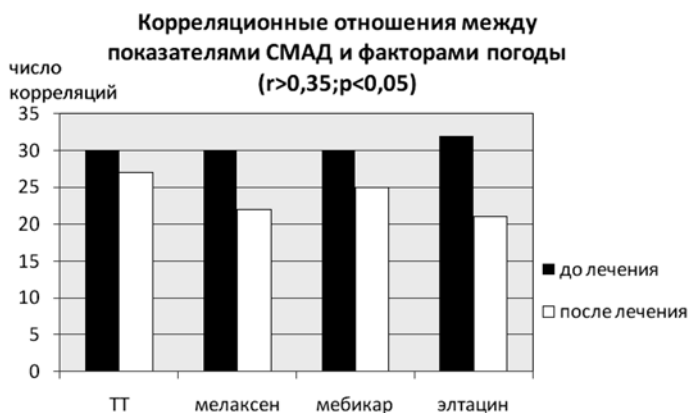


Рис. 3. Влияние погодных факторов на показатели СМАД под влиянием лечения с включением адаптогенов

У пациентов с высоким нормальным АД и АГ I степени выявлено **45** линейных взаимосвязей невысокой степени, но статистически достоверных. Наиболее чувствительны к погодным условиям утренние показатели ДАД, АД_{ср} и ДП. В большей степени показатели гемодинамики пациентов коррелируют с параметрами температуры воздуха ($0,16 < r < 0,32$; $p < 0,02$) и точки росы ($0,15 < r < 0,24$; $p < 0,02$), в меньшей степени — с параметрами облачности и ветра. На утренние показатели ПАД метеофакторы влияния не оказывают. Менее чувствительны к погодным условиям вечерние значения САД, ДАД, ПАД, АД_{ср} и ДП.

Показатели гемодинамики пациентов с АГ II стадии, **2-й степени** наиболее чувствительны к погодным условиям, число корреляционных связей увеличилось практически втрое и составило **143**. В большей степени на параметры гемодинамики влияют атмосферное давление ($0,17 < r < 0,48$; $p < 0,05$), относительная влажность ($0,17 < r < 0,26$; $p < 0,04$), направление и скорость ветра ($0,19 < r < 0,46$; $p < 0,05$). Не выявлено корреляционных связей состояния гемодинамики с температурой воздуха и нижней облачностью. Наиболее чувствительны к погодным условиям утренние и вечерние показатели САД и ПАД. Практически не влияют метеоусловия на вечерние параметры ДП. Итак, при увеличении степени АГ повышается чувствительность к влиянию метеофакторов.

У пациентов с АГ II–III стадии, **2–3-й степени в сочетании с ИБС**, получающих ТТ, между показателями АД, измеряемыми в утренние и вечерние часы в течение всего периода наблюдения, и факторами погоды выявлено **150** значимых корреляций. Наибольшее влияние на показатели АД оказывают атмосферное давление ($0,15 < r < 0,36$; $p < 0,05$), температура воздуха ($0,16 < r < 0,42$; $p < 0,02$), точка росы ($0,15 < r < 0,50$; $p < 0,05$) и геомагнитная активность ($0,31 < r < 0,53$; $p < 0,001$). Незначительно влияет на показатели гемодинамики облачность, с параметрами нижней облачности корреляции не выявлено. Наиболее подвержены влиянию погоды показатели пульса и ДП, измеренные как в утренние, так и в вечерние часы. В меньшей степени коррелируют с погодными факторами вечерние значения САД, ДАД, ПАД.

Пациенты с АГ II–III стадии, **2–3-й степени в сочетании с ИБС**, получающие мелаксен на фоне ТТ, менее подвержены влиянию погодных факторов. Между показателями АД, измеренными в утренние и вечерние часы, и факторами погоды выявлено **84** значимых корреляций на протяжении всего периода наблюдения. Наибольшее влияние оказывает атмосферное давление ($0,15 < r < 0,33$; $p < 0,04$) и относительная влажность ($0,14 < r < 0,26$; $p < 0,04$), в меньшей мере выявлено влияние облачности и направления ветра. Не выявлено корреляционных связей показателей гемодинамики с параметрами точки росы и скорости ветра. Наиболее подвержены погодному влиянию утренние показатели пульса и ДП. В меньшей степени коррелируют с погодными факторами утренние значения ДАД, АД_{ср} и вечерние показатели пульса.

Пациенты с АГ II–III стадии, **2–3-й степени в сочетании с ИБС**, получающие мебикар на фоне ТТ, подвержены влиянию многих погодных факторов. Между показателями АД и факторами погоды выявлено **148** значимых корреляций на протяжении всего периода наблюдения. Наибольшее влияние на показатели АД оказывают атмосферное давление ($0,13 < r < 0,26$; $p < 0,04$), температура воздуха ($0,13 < r < 0,38$; $p < 0,04$) и точка росы ($0,13 < r < 0,36$; $p < 0,05$). Корреляционных отношений между показателями гемодинамики и параме-

трами облачности не выявлено. Наиболее подвержены влиянию погоды вечерние показатели САД и АД_{ср}. В меньшей степени коррелируют с погодными факторами значения пульса как в утренние, так и в вечерние часы.

Пациенты с АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС, получающие элтацин на фоне ТТ, менее подвержены влиянию погодных факторов. Между показателями АД в утренние, вечерние часы и факторами погоды выявлено 97 значимых корреляций на протяжении всего периода наблюдения. Наибольшее влияние на показатели АД оказывают атмосферное давление ($0,13 < r < 0,26$; $p < 0,05$) и скорость ветра ($0,14 < r < 0,24$; $p < 0,03$). Незначительно влияет на показатели гемодинамики облачность, относительная влажность и направление ветра. Наиболее подвержены влиянию погоды вечерние показатели САД, утренние и вечерние значения АД_{ср}. В меньшей степени коррелируют с погодными факторами показатели пульса и утренние значения ДП.

При изучении влияния космической погоды на показатели АД выявлено, что пациенты, получающие ТТ, наиболее чувствительны к состоянию геомагнитной активности. Адаптогены несколько уменьшают взаимосвязь между выборками (рис. 2).

Таким образом, увеличение степени АГ сопровождается значительным увеличением числа корреляционных связей между показателями гемодинамики пациентов и факторами погоды. Традиционная терапия больных АГ, а также больных АГ с ИБС не имеет метеопротективного действия. Включение в терапию мелаксена и элтацина способствует уменьшению влияния факторов погоды на показатели АД пациентов. Под влиянием адаптогенов уменьшается влияние геомагнитной активности на показатели АД.

Проведена оценка клинической эффективности ТТ больных АГ и ИБС с учётом влияния факторов погоды на гемодинамику пациентов. Традиционная терапия оказалась эффективной с наступлением стойкого клинического эффекта на $6,3 \pm 0,9$ сут, о чём свидетельствуют благоприятные изменения всех изучаемых клинических показателей и увеличение толерантности к физической нагрузке по данным теста с 6-минутной ходьбой (табл. 1).

Под влиянием ТТ отмечено уменьшение показателей САД с $152,4 \pm 5,0$ до $130,5 \pm 2,7$ мм рт. ст ($p < 0,001$). ДАД уменьшилось недостоверно, не выявлено влияния ТТ на суточный профиль АД (табл. 2).

Показатели СМАД до и после лечения оценивали с учётом влияния погоды на показатели АД. Установлено, что ТТ незначительно уменьшает количество корреляционных связей между АД и факторами погоды (с 30 до 27), снижает влияние температуры воздуха и точки росы на состояние гемодинамики (рис. 3), однако не снижает магниточувствительность пациентов ($0,30 < r < 0,40$; $p < 0,001$). На фоне ТТ отмечается увеличение числа корреляционных связей между показателями АД и Кр-индексом (рис. 4).

По данным ЭхоКГ под влиянием ТТ уменьшаются значения некоторых структурных показателей (конечного систолического размера — КСР, конечного систолического объёма — КСО), нормализуется показатель диастолической функции ЛЖ (отношение пик E/пик A). До лечения выявлена 31 корреляционная связь между показателями эхокардиографии и факторами погоды. В большей степени влияет на сердечную гемодинамику атмосферное давление ($0,32 < r < 0,49$; $p < 0,05$), средняя облачность ($0,35 < r < 0,51$; $p < 0,03$), скорость ветра ($0,35 < r < 0,48$; $p < 0,04$). Наиболее подвержено этому

влиянию отношение пик Е/пик А. После лечения число корреляционных отношений составило 35, наибольшее влияние оказывает атмосферное давление ($0,32 < r < 0,44$; $p < 0,04$), средняя облачность ($0,34 < r < 0,43$; $p < 0,04$), скорость и направление ветра ($0,33 < r < 0,49$; $p < 0,05$). Наиболее чувствителен к влиянию погоды пик Е, уменьшается число корреляций с отношением пик Е/пик А, не выявлено корреляций с КСО (рис. 5). На фоне ТТ отмечается увеличение числа корреляционных связей между показателями эхокардиографии и Кр-индексом ($0,35 < r < 0,43$; $p < 0,03$) (рис. 6).

Таблица 1. Динамика основных клинических показателей под влиянием ТТ

Показатели	До лечения ($n = 14$)		После лечения ($n = 14$)		$p <$
	$M \pm m$	σ	$M \pm m$	σ	
ЭГБ в сут	$1,1 \pm 0,4$	1,5	$0,5 \pm 0,2$	0,8	0,05*
ПГБ в сут, мин	$57,9 \pm 22,0$	82,1	$17,1 \pm 8,9$	33,5	0,04*
КАБ в сут	$1,3 \pm 0,4$	1,6	$0,4 \pm 0,2$	0,8	0,03*
ПАБ, мин	$4,8 \pm 1,6$	6,1	$1,0 \pm 0,5$	1,9	0,02*
КТН в сут, шт.	$0,9 \pm 0,4$	1,4	$0,4 \pm 0,2$	0,8	0,05*
6МТХ, м	$356,1 \pm 22,5$	84,4	$384,3 \pm 21,7$	81,2	0,03*

Примечание. ЭГБ — эпизоды головных болей; ПГБ — продолжительность головной боли; КАБ — количество ангинозных болей; ПАБ — продолжительность ангинозных болей; КТН — количество таблеток нитроглицерина; 6МТХ — тест с 6-минутной ходьбой.

Таблица 2. Динамика показателей СМАД на фоне ТТ и лечения с включением адаптогенов

ТТ с адаптогенами и без них	САД, мм рт. ст	ДАД, мм рт. ст	СНС САД, %	СНС ДАД, %
ТТ	+ с $152,4 \pm 5,0$ до $130,5 \pm 2,7$ ($p < 0,001$)	- с $94,4 \pm 3,2$ до $89,6 \pm 2,8$ ($p = 0,13$)	-	-
ТТ с мелаксеном	+ с $144,1 \pm 2,7$ до $128,6 \pm 2,5$ ($p < 0,001$)	+ с $89,3 \pm 1,9$ до $79,8 \pm 1,8$ ($p < 0,001$)	+ с $7,5 \pm 1,3$ до $12,8 \pm 1,0$ ($p < 0,002$)	+ с $10,8 \pm 1,6$ до $19,0 \pm 1,2$ ($p < 0,001$)
ТТ с мебикаром	+ с $154,1 \pm 3,9$ до $129,9 \pm 3,0$ ($p < 0,001$)	+ с $97,6 \pm 2,7$ до $82,1 \pm 1,8$ ($p < 0,001$)	-	-
ТТ с элтацином	+ с $151,5 \pm 4,0$ до $126,7 \pm 4,5$ ($p < 0,001$)	+ с $97,1 \pm 3,7$ до $80,6 \pm 2,7$ ($p < 0,001$)	-	-

Примечание. ТТ — традиционная терапия; САД — систолическое артериальное давление; ДАД — диастолическое артериальное давление; СНС — степень ночного снижения.

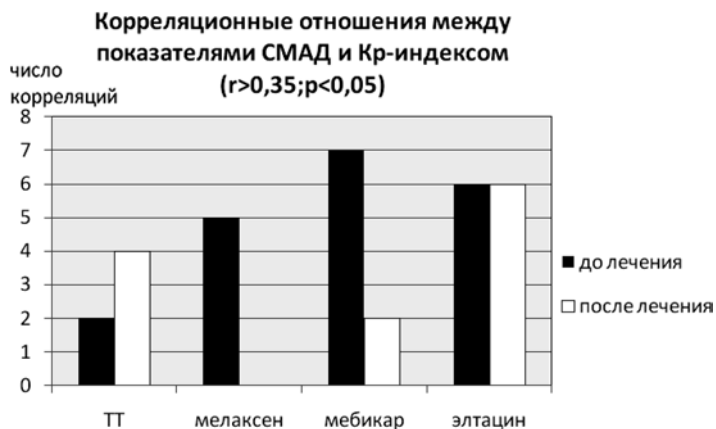


Рис. 4. Влияние геомагнитной активности на показатели СМАД под влиянием лечения с включением адаптогенов

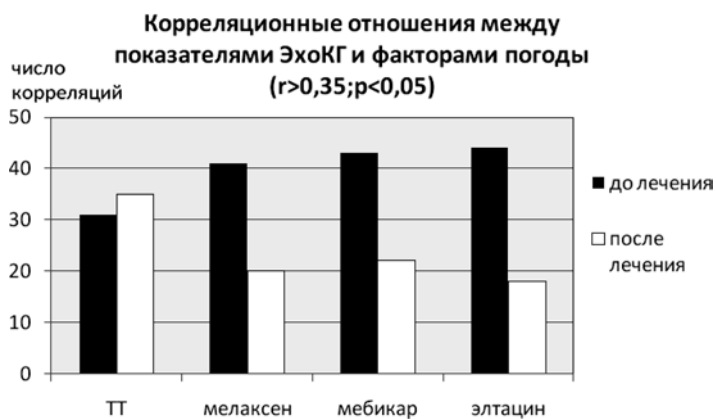


Рис. 5. Влияние погодных факторов на показатели эхокардиографии под влиянием лечения с включением адаптогенов

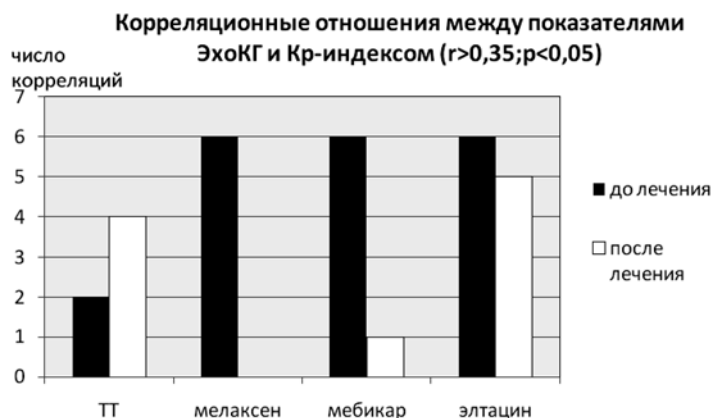


Рис. 6. Влияние геомагнитной активности на показатели эхокардиографии под влиянием лечения с включением адаптогенов

Исходно у пациентов, получающих ТТ, выявлено снижение скоростных показателей мозгового кровотока и повышение индексов периферического сосудистого сопротивления с обеих сторон. После проведённого лечения отмечается увеличение скоростных показателей кровотока левой средней мозговой артерии (СМА) (табл. 3).

Таблица 3. Показатели транскраниальной доплерографии сосудов головного мозга пациентов, получающих традиционное лечение

Показатели	До лечения ($n = 38$)		После лечения ($n = 38$)		$p <$
	$M \pm m$	σ	$M \pm m$	σ	
Левая средняя мозговая артерия					
V_{ps} , см/с	84,5±1,5	9,0	87,8±1,8	10,2	0,09
V_{ed} , см/с	29,8±0,6	3,3	31,6±0,8	4,9	0,02*
TAMAX, см/с	50,8±0,6	3,2	54,2±1,4	8,3	0,01*
PI	1,1±0,04	0,2	1,1±0,05	0,3	0,59
RI	0,6±0,01	0,06	0,6±0,03	0,17	0,45
Правая средняя мозговая артерия					
V_{ps} , см/с	82,9±1,1	6,6	84,7±1,6	9,1	0,11
V_{ed} , см/с	29,9±0,8	4,5	32,8±1,6	9,4	0,08
TAMAX, см/с	48,3±0,7	4,3	50,7±1,5	8,7	0,11
PI	1,1±0,04	0,2	1,1±0,05	0,3	0,18
RI	0,7±0,01	0,07	0,6±0,02	0,12	0,08

Примечание. V_{ps} — пиковая систолическая скорость кровотока; V_{ed} — максимальная конечная диастолическая скорость кровотока; TAMAX — усреднённая по времени максимальная скорость кровотока; PI — пульсационный индекс; RI — индекс периферического сопротивления.

До лечения выявлено **36** корреляции между показателями ТКДГ и факторами погоды. В большей степени влияет на церебральный кровоток облачность ($0,35 < r < 0,49$; $p < 0,04$), наиболее подвержено влиянию погоды показатели правой СМА. После лечения число корреляционных связей между показателями ТКДГ и факторами погоды уменьшилось до **30**, наибольшее влияние оказывает нижняя облачность ($0,34 < r < 0,47$; $p < 0,04$) и направление ветра ($0,35 < r < 0,48$; $p < 0,04$) (рис. 7). После лечения наиболее чувствительны к влиянию погоды показатели левой СМА, уменьшается число корреляций с показателями правой СМА.

Таким образом, ТТ больных АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС обладает гипотензивным эффектом, влияя в основном на САД; оказывает антиангинальное действие, благоприятно влияя на систолическую и диастолическую функции ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока; при этом ТТ существенно не уменьшает влияния метеофакторов на состояние гемодинамики пациентов.

Проведена оценка клинической эффективности комплексной терапии с **мелаксеном** больных АГ и ИБС с учётом влияния метеорологической и геомагнитной активности на состояние гемодинамики пациентов. У пациентов

этой группы стойкий клинический эффект наступил раньше, на $4,3 \pm 0,7$ сут. Уменьшилось количество и продолжительность эпизодов головной и ангинозных болей, уменьшилась потребность в нитроглицерине, пациенты отмечали улучшение качества сна, уменьшение времени засыпания и количества ночных пробуждений, увеличилась толерантность к физической нагрузке по данным теста с 6-мин ходьбой с $423,5 \pm 6,8$ до $455,3 \pm 8,1$ м ($p < 0,002$). По данным СМАД выявлен более выраженный гипотензивный эффект комплексной терапии с мелаксеном, при этом достоверно уменьшалось и САД, и ДАД, выявлено нормализующее влияние на суточный профиль АД (табл. 4). Установлено, что лечение с мелаксеном уменьшает количество корреляционных связей между показателями СМАД и факторами погоды (с **30** до **22**), снижает влияние верхней облачности на состояние гемодинамики (см. рис. 3). Не выявлено корреляционных связей с Кр-индексом после лечения с мелаксеном (см. рис. 4).

Таблица 4. Показатели СМАД до и после терапии с мелаксеном

Показатели	До лечения ($n = 36$)		После лечения ($n = 36$)		$p <$
	$M \pm m$	σ	$M \pm m$	σ	
Суточные значения показателей					
ЧСС, уд/мин	$73,9 \pm 2,9$	11,9	$76,8 \pm 2,7$	11,1	0,28
САД, мм рт. ст.	$144,1 \pm 2,7$	11,2	$128,6 \pm 2,5$	10,2	0,001***
ДАД, мм рт. ст.	$89,3 \pm 1,9$	7,9	$79,8 \pm 1,8$	7,6	0,001***
АД _{ср} , мм рт. ст.	$109,1 \pm 2,1$	8,6	$95,9 \pm 2,0$	8,4	0,001***
ПАД, мм рт. ст.	$54,8 \pm 2,0$	8,4	$48,8 \pm 1,5$	6,3	0,002**
ДП, усл. ед.	$106,9 \pm 4,9$	20,5	$99,8 \pm 3,8$	15,5	0,07
Дневные значения показателей					
САД, мм рт. ст.	$146,4 \pm 2,8$	11,7	$132,3 \pm 2,6$	10,8	0,001***
ДАД, мм рт. ст.	$91,6 \pm 1,9$	7,8	$83,0 \pm 1,9$	7,7	0,001***
ИВ САД, %	$63,9 \pm 6,9$	28,4	$23,8 \pm 6,4$	26,3	0,001***
ИВ ДАД, %	$60,4 \pm 6,2$	25,6	$24,7 \pm 5,6$	22,9	0,001***
Ночные значения показателей					
САД, мм рт. ст.	$135,4 \pm 2,9$	11,9	$115,1 \pm 1,8$	7,3	0,001***
ДАД, мм рт. ст.	$81,6 \pm 2,2$	9,1	$67,3 \pm 1,7$	7,1	0,001***
ИВ САД, %	$73,4 \pm 6,9$	28,5	$26,4 \pm 6,2$	25,5	0,001***
ИВ ДАД, %	$60,0 \pm 6,9$	28,5	$14,9 \pm 4,2$	17,4	0,001***
ВУП САД, мм рт. ст.	$48,5 \pm 4,2$	17,4	$45,9 \pm 4,6$	18,9	1,0
ВУП ДАД, мм рт. ст.	$37,2 \pm 2,8$	11,7	$37,3 \pm 3,5$	14,3	0,13
СНС САД, %	$7,5 \pm 1,3$	5,4	$12,8 \pm 1,0$	4,3	0,002**
СНС ДАД, %	$10,8 \pm 1,6$	6,6	$19,0 \pm 1,2$	4,8	0,001***

Примечание. ЧСС — число сердечных сокращений; САД — систолическое артериальное давление; ДАД — диастолическое артериальное давление; АД_{ср} — среднее артериальное давление; ПАД — пульсовое артериальное давление; ДП — двойное произведение; ИВ — индекс времени; ВУП — величина утреннего подъёма; СНС — степень ночного снижения.

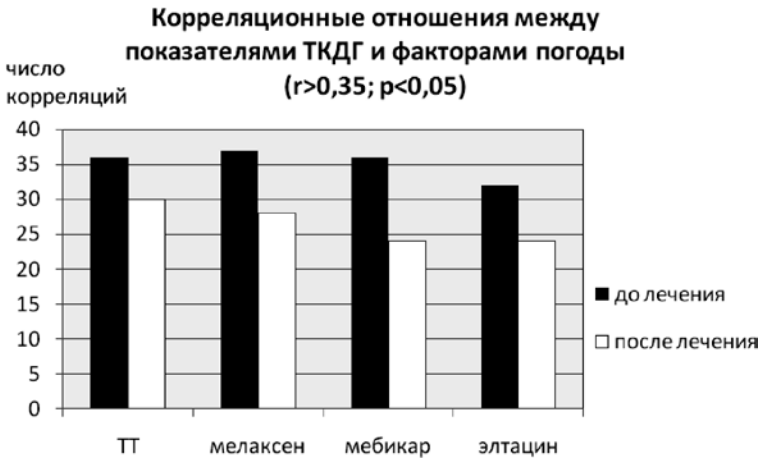


Рис. 7. Влияние погодных факторов на показатели ТКДГ под влиянием лечения с включением адаптогенов

По данным эхокардиографии выявлено улучшение систолической и диастолической функции ЛЖ под влиянием ТТ с **мелаксеном**, при этом уменьшается число корреляций с метеофакторами (с 41 до 20) (см. рис. 5). Исходно в основном влияют на показатели гемодинамики нижняя облачность ($0,36 < r < 0,50; p < 0,02$) и направление ветра ($0,42 < r < 0,49; p < 0,01$), которые уменьшают своё влияние после лечения. Увеличение значения пика *E* сопровождается уменьшением числа корреляций между этим показателем и погодой; уменьшение КСР и значения пика *A* — отсутствием корреляций между этими показателями и факторами погоды после проводимого лечения с включением мелаксена. После лечения с мелаксеном не выявлено корреляционных связей между показателями эхокардиографии и индексом геомагнитной активности (см. рис. 6).

По данным ТКДГ после комплексного лечения с **мелаксеном** увеличиваются исходно пониженные скоростные показатели церебрального кровотока по обеим СМА. По данным корреляционного анализа выявлено влияние в основном атмосферного давления ($0,35 < r < 0,49; p < 0,03$) и скорости ветра ($0,34 < r < 0,51; p < 0,03$) на показатели мозговой гемодинамики. После проводимого лечения уменьшается число корреляций между показателями обеих СМА с метеофакторами (с 37 до 28) (рис. 7).

Следовательно, по сравнению с ТТ, включение в лечение **мелаксена** значимо влияет на состояние гемодинамики пациентов с АГ и ИБС, что сопровождается уменьшением воздействия метеорологической и геомагнитной активности. Мелаксен усиливает гипотензивное действие ТТ, снижая уровень САД, ДАД, нормализуя суточный профиль АД; улучшает процессы сокращения и расслабления миокарда ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока; при этом выявлено уменьшение влияния метеорологической и геомагнитной активности на показатели гемодинамики, в основном на АД. Благоприятный эффект мелаксена (мелатонина), по-видимому, обусловлен его выраженной антиоксидантной активностью, сосудорасширяющим действием, кардиопротективным свойством, седативным и антистрессорным эффектами, а также наличием уникальных адаптивных возможностей и его ролью

«ключа» биологических ритмов, способностью корректировать эндогенные ритмы организма относительно экзогенных ритмов окружающей среды.

Проведена оценка клинической эффективности комплексной терапии с **мебикаром** больных АГ и ИБС с учётом влияния метеорологической и геомагнитной активности на состояние гемодинамики пациентов. Лечение с мебикаром на фоне ТТ оказалось эффективным с наступлением стойкого клинического эффекта на $5,2 \pm 0,3$ сут, о чём свидетельствуют благоприятные изменения клинических показателей и увеличение толерантности к физической нагрузке по данным теста с 6-мин ходьбой с $375,6 \pm 16,9$ до $415,0 \pm 10,7$ м ($p < 0,01$). По данным СМАД выявлен более выраженный гипотензивный эффект (по сравнению с ТТ) в виде снижения САД, ДАД в дневные и ночные часы. Установлено, что под влиянием **мебикара** уменьшается количество корреляционных связей между показателями СМАД и факторами погоды (с **30** до **25**) (см. рис. 3). Выявлено отсутствие корреляционных связей между САД, ДАД и факторами погоды после ТТ с мебикаром, однако при этом повышается чувствительность к метеофакторам показателей ПАД, АД_{ср}, ДП. Снижается влияние геомагнитной активности на показатели АД (см. рис. 4).

По данным эхокардиографии при лечении с включением **мебикара** выявлено улучшение показателей диастолической функции ЛЖ и параметров периферического сосудистого сопротивления, при этом уменьшается число корреляций с метеофакторами (с **43** до **22**) (см. рис. 5). Исходно в основном влияют на показатели гемодинамики параметры ветра ($0,33 < r < 0,50$; $p < 0,04$) и геомагнитная активность ($0,32 < r < 0,40$; $p < 0,05$), которые уменьшают своё воздействие после лечения (см. рис. 6). Однако повышается чувствительность к воздействию атмосферного давления и верхней облачности. До лечения погода влияет в основном на фракции выброса (ФВ) и показатели диастолической функции ЛЖ. Нормализация показателей диастолической функции ЛЖ под влиянием мебикара сопровождается уменьшением числа корреляций между этими показателями и метеофакторами.

По данным ТКДГ после комплексного лечения с **мебикаром** увеличиваются исходно пониженные скоростные показатели церебрального кровотока по обеим СМА, уменьшаются исходно повышенные индексы периферического сосудистого сопротивления (табл. 5). По данным корреляционного анализа выявлено влияние в основном атмосферного давления ($0,33r < 0,48$; $p < 0,05$) и скорости ветра ($0,33 < r < 0,49$; $p < 0,05$) на показатели мозговой гемодинамики. После проводимого лечения уменьшается число корреляций между показателями обеих СМА с метеофакторами (с **36** до **24**) (см. рис. 7).

Таким образом, включение в терапию **мебикара** усиливает гипотензивное действие ТТ, снижая уровень САД, ДАД; влияет на диастолическую функцию ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока и индексы периферического сосудистого сопротивления, что сопровождается уменьшением влияния геомагнитной активности на показатели АД и параметры эхокардиографии, уменьшением влияния метеофакторов на показатели транскраниальной доплерографии сосудов головного мозга. В наше исследование были включены только те пациенты, которые считали себя метеочувствительными и магнитозависимыми. Однако при изучении влияния факторов погоды на состояние гемодинамики установлено, что только около 65 % действительно являются таковыми. Соответственно 35 % пациентов, вероятно, являлись мнительными, слишком впечатлительными людьми, которые

субъективно чувствовали себя плохо под влиянием геомагнитных или метеопрогнозов. Вероятно, действие мебикара как метеопротектора и препарата, способного уменьшить влияние геомагнитной активности на показатели АД, обусловлено антиастеническим, психостимулирующим, антидепрессивным, седативным, ноотропным и вазовегетативным эффектами препарата.

Таблица 5. Показатели транскраниальной доплерографии сосудов головного мозга пациентов, получающих ТТ с мебикаром

Показатели	До лечения (<i>n</i> = 36)		После лечения (<i>n</i> = 36)		<i>p</i> <
	<i>M</i> ± <i>m</i>	σ	<i>M</i> ± <i>m</i>	σ	
Левая средняя мозговая артерия					
<i>V_{ps}</i> , см/с	101,2±1,8	11,0	98,7±1,5	9,1	0,20
<i>V_{ed}</i> , см/с	39,8±1,0	5,8	42,2±1,0	5,8	0,02*
TAMAX, см/с	68,4±1,2	7,3	67,9±1,7	10,1	0,68
PI	0,91±0,03	0,19	0,85±0,03	0,18	0,05*
RI	0,61±0,01	0,07	0,59±0,01	0,08	0,10
Правая средняя мозговая артерия					
<i>V_{ps}</i> , см/с	98,8±1,9	11,2	100,1±1,7	10,4	0,40
<i>V_{ed}</i> , см/с	42,4±0,9	5,3	45,0±0,9	5,5	0,02*
TAMAX, см/с	63,0±0,8	4,6	65,0±0,9	5,6	0,03*
PI	0,90±0,03	0,20	0,85±0,04	0,21	0,05*
RI	0,58±0,01	0,07	0,56±0,02	0,10	0,07

Проведена оценка клинической эффективности комплексной терапии с **элгацином** больных АГ и ИБС с учётом влияния метеорологической и геомагнитной активности на состояние гемодинамики пациентов. Лечение с элгацином на фоне ТТ оказалось эффективным с наступлением стойкого клинического эффекта на 4,9±0,9 сут, о чём свидетельствуют благоприятные изменения клинических показателей и увеличение толерантности к физической нагрузке по данным теста с 6-минутной ходьбой с 384,0±11,7 до 413,3±9,5 м (*p* < 0,002). По данным СМАД выявлен более выраженный гипотензивный эффект (по сравнению с ТТ) в виде снижения САД, ДАД, а также ЧСС и ДП. Установлено, что под влиянием **элгацина** уменьшается количество корреляционных связей между показателями СМАД и факторами погоды (с **32** до **21**) (см. рис. 3). Исходно в большей степени на показатели АД влияет атмосферное давление (0,30 < *r* < 0,46; *p* < 0,001) и средняя облачность (0,30 < *r* < 0,50; *p* < 0,001), наиболее чувствительны при этом АД_{ср} и ДП. После лечения уменьшается влияние атмосферного давления, облачности, не выявлено корреляционных связей между ЧСС и метеофакторами как до, так и после лечения.

По данным эхокардиографии выявлено улучшение сократительной функции ЛЖ под влиянием ТТ с **элгацином**, при этом уменьшается число корреляций между показателями систолической, насосной функции ЛЖ и метеофакторами (с **44** до **18**) (табл. 6, см. рис. 5, 6). Исходно на показатели эхокардиографии в основном влияет скорость ветра (0,34 < *r* < 0,44; *p* < 0,04).

Под воздействием лечения снижается влияние практически всех погодных факторов, в большей степени атмосферного давления и скорости ветра.

Таблица 6. Основные структурно-функциональные показатели ЛЖ у больных с АГ и ИБС до и после терапии с включением элтации

Показатели	До лечения ($n = 35$)		После лечения ($n = 35$)		p
	$M \pm m$	σ	$M \pm m$	σ	
ТМЖП, см	1,35±0,01	0,09	1,34±0,01	0,07	0,42
ТЗСЛЖ, см	1,37±0,01	0,07	1,36±0,01	0,08	0,53
КДР, см	4,9±0,04	0,3	4,9±0,04	0,2	0,08
КСР, см	3,5±0,04	0,2	3,4±0,04	0,2	0,01**
КДО, мл	118,9±2,1	12,6	115,4±1,7	10,0	0,04*
КСО, мл	50,7±1,0	6,2	46,7±0,9	5,1	0,001***
ФВ %	57,3±0,8	5,0	59,3±0,9	5,3	0,04*
ФУ, %	30,2±0,7	3,8	30,8±0,8	4,9	0,34
УО, мл	68,1±1,9	11,2	68,6±1,9	10,9	0,76
УИ, мл/м ²	37,0±1,1	6,4	37,2±1,1	6,3	0,82
МОС, л/мин	5,7±0,2	1,1	5,1±0,2	1,0	0,007**
СИ, л/мин/м ²	3,1±0,1	0,6	2,8±0,1	0,6	0,01**
ОПСС, дин/с/см ⁻⁵	1700,8±60,1	355,8	1606,4±75,4	445,9	0,16
УПСС, дин/с/см ⁻⁵ /м ²	923,4±32,9	194,9	875,5±43,0	254,4	0,19
Пик E , м/с	0,52±0,02	0,12	0,57±0,02	0,10	0,03*
Пик A , м/с	0,55±0,02	0,11	0,53±0,02	0,10	0,39
E/A	1,0±0,05	0,32	1,11±0,03	0,21	0,06
ВИР, мс	95,5±1,7	10,1	94,2±1,8	10,5	0,20

Примечание. ТМЖП — толщина межжелудочковой перегородки; ТЗСЛЖ — толщина задней стенки левого желудочка; КДР — конечный диастолический размер; КСР — конечный систолический размер; КДО — конечный диастолический объём; КСО — конечный систолический объём; ФВ — фракция выброса; ФУ — фракция укорочения; УО — ударный объём; УИ — ударный индекс; МОС — минутный объём сердца; СИ — сердечный индекс; ОПСС — общее периферическое сосудистое сопротивление; УПСС — удельное периферическое сосудистое сопротивление; пик E — скорость раннего диастолического наполнения; пик A — скорость медленного наполнения; E/A — отношение скорости раннего диастолического наполнения к скорости медленного наполнения; ВИР — время изоволюметрического расслабления.

По данным ТКДГ после ТТ с элтацией увеличиваются исходно пониженные скоростные показатели церебрального кровотока по правой СМА. После проводимого лечения уменьшается число корреляций между показателями ТКДГ и метеофакторами (с 32 до 24), влияние атмосферного давления и ветра. Корреляционный анализ свидетельствует об уменьшении влияния погоды на показатели левой СМА, скоростные показатели правой СМА, усилении влияния метеофакторов на индексы периферического сопротивления правой СМА (см. рис. 7).

Следовательно, по сравнению с ТТ, включение в лечение **элтацина** значительно влияет на состояние гемодинамики пациентов с АГ и ИБС, что сопровождается уменьшением влияния погодных факторов на параметры АД, уменьшением влияния атмосферного давления на показатели сердечной и мозговой гемодинамики, уменьшением числа корреляций между показателями диастолической функции ЛЖ и метеофакторами, снижением влияния погоды на скоростные показатели правой СМА что, вероятно, обусловлено адаптогенным и метеопротективным свойством элтацина. Благоприятное влияние элтацина на состояние гемодинамики, возможно, обусловлено его кардиопротективным действием, в основе которого лежит способность к стимуляции энергообразующей и энергосберегающей функции клеток. Элтацин обладает антиоксидантным и антигипоксанта́нным действием, повышает сократительную способность миокарда, способствуя энергетической поддержке кардиомиоцитов. Это сопровождается положительным действием на гемодинамику, существенным повышением толерантности к физической нагрузке. Метеопротективный эффект элтацина связан, вероятно, со снижением генерации активных форм кислорода, так как он является активным антиоксидантом.

Таблица 7. Адаптогены в коррекции влияния факторов погоды у метео- и магниточувствительных больных с АГ и ИБС

Показатели	ТТ	ТТ + мелаксен	ТТ + мебикар	ТТ + элтацин
САД	+ (снижение влияния точки росы)	+ (снижение влияния верхней облачности, геомагнитной активности)	+ (снижение влияния геомагнитной активности)	+ (снижение влияния атмосферного давления, облачности)
ДАД		+ (снижение влияния верхней облачности, геомагнитной активности)	+ (снижение влияния геомагнитной активности)	+ (снижение влияния атмосферного давления, облачности)
Систолическая функция	+	+ (снижение влияния нижней облачности, направления ветра)		+ (снижение влияния атмосферного давления, ветра)
Диастолическая функция	+	+ (снижение влияния нижней облачности, направления ветра, геомагнитной активности)	+ (снижение влияния ветра, геомагнитной активности)	
Скоростные показатели мозгового кровотока	+	+ (снижение влияния средней облачности, ветра)	+ (снижение влияния направления ветра)	+ (снижение влияния атмосферного давления, ветра)
Индексы периферического сопротивления сосудов головного мозга			+ (снижение влияния облачности)	

Примечание. (+) — положительный эффект.

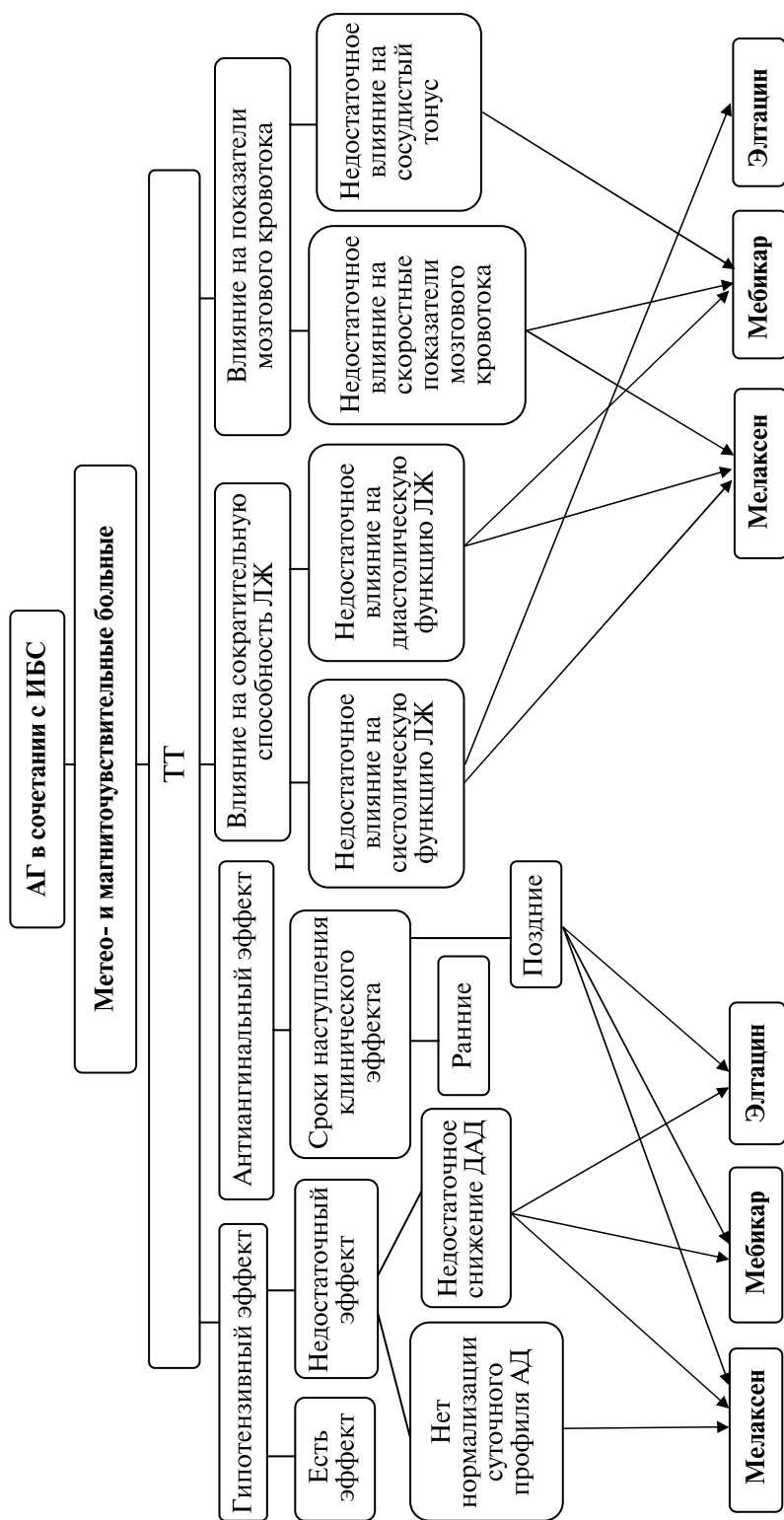


Рис. 8. Алгоритм (1), отражающий влияние ТТ и включение в терапию адаптогенов на гемодинамику пациентов. Сплошная линия означает положительный эффект, линия со стрелкой — положительный эффект при добавлении к ТТ адаптогенов

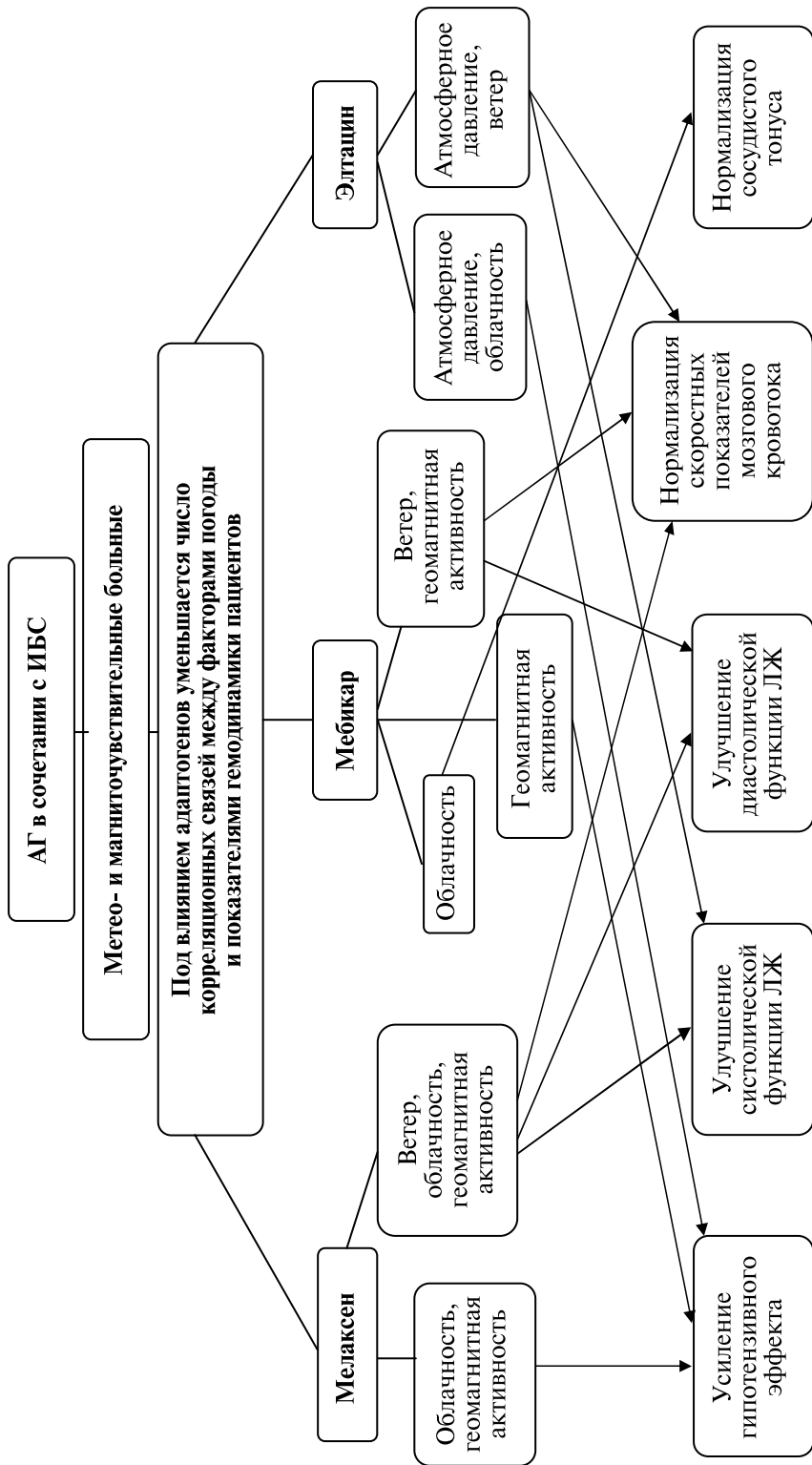


Рис. 9. Алгоритм (2), отражающий влияние адаптогенов на корреляционные связи между факторами погоды и показателями гемодинамики пациентов

Влияние препаратов адаптогенного действия на состояние гемодинамики пациентов с АГ и ИБС с учётом влияния факторов метеорологической и геомагнитной активности представлена в табл. 7.

На основании полученных данных разработаны алгоритмы (1, 2) (рис. 8, 9) использования исследуемых адаптогенных препаратов в зависимости от необходимости коррекции гемодинамических нарушений у метео- и магниточувствительных больных АГ и ИБС.

ВЫВОДЫ

1. На основе корреляционного анализа установлено, что пациенты с нормальным и высоким нормальным АД примерно в одинаковой степени подвержены воздействию метеофакторов; при высокой степени АГ число корреляций между показателями АД и факторами погоды увеличивается практически втрое.

2. Пациенты, страдающие АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС и получающие ТТ, подвержены влиянию многих погодных факторов, о чём свидетельствует большое количество значимых корреляционных связей между изучаемыми параметрами. Включение в терапию мелаксена и элтацина уменьшает влияние погоды на показатели гемодинамики.

3. Традиционная терапия больных АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС обладает гипотензивным эффектом, влияя в основном на САД; оказывает антиангинальное действие, благоприятно влияя на систолическую и диастолическую функции ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока; при этом ТТ существенно не уменьшает влияния факторов погоды на состояние гемодинамики пациентов.

4. Включение в терапию мелаксена усиливает гипотензивное действие ТТ, снижая уровень САД, ДАД, нормализуя суточный профиль АД; улучшает процессы сокращения и расслабления миокарда ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока; при этом выявлено уменьшение влияния метео- и геомагнитной активности на параметры АД и показатели эхокардиографии.

5. Включение в терапию мебикара усиливает гипотензивное действие ТТ, снижая уровень САД, ДАД; влияет на диастолическую функцию ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока и индексы периферического сосудистого сопротивления, что сопровождается уменьшением влияния геомагнитной активности на параметры АД и показатели эхокардиографии, уменьшением влияния метеофакторов на показатели транскраниальной доплерографии сосудов головного мозга.

6. Включение в терапию элтацина усиливает гипотензивное действие ТТ, снижая уровень САД, ДАД; улучшает сократительную функцию миокарда ЛЖ; нормализует скоростные показатели мозгового кровотока; это сопровождается уменьшением влияния метеофакторов (в частности, атмосферного давления) на параметры АД и показатели эхокардиографии.

7. Выявлены метеопротективные свойства лекарственных препаратов с адаптогенным действием (мелаксена, мебикара, элтацина), а также магнитопротективные свойства мелаксена и мебикара, которые могут быть использованы для лечения метео- и магниточувствительных больных с АГ II–III стадии, 2–3-й степени в сочетании с ИБС.

ЛИТЕРАТУРА

- [Бреус, 2010] *Бреус Т. К.* Космическая и земная погода и их влияние на здоровье и самочувствие людей // *Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии. Вып. 2: Физические подходы и клиническая практика / Под ред. Р. Р. Назирова.* М.: КДУ, 2010. С. 99–110.
- [Заславская и др., 2009] *Заславская Р. М., Шербань Э. А., Логвиненко С. И., Тейблум М. М.* // Предварительные данные по изучению влияния погодных факторов на показатели гемодинамики больных артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца при традиционном лечении и комплексном лечении с мелаксеном // *Вестн. Рос. ун-та Дружбы народов. (Сер. Медицина.)* 2009. № 4. С. 290–293.
- [Оганов, Масленникова, 2007] *Оганов Р. Г., Масленникова Г. Я.* Профилактика сердечно-сосудистых заболеваний — реальный путь улучшения демографической ситуации в России // *Кардиология.* 2007. Т. 47. № 1. С. 4–7.
- [Результаты..., 2006] Результаты многоцентровых статистических исследований влияния геомагнитных возмущений на острую сердечно-сосудистую и церебральную патологию / Ю. И. Гурфинкель, Т. А. Митрофанова, Л. М. Кукуй [и др.] // *Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей / Ин-т народнохозяйственного прогнозирования РАН [и др.]; под ред. Б. А. Ревича.* М., 2006. С. 185–196.
- [Савенков, 2005] *Савенков М. П.* Пути повышения эффективности лечения больных артериальной гипертензией // *Consilium Medicum.* 2005. Т. 7. № 5. С. 360–363.
- [Савенков и др., 2007] *Савенков М. П., Иванов С. Н., Сафонова Т. Е.* Фармакологическая коррекция метеопатических реакций у больных с артериальной гипертензией // *Трудный пациент.* 2007. Т. 5. № 3. С. 17–20.
- [Чазов, 2002] *Чазов Е. И.* Проблемы первичной и вторичной профилактики сердечно-сосудистых заболеваний // *Терапевтический архив.* 2002. Т. 74. № 9. С. 5–8.
- [Чазова, Беленков, 2004] *Чазова И. Е., Беленков Ю. Н.* От идеи к клинической практике: первые результаты Российского национального исследования оптимального снижения артериального давления (РОСА) // *Системные гипертензии.* 2004. Т. 6. № 2. [Электронный текст]. Режим доступа: <http://www.consilium-medicum.com/magazines/magazines/special/hypertens/article/10299>.
- [Шальнова, Деев, 2011] *Шальнова С. А., Деев А. Д.* Ишемическая болезнь сердца в России: распространённость и лечение (по данным клинико-эпидемиологических исследований) // *Терапевт. архив.* 2011. Т. 83. № 1. С. 7–11.
- [Эффекты..., 2006] Эффекты геомагнитной активности у кардиологических больных / О. Ю. Атьков, А. Н. Рогоза, Г. В. Рябыкина [и др.] // *Космич. погода: её влияние на человека и биологию. объекты: материалы Международ. конф. Москва, 17–18 февр. 2005 / ОАО «Рос. железные дороги»; под ред. О. Ю. Атькова, Ю. И. Гурфинкеля.* М., 2006. С. 14–15.
- [Some aspects..., 2008] Some aspects of the biological effects of space weather / Т. К. Breus, V. A. Ozheredov, E. V. Syutkina [et al.] // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2008. V. 70. N. 2–4. P. 436–441.
- [Special report..., 2009] Special report: National trends in rates of death and hospital admissions related to acute myocardial infarction, heart failure and stroke, 1994–2004 / J. V. Tu, L. Nardi, J. Fang [et al.]; Canadian Cardiovascular Outcomes Research Team // *Canadian Medical Association J.* 2009. V. 180. N. 13. P. E118–E125.

THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL AND GEOMAGNETIC ACTIVITY ON HEMODYNAMICS IN PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION AND ISCHEMIC HEART DISEASE AND THE SEARCH FOR PHARMACOLOGICAL PROTECTION

*E. A. Shcherban*¹, *R. M. Zaslavskaya*², *M. M. Tejblum*³

¹ Belgorod City University, Belgorod, e-mail: andreyella@yandex.ru;

² City Clinic Hospital N. 60, Moscow, Russia, e-mail: info@gkb60.mosgorzdrav.ru;

³ MIC "Solidarity for Life", Moscow, Russia, e-mail: misha@tejblum.pp.ru

There were examined correlation between meteorological and geomagnetic factors and hemodynamic parameters in 188 patients with different level of blood pressure (BP), including patients with arterial hypertension (AH) and ischemic heart disease (IHD) and search of pharmacological defence. 24-hours blood pressure monitoring, echocardiography (EchoCG), transcranial dopplerography (TCDG) of cerebral vessels were used before and after therapy with adaptogens. All patients were divided in 7 groups depending of therapy kind: without therapy (2 groups), traditional therapy (TT), using drugs with adaptogenic action (melaxen, mebicar, eltacin). Melaxen is a synthetic analogue of neurohormone of epiphysis (melatonin, "Unipharm, Inc.", USA), mebicar is anxiolytic ("Tatchempharmdrugs", Russia), eltacin is a combined aminoacids: glycine, glutaminic acid, cystine (Scientific research Institute of citochemistry and molecular pharmacology, Russia). Weather factors and Kp index were received from server "Weather of Russia" (meteo.infospace.ru).

On the basis of correlation analysis there are established, that patients with normal and moderate increased BP are exposed to influence of meteofactors in equal grad; number correlations between BP and weather factors are increased by 3 times in high grad AH.

TT in patients with AH, stage II–III, 2...3 grad with IHD produces hypotensive effect, influencing on systolic BP (SBP); TT produces antianginal action, positive influencing on systolic and diastolic function of left ventricle, normalizes cerebral blood circulation velocity parameters, but TT does not reduce influence of weather factors on hemodynamics.

Including in TT melaxen increases hypotensive action of TT, reducing SBP, diastolic BP (DBP) level, normalizing daily profile of BP, myocardial contractive and relaxing functions of left ventricle improvements, cerebral circulation velocity parameters normalizes. There are revealed reduction influence of meteo- and geomagnetic activity on BP and EchoCG parameters.

Including in TT mebicar increases hypotensive action of TT, reducing SBP, DBP, influences on diastolic function of left ventricle, normalizes cerebral circulation velocity and indexes peripheral vessel resistance, what are according by reduction of influence of geomagnetic activity on BP and EchoCG parameters, reduction of influence of meteofactors on TCDG cerebral vessel parameters.

Including in TT eltacin increases TT hypotensive action, decreasing SBP, DBP, myocardial contractive functions of left ventricle improvements, cerebral circulation velocity normalizes. There are revealed reduction of influence of meteofactors on BP and EchoCG parameters.

There are revealed meteoprotective action of drugs with adaptogen properties (melaxen, mebicar, eltacin) and magnetoprotective action of melaxen and mebicar, which may be used for treatment of meteo- and magnetosensitive patients with AH and IHD.

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И АТМОСФЕРНЫЕ НАНОАЭРОЗОЛИ

А. А. Лушников^{1,2}, В. А. Загайнов², Ю. С. Любовцева¹, А. Д. Гвишиани¹

¹ Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

² Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, Москва, Россия

Рассматриваются процессы, ответственные за возникновение и рост наноаэрозольных частиц в атмосфере. Среди факторов, влияющих на производительность источников наночастиц, космическое излучение — один из самых заметных. В нижней тропосфере космические лучи поставляют ионы, активно участвующие в химических и фотохимических процессах, ведущих к зарождению аэрозольных частиц. Показано, что даже незначительное увеличение скорости образования паров низколетучих соединений приводит к многократному увеличению скорости образования наночастиц. Обсуждаются процессы взаимодействия ионов с аэрозольными частицами. Показано, что скорость конденсации ионов на нейтральных аэрозолях заметно превышает скорость осаждения на них нейтральных молекул. Возникающие в результате конверсии газ — частица аэрозоли являются важным фактором, воздействующим на климатические и погодные условия. Кроме того, присутствие аэрозольных частиц приводит к изменению проводимости атмосферы и её электрического состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Хотя термин «аэрозоль» хорошо известен каждому, мало кто подозревает, что большинство аэрозольных частиц просто невидимы глазом, а существующие приборы не могут быть использованы, так как частицы атмосферных аэрозолей состоят из сравнительно летучих соединений, которые испаряются при вакуумировании или воздействии световыми и электронными пучками. Кроме того, мельчайшие аэрозольные частицы совсем непросто отобрать и поместить в регистрирующую часть прибора. В результате наши познания об аэрозольных частицах ещё более скудные, чем о субатомных частицах и кварках. И всё же частицы с размерами, не превышающими долей микрона (речь идёт о диапазоне $10^{-7} \dots 10^{-4}$ см, для сравнения размеры атома $\sim 10^{-8}$ см), играют огромную роль не только в формировании нынешнего химического состава атмосферы Земли, но и в формировании жизни на Земле [Charlson, Heitzenberg, 1995; Friedlander, 2000; Seinfeld, Pandis, 2006]. Без аэрозолей жизнь в нынешнем её виде не могла бы существовать. Дело в том, что в условиях земной атмосферы невозможно образование облаков без центров конденсации. Давление водяных паров в средней и верхней тропосфере соответствует пересыщениям порядка 1,01, в то время как критическое пересыщение (когда возможно образование частиц за счёт спонтанной нуклеации) — порядка четырёх [Pruppacher, Klett, 2004]. **Центрами конденсации служат аэрозольные частицы.** Без облаков невозможен круговорот воды в природе, а, следовательно, невозможна и жизнь. Далее, облака влияют на климат и погоду, а значит и на условия существования человеческих сообществ и здоровье отдельных людей. Нужно упомянуть и прямое воздействие наноаэрозольных частиц на человека и биологические объекты [Kueger, Reed, 1976]. Хотя при вдыхании наноаэрозолей в человеческий организм попадает очень маленькое количество посторонних веществ, аэрозольные наночастицы сами способны проникать в кровь и таким образом эффективно воздействовать на организм.

Именно на этом принципе основано действие нанолечарств, которые позволяют избегать завышенных доз не всегда полезных лечащих агентов.

Учитывая всё вышесказанное становится понятным, что исследование аэрозольных процессов в атмосфере представляет собой исключительно важную задачу. Ниже мы коснёмся только одного аспекта физики атмосферных аэрозолей. Мы покажем, что изменения космической погоды, связанные с изменениями электрического состояния атмосферы, серьёзно сказываются на атмосферных аэрозольных процессах и, тем самым, на здоровье людей.

Огромное количество литературы посвящено атмосферным наноаэрозолям. Цель настоящего краткого обзора — обратить внимание специалистов — медиков и экологов — на роль атмосферных наноаэрозолей в формировании климатических и погодных условий, а также дать представление о том, что собой представляют столь ничтожно малые объекты как наноаэрозоли.

1. АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Несмотря на то, что очень мало известно о составе наноаэрозольных частиц и их свойствах [Kulmala et al., 2004], построение моделей аэрозольных процессов всё же возможно ценой введения ряда допущений относительно структуры самих частиц и свойств составляющих их субстанций. Например, предполагается, что частицы имеют сферическую форму, а их плотность равна 2 г/см^3 , или что распределение частиц по размерам подчиняется логнормальному закону (см. [Friedlander, 2000]). **Более или менее достоверно измеряется счётная концентрация наноаэрозольных частиц, которая меняется в интервале $10 \dots 10^4 \text{ см}^{-3}$, и её зависимость от времени.**

Мельчайшие аэрозольные частицы появляются при воздействии ряда специфических механизмов. Частицы возникают в результате спонтанной нуклеации некоторых низколетучих соединений, которые, в свою очередь, образуются из органических газов, выделяемых растительностью, или газообразных продуктов человеческой деятельности.

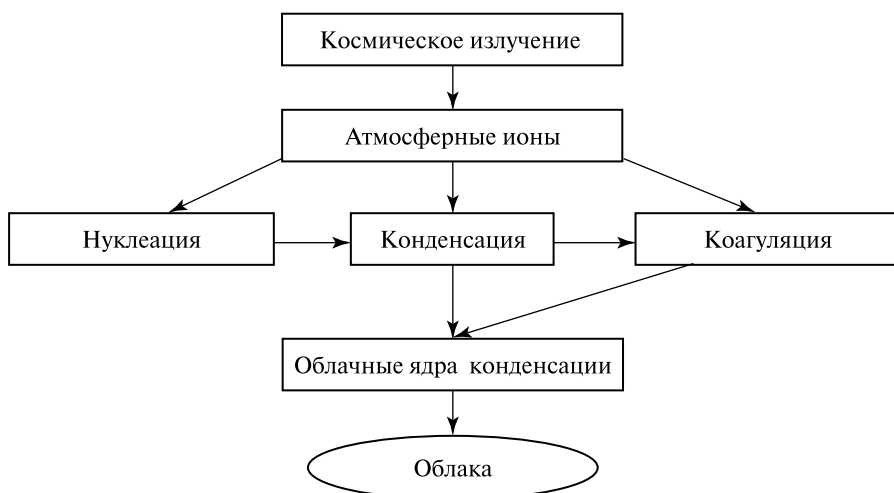


Рис. 1. Конверсия газ – частица

В результате цепочки химических и фотохимических превращений этих газов возникают низколетучие органические продукты, которые ответственны как за зарождение частиц, так и за их рост. Механизм возникновения облачно-активных частиц проиллюстрирован на рис 1. Зародыши аэрозольных частиц возникают вследствие нуклеации низколетучих паров органических соединений, получающихся в результате цепи химических и фотохимических превращений выбросов в атмосферу малых органических составляющих либо растительным покровом Земли, либо являющихся продуктами антропогенного происхождения. В результате нуклеации образуются зародыши, способные к дальнейшему росту за счёт конденсации низколетучих малых газовых примесей и паров воды. Этот процесс может сопровождаться химическими реакциями на поверхности частицы, которые также могут давать конденсирующиеся соединения. Далее вступает в игру коагуляция, т.е., столкновения частиц с последующим их слиянием. Именно так образуются аэрозольные дымки в малозагрязненных регионах земного шара (см. [Kulmala et al., 2004; Lyubovtseva et al., 2005]).

Жизнь наноаэрозоля начинается ещё задолго до появления различных частиц. Первая стадия включает химические и фотохимические реакции летучих малых газовых примесей и их превращение в низколетучие соединения. Эти примеси осаждаются на зародышах сернокислого аммония, образующихся в результате спонтанной нуклеации газофазных примесей серной кислоты и аммиака, всегда присутствующих в атмосфере. Низколетучая органика служит материалом для укрупнения этих зародышей (конденсационный рост частиц). Частицы, таким образом, дорастают до детектируемого размера (3 нм) и продолжают расти за счёт конденсации низколетучих органических паров, дорастая в конечном итоге до размеров 0,1 мкм, когда эти частицы становятся активными участниками облакообразующих процессов.

Моря и океаны также являются источниками мельчайших аэрозольных частиц (см. [Seinfeld, Pandis, 2006]). Есть два главных механизма образования морских аэрозолей: ветровое разбрызгивание гребешков волн и выделение диметилсульфида планктоном. В первом случае мельчайшие солевые частицы образуются в результате высыхания брызг, во втором — за счёт химической и фотохимической конверсии диметилсульфида сначала в серную кислоту и затем в сульфат аммония. Это основные частицы, которые поставляет мировой океан в атмосферу. Солевые частицы также подвергаются трансформации за счёт образования водяной плёнки на их поверхности и всевозможных реакций с участием малых органических примесей.

Космическое излучение на всех этапах влияет на скорость процессов в цепочке химических и фотохимических аэрозолеобразующих реакций. Это связано с ионизацией воздуха в нижней тропосфере [Pierse, Adams, 2009]. Образующиеся ионы электризуют частицы. И сами ионы, и заряженные частицы активно взаимодействуют с нейтральными малыми газовыми примесями в атмосфере. Например, конденсация полярных молекул идёт значительно быстрее на заряженных частицах, чем на нейтральных [Nadykto, Yu, 2003; Lushnikov, Kulmala, 2004a].

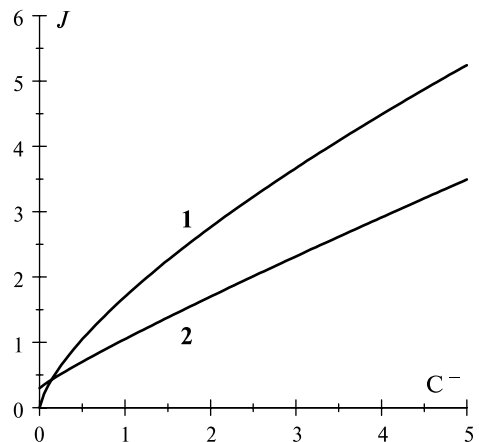
До сих пор остаются не выясненными ни сами цепочки физико-химических процессов, завершающихся образованием аэрозолей, ни константы скоростей соответствующих реакций, хотя исследования этих процессов продолжают уже несколько десятилетий. Очень популярной была гипотеза о роли

молекул серной кислоты, которые образуют гидратный кластер, служащий ядром роста частицы за счёт присоединения нелетучей органики. Недавние эксперименты в ЦЕРНе [Kirkby et al., 2011] показали, что такой механизм не может дать объяснения наблюдаемым скоростям образования атмосферных наноаэрозолей. На самом деле конденсирующаяся серная кислота реагирует с аммиаком и образует частицу, состоящую из сульфата аммония. Важной чертой этого процесса является стабилизация зародыша молекулами аммиака, так как время жизни непрореагировавшей молекулы серной кислоты на поверхности зародыша ничтожно, и она испаряется, если только не будет нейтрализована молекулой аммиака.

Таким образом, зародыш растёт, присоединя сразу две молекулы, что тормозит процесс зародышеобразования. Дополнительная ионизация пучком частиц, имитирующим воздействие космических лучей на атмосферу, увеличивает скорость нуклеации в несколько раз (рис. 2). Именно космические лучи продуцируют ионы, которые также могут быть вовлечены в аэрозолеобразующие атмосферные циклы в нижней тропосфере. Космическое излучение производит 10...30 пар ионов в кубическом сантиметре за секунду [Seinfeld, Pandis, 2006; Pierse, Adams, 2009]. Космический источник ионов в нижней тропосфере поддерживает счётную концентрацию ионов на уровне 10^3 ионных пар в кубическом сантиметре. Ионы заметно агрессивнее нейтральных молекул в химических процессах, и, следовательно, могут интенсифицировать процесс образования наноаэрозолей [Harrison, Carslaw, 2003; Smirnov, 2000; Yu, 2010; Yu, Turco, 2001].

Конечно, солнечная радиация — главнейший фактор, управляющий процессами в земной атмосфере. Многие вариации в интенсивностях аэрозолеобразования в атмосфере связаны с суточными, сезонными и годовыми изменениями мощности солнечной радиации, которая ответственна за фотохимические циклы реакций. Но само солнечное излучение не может ионизовать воздух нижней тропосферы, так как в спектре солнечного излучения в тропосфере отсутствует жёсткое излучение с энергиями, превышающими порог ионизации. Ионизация идёт за счёт вторичного космического излучения и естественной радиоактивности земной коры. Космическое излучение в спокойные периоды поставляет около 20 % ионов, но в периоды солнечной и галактической активности этот вклад резко возрастает, что сопровождается появлением дополнительного количества аэрозольных частиц и ростом облачного покрова [Harrison, Carslaw, 2003].

Рис. 2. Зависимость скорости нуклеации от концентрации отрицательных ионов [Kirkby et al., 2011]. Верхняя (1) и нижняя (2) кривые соответствуют концентрациям $[H_2SO_4] = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-3}$ и $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Скорость нуклеации J приведена в единицах $(\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1})$, а концентрация C^- — в $(\text{см}^{-3} \times 1000)$. Отчетливо видно влияние электрического состояния атмосферы на скорость нуклеации



2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Хотя с момента открытия вторичных атмосферных аэрозолей минуло более ста лет, интерес к ним не затухает до сих пор. Статьи, сообщающие о результатах полевых измерений, продолжают появляться в связи с нуждами климатологии, экологии и аэрозольной медицины. Также продолжают появляться попытки смоделировать атмосферные аэрозольные процессы (например, [Korhonen et al., 2004]). Более ранние цитирования можно найти в этой работе.

Все модели без исключения в качестве исходной принимают точку зрения, что именно внутриатмосферные химические реакции ответственны за появление мельчайших нелетучих прекурсоров, которые порождают субнано- и наночастицы. В свою очередь, «рождённые из воздуха» частицы сами являются активными участниками химических циклов. Они могут выступать как катализаторы или на их поверхности могут протекать реакции с участием веществ, входящих в состав аэрозольных частиц. Хотя мы достоверно не знаем, из чего состоят эти частицы, можно измерить скорость их появления. Современные приборы, основанные на электроразрядке малых частиц и последующем их укрупнении, позволяют измерять спектры размеров частиц в интервале 3...1000 нм. Более простой метод — диффузионное разделение частиц и последующее укрупнение (без предварительной зарядки) — позволяет производить измерения в этих же пределах. Таким образом, измерения позволяют определить скорость производства частиц с размерами более 3 нм, а не число жизнеспособных зародышей, размер которых значительно меньше. Рост частиц до измеримого размера сопровождается их потерями за счёт осаждения на более крупные частицы, внутримодовой коагуляции, осаждения на листву и т. д.

Появившиеся аэрозольные частицы способны конденсировать на своей поверхности газообразные низколетучие соединения и пары воды. За счёт этого частица растёт и дорастает до размеров порядка десятка нанометров. Характерные времена этого процесса порядка нескольких часов в фоновых условиях и нескольких десятков минут в промышленно развитых (т. е. сильно загрязнённых) городах. Следующий этап жизни аэрозольных частиц — их коагуляция. Речь идёт о столкновениях частиц и их слиянии в одну большего размера. Характерные времена коагуляции порядка нескольких дней. За счёт этого механизма и параллельно идущей конденсации частицы дорастают до субмикронных и микронных размеров, и тогда они становятся активными участниками климатических и погодных процессов [Lushnikov, Kulmala, 2000a]. Схема образования аэрозольных частиц в атмосфере показана на рис. 1.

Мельчайшие частицы образуются за счёт спонтанной нуклеации паров низколетучих соединений. Хотя скорость самого этого процесса не может быть рассчитана теоретически (существующие теории этого явления крайне несовершенны и дают расхождение с экспериментальными данными в сотни и тысячи раз, скорость производства наноаэрозолей может быть измерена [Kulmala et al., 2004]). Именно эта величина и должна вводиться в теоретическую эволюционную модель. Сама эволюционная модель схематически выглядит следующим образом [Friedlander, 2000]:

$$\frac{\partial c(g, t)}{\partial t} = I(g, t) + \kappa(g)C(t) \frac{\partial c(g, t)}{\partial g} + (K_{cc})_g - \lambda(g, t) c(g, t). \quad (1)$$

В этом уравнении $c(g, t)$ — счётная концентрация нанозерозольных частиц заданной массы g в момент времени t ; $I(g, t)$ — скорость подачи частиц в атмосферу (число частиц массы g , зарождающихся в единицу времени в единице объёма); второе слагаемое с производной по массе описывает скорость конденсационного роста (испарения) частиц; $\kappa(g)$ — константа скорости конденсационного процесса; $C(t)$ — концентрация конденсирующихся паров; третье слагаемое описывает рост частиц в аэрозоле за счёт коагуляционных процессов (оно квадратично по концентрации, и здесь записано в символическом виде); последнее слагаемое описывает гибель частиц заданного размера, частицы гибнут за счёт гравитационного осаждения, вымывания осадками, инерционного осаждения на препятствиях и т. д.; $\lambda(g, t)$ — вероятность осаждения одной частицы заданной массы в единицу времени. Это процесс первого порядка по концентрации аэрозольных частиц.

Сразу видно, что описанная выше модель не содержит никаких сведений о внутриатмосферных химических процессах, о которых мы так ничего и не знаем. Цена, которую приходится за это платить, — введение функции источника $I(g, t)$, которую нужно измерять, и концентрации конденсирующихся нелетучих газовых компонентов C . Обе эти функции параметризуются небольшим числом измеряемых параметров. Например, зависимость от времени вводится периодической функцией времени таким образом, чтобы отразить влияние солнечного и космического излучения, которые зависят от времени суток. Тогда остаётся измерить только один параметр — коэффициент при соответствующей периодической зависимости. Скорости конденсации и коэффициенты коагуляции — известные функции размеров частицы. Например, коэффициент конденсации для очень маленьких частиц радиуса a есть просто $\kappa = a^2 v_T \pi$, где v_T — тепловая скорость конденсирующихся молекул.

Для концентрации нелетучих компонентов C тоже можно написать кинетическое уравнение, включающее источник и сток на аэрозольные частицы:

$$\frac{dC}{dt} = I_V - \lambda C. \quad (2)$$

Здесь $\lambda = \int \kappa(g, t) c(g, t) dg$. Функция источника I_V параметризуется так же, как и для аэрозольных частиц.

При концентрации ниже критической процесс аэрозолеобразования не идёт, и концентрация в результате действия источника растёт линейно со временем. Как только концентрационный порог превышен (момент времени t^*), начинается бурный рост концентрации аэрозольных частиц. Они конденсируют на своей поверхности пар, в результате чего его концентрация уменьшается. В момент t^{**} пар истощается настолько, что образование новых частиц прекращается. Пунктирная кривая (рис. 3) показывает зависимость от времени концентрации пара в присутствии посторонних частиц. Эта кривая иллюстрирует ситуацию, когда стоки пара предотвращают появление новых частиц за счёт спонтанной нуклеации.

Мы проиллюстрируем процесс образования аэрозольных частиц в атмосфере с помощью следующей простой модели [Lushnikov, Kulmala, 2000b]. Пусть в начальный момент времени в совершенно пустом пространстве начинает работать источник низколетучего вещества. Его концентрация линейно растёт, и в момент времени t_1 достигает критического значения, при котором

образуются аэрозольные частицы. Далее эти частицы начинают поглощать низколетучий газовый компонент, вследствие чего концентрация C падает со временем. К моменту t_2 она снова достигает критического значения и продолжает падать. Аэрозольные частицы, таким образом, появляются в течение короткого интервала времени $[t_1, t_2]$. Такое явление называется нуклеационным всплеском. Оно много раз наблюдалось разными группами исследователей. Рисунок 3 иллюстрирует возникновение нуклеационного всплеска. Пунктирная кривая показывает ситуацию, когда нуклеационный всплеск не возникает вовсе. Например, если в начальный момент времени в атмосфере присутствовал посторонний аэрозоль, он может начать поглощать конденсирующиеся пары и не дать их концентрации вырасти выше критического значения, при котором начинается нуклеация (прямая линия на рисунке). При увеличении скорости подачи конденсирующихся паров в атмосферу их концентрация наконец достигает критического значения. После перехода через критическую точку концентрация паров почти скачкообразно возрастает [Lushnikov, Kulmala, 2000b]. Качественная картина этого явления представлена на рис. 4. Таким образом, даже очень небольшого воздействия на скорость подачи пара достаточно для увеличения скорости нуклеации на порядки.

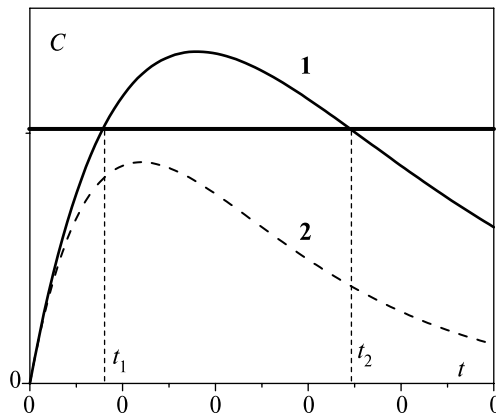


Рис. 3. Нуклеационный всплеск. На графике показано изменение со временем концентрации паров низколетучих соединений

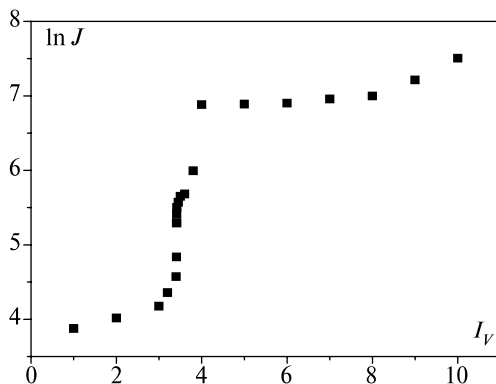


Рис. 4. Нуклеационный всплеск в присутствии стока

3. КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И АЭРОЗОЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Интенсивность космического излучения, достигающего земной поверхности, в сотни раз ниже интенсивности солнечного (светового) излучения. Но воздействие космических лучей на атмосферу совершенно иное. Высокоэнергетические частицы создают ионные пары. Солнечное излучение, достигающее земной поверхности, не способно ни ионизовать молекулы, ни заряжать частицы вследствие фотоэффекта. В принципе можно было бы ожидать зарядки частиц из-за двухквантового фотоэффекта, но, как показали недавние эксперименты [Sipila et al., 2007], сечение этого процесса слишком мало. Так что зарядка частиц идёт вследствие их взаимодействия с ионами. Заряженные частицы совсем иначе взаимодействуют с низколетучими составляющими, чем нейтральные. В частности, заряд на частице ускоряет конденсационный процесс, даже если конденсирующиеся молекулы нейтральны. Это происходит из-за появления наведённого дипольного момента у последних. Далее, ионы и в особенности ионы больших молекул могут сами служить центрами конденсации. Этот эффект существенно меняет скорость подачи аэрозольных частиц в атмосферу [Nadykto, Yu, 2003; Lushnikov, Kulmala, 2004a].

Итак, ионизация, производимая космическими лучами в тропосфере и стратосфере, ведёт к появлению большого количества наноаэрозольных частиц, которые в конечном счёте, и, опять же, не без участия космических лучей, трансформируются в облачные ядра конденсации. Но аэрозольный слой сам по себе оказывает значительное воздействие на тепловой баланс в атмосфере вследствие рассеяния светового излучения Солнца. Относительно короткие времена жизни аэрозолей в атмосфере приводят к заметным пространственным и временным вариациям оптической толщины атмосферы. И эта же вариабельность аэрозольного слоя ведёт к наиболее значительным неопределённостям в оценке антропогенного воздействия на климат. Изменения аэрозольной концентрации в самых нижних слоях тропосферы ведут к локальным флуктуациям пространственной плотности зарядов и, таким образом, к появлению медленно меняющихся во времени электрических полей. Временами напряжённости этих полей сравнимы с полями гроз и могут заметно влиять на глобальные электрические токи. Турбулентные флуктуации концентраций аэрозольных и облачных частиц провоцируют образование ураганов.

Приведённый график (см. рис. 4) демонстрирует резкий скачок скорости нуклеации при увеличении скорости подачи низколетучих паров в атмосферу и в присутствии стока (вызванного, например, присутствием посторонних крупных аэрозолей). Даже небольшое изменение скорости образования нелетучих примесей (из-за воздействия космических лучей) может привести к заметному росту концентрации вторичных наноаэрозолей [Lushnikov, Kulmala, 2000a, b]. Если же концентрация нелетучих примесей мала, то почти весь пар оседает на посторонних частицах.

Концентрация облачных конденсационных ядер напрямую зависит от продуктивности ионообразования из-за воздействия космических лучей. Киркби с соавторами [Kirkby et al., 2011], основываясь на результатах экспериментов с газовыми смесями, моделирующими состав атмосферного воздуха нижней атмосферы, экспериментально показали, что ионизация

космическими лучами приводит к интенсивному образованию наноаэрозолей, которые затем укрупняются до размеров облачных ядер конденсации. Самолётные масс-спектрометрические наблюдения в верхней тропосфере также свидетельствуют о значительной роли космических лучей в образовании аэрозольных частиц.

Возникшие под воздействием космических лучей атмосферные ионы увеличивают скорость зарождения и роста аэрозольных частиц вследствие так называемой ионно-индуцированной нуклеации. Действительно, зародыши аэрозольных частиц — это кластеры из нескольких молекул, которые могут расти вследствие присоединения молекул воды и малых газовых примесей. После достижения критического размера кластеры растут, а кластеры, не достигшие критического размера, наоборот, испаряются. Однако заряд кластеров может препятствовать гибели кластеров из-за коагуляции разноимённо заряженных частиц: два кластера, не достигшие критического размера, сливаясь, сразу дают закритический кластер, так что заряды играют огромную роль в производстве облачных ядер конденсации.

Модельные расчёты показали, что 20%-е изменение скорости ионизации может вести к 10%-му изменению концентрации частиц в интервале размеров от 3 до 10 нм [Yu, Turco, 2001]. Присутствие облачных слоёв в атмосфере вызывает возмущения электрического поля и вертикальных токов. Это ведёт к тому, что верхняя часть слоя становится положительно заряженной. За счёт вывода ионов из внутренней части облака развивается значительный градиент электропроводности, что неизбежно ведёт к сосредоточению плотности заряда на границах облаков. Формируются сильно заряженные капли (с зарядом, заметно превышающим 100 элементарных зарядов). Пространственный заряд и низкая электропроводность препятствуют быстрой нейтрализации сильно заряженных капель. При испарении этих капель образуются сильно заряженные зародыши ледяных частиц. Так как в верхней части облаков содержится много переохлаждённых (до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) капель, то ледяные ядра вызывают появление большого количества ледяных частиц в облаке [Puppacher, Klett, 2004].

4. КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ОБРАЗОВАНИЕ ИОНОВ В АТМОСФЕРЕ

Частицы высоких энергий, попадающие в нижние слои тропосферы, фильтруются геомагнитным полем. Фильтрационный эффект меняется со временем вместе с магнитосферными токами, которые возрастают в периоды магнитной активности и способствуют проникновению частиц заданной энергии в нижние слои тропосферы, где они вызывают ионизацию. Экспериментально показано, что функция источника ионов линейно зависит как от плотности воздуха, так и от потока космических лучей. Скорость образования ионов имеет максимумы на различных высотах в зависимости от энергии космических частиц. Ниже 15 км ионы образуются вследствие воздействия вторичных космических частиц, в частности мезонов. В полярной стратосфере ионы образуются в результате взаимодействия с низкоэнергетическими частицами с энергиями 0,1...0,5 МэВ, поток которых модулируется магнитным полем солнечного ветра в межпланетном пространстве. Скорость ионизации увеличивается с широтой. В околоземном пространстве

в экваториальной зоне скорость ионизации на 20 % меньше, чем в высоких широтах. Подвижность образующихся ионов связана с влажностью и понижается с её увеличением из-за гидратации ионов. Другие аэрозольные частицы (продукты вулканических извержений, дымы лесных пожаров, песчаные выносы из пустынь) служат эффективными стоками для образовавшихся ионов. Наиболее распространённые ионы, встречающиеся в тропосфере и стратосфере, — это кластеры, содержащие молекулы серной и азотной кислот, воды, $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ и CH_3CN , прикрепленные к иону.

Космическое излучение является основным фактором в формировании электрических свойств атмосферы и глобальной атмосферной циркуляции тока. Это связано с возникновением ионов и заряженных наночастиц, которые меняют проводимость атмосферного воздуха и вертикальные напряженности электрического поля. Десятилетние циклы изменения этих величин хорошо коррелируют с вариациями интенсивности космического излучения. В ясную погоду плотность вертикальных токов достигает величин порядка одного пикоампера на квадратный метр. Избыточные ионы, возникающие под воздействием космического излучения, увеличивают проводимость, а значит, и токи грозовых разрядов. Большие градиенты проводимости могут формироваться в облаках, что ведёт к образованию заряженных слоёв на вершине и основании облака. Пространственный заряд в подоблачном слое формируется из заряженных аэрозольных частиц. В присутствии электрических полей эти заряды накапливаются на облачных каплях. Таким образом, космическое излучение стимулирует образование грозовых облаков.

5. ИОН-АЭРОЗОЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Исследование зарядки нанозерозольных частиц в атмосфере исключительно важно для правильного понимания механизмов взаимодействия космического излучения с земной атмосферой. Заряженные частицы широко распространены, что сразу видно из простой оценки: электростатическая энергия частицы e^2/a сравнима с тепловой kT . Здесь e — заряд одного электрона; a — радиус частицы; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Отношение $e^2/akT=1$ при $a=0,6$ нм, что сравнимо с длиной свободного пробега молекул в воздухе при нормальных условиях. Это означает, во-первых, что нанометровые частицы имеют заряды порядка единицы, а во-вторых, что процесс зарядки в тропосфере никогда не происходит в свободно-молекулярном режиме, т. е. нельзя пренебрегать столкновениями иона с молекулами газа-носителя [Lushnikov, Kulmala, 2004b]. Помимо того, что аэрозольные частицы активно воздействуют на процессы, формирующие окружающую среду, они непосредственно могут воздействовать на здоровье человека. Зарядка частиц изменяет процессы осаждения аэрозольных частиц в лёгких, подавляет жизнедеятельность бактерий, взвешенных в воздухе, позволяет регулировать подачу лекарственных средств в наперёд заданные области дыхательных путей.

Следует отметить три важных процесса, определяющих кинетику формирования заряда в атмосфере, — это зарядка нейтральных аэрозольных частиц ионами, конденсация нейтральных молекул на заряженных частицах и рекомбинация — нейтрализация частиц ионами. Кратная зарядка здесь

не рассматривается, так как частицы предполагаются малыми, и числократно заряженных частиц при нормальных условиях не может быть велико.

Принципы расчёта эффективности зарядки основаны на анализе и приближённом решении кинетического уравнения Больцмана. Эффективность зарядки определяется как скорость изменения зарядового состояния частицы (вероятность зарядки в единицу времени):

$$J(a) = \alpha(a)n_{\infty}.$$

Здесь $J(a)$ — полный поток ионов на поверхность частицы; n_{∞} — концентрация ионов вдали от частицы; $\alpha(a)$ — эффективность зарядки частицы радиуса a . Заряд иона заметно повышает эффективность его захвата частицей.

Эффективность захвата нейтральной молекулы наночастицей определяется выражением

$$\alpha_{fm}(a) = \frac{\pi a^2 v_T}{4}.$$

Индекс fm соответствует свободномолекулярному режиму. Эффективность захвата заряженного иона возрастает в ζ раз, т.е. $\alpha(a) = \zeta(a)\alpha_{fm}(a)$. Здесь $\zeta(a)$ — фактор усиления. Мы не приводим явное выражение для этого фактора (см. [Lushnikov, Kulmala, 2004b]). Рисунок 5 даёт представление о величине усиления.

Рекомбинация — гораздо более сложный процесс. Заряженный ион, приближаясь к частице, должен потерять часть энергии так, чтобы попасть в связанное состояние. И только после этого он может быть захвачен частицей. Такой процесс идёт только в присутствии третьей частицы (обычно это молекула газа-носителя). Поэтому соответствующее выражение для эффективности рекомбинации должно зависеть от плотности газа-носителя. Совершенно ясно, что рекомбинационный процесс идёт на расстояниях, не превышающих длину свободного пробега иона.

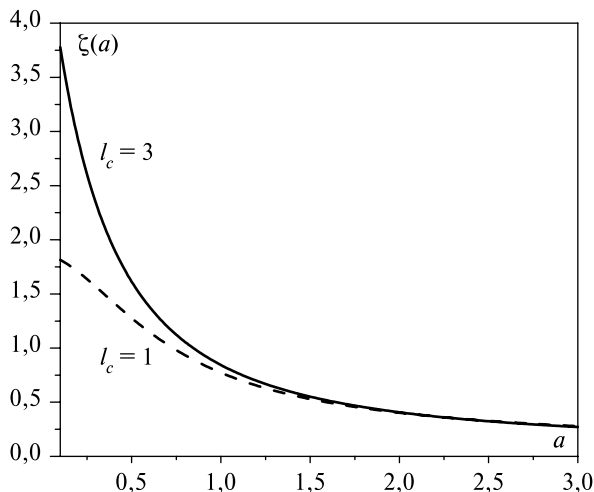


Рис. 5. Захват ионов нейтральной частицей. Показан фактор увеличения скорости захвата ионов $\zeta(a)$ как функция радиуса a частицы для двух различных значений кулоновской длины (измеренной в единицах длины свободного пробега иона)

Далее, после столкновения с третьим телом ион должен занять низколежащие состояния, а иначе состояние ион – частица окажется неустойчивым, и его времени жизни будет недостаточно для захвата иона. Таким образом, важно установить величину расстояния, на которое необходимо иону приблизиться, чтобы быть захваченным частицей. Однако вклад связанных состояний будет зависеть от размера частицы. Причина этого заключается в том, что в зоне свободномолекулярного движения ион не сталкивается с молекулами газа-носителя, а значит, непременно возвращается в диффузионную зону. Таким образом, только те траектории, которые пересекают поверхность частицы, могут дать вклад в рекомбинационный процесс. Мы же предположим, что все траектории с отрицательными энергиями дают вклад в эффективность рекомбинации. Действительно, у иона, попавшего достаточно глубоко в кулоновскую яму, есть очень мало шансов вернуться в состояние, из которого он может вылететь и стать свободным.

Остаётся только определить расстояние, на которое должен приблизиться ион, чтобы быть захваченным. Это возможно сделать в рамках теории сшивания потоков [Lushnikov, Kulmala, 2004b]. **Результирующее выражение для эффективности рекомбинации** выглядит очень просто [Lushnikov, 2010]:

$$\alpha(a) = \frac{4\pi D l_c}{1 - \exp(-l_c/R(a))},$$

где $R(a) = 4D/v_T$; D – коэффициент диффузии ионов в газе-носителе; l_c – кулоновская длина, $l_c = e^2/kT$. Это выражение справедливо для маленьких частиц, размеры которых заметно меньше, чем длина свободного пробега. Разумеется, это выражение воспроизводит известную формулу Лэнгмюра при l_c , заметно больших $R(a)$.

Таким образом, при очень малых размерах частицы эффективность рекомбинации не зависит от размера частицы.

6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Мы продемонстрировали, что космическая непогода (аномальные повышения уровней космического излучения) всегда ведёт к изменению уровня электризации атмосферы, образованию ионов. В нижней тропосфере эти изменения не так велики, но могут приводить к довольно серьёзным последствиям для нанозерозольной составляющей атмосферы. Атмосферные ионы повышают скорость нуклеационного образования аэрозолей. Но даже небольшого повышения скорости нуклеации бывает достаточно, чтобы возникали нуклеационные всплески, которые при более низких скоростях нуклеации подавляются стоками. Это ясно продемонстрировано на рис. 4. Такого рода явления возможны и в городских условиях, где дополнительные ядра конденсации вырастают в субмикронные аэрозольные частицы за счёт отнюдь не безвредных газовых составляющих. Именно так образуются городские кислотные смоги, вред здоровью от которых исследован в работах многих учёных. Сами нанозерозоли, возникающие в городских условиях, тоже могут оказаться опасными для человеческого здоровья из-за их большого коэффициента проникновения в кровь из дыхательных путей. Кстати, именно этот механизм заложен в основу использования лекарственных препаратов

в наноаэрозольном состоянии. Вдыхание наночастиц позволяет вводить в организм больных гораздо меньшие количества лекарственных препаратов.

Космическое излучение и вызванная им электризация атмосферы влияют на интенсивность облакообразования и вероятность появления грозových облаков. Дополнительная ионизация создаёт также условия для возникновения каналов для линейных грозových разрядов. Почти нет сомнения, что электрoзаряженные наночастицы играют роль в образовании шаровых молний. В частности, при линейных разрядах образующиеся заряженные частицы могут образовывать длинные нити, которые служат каркасом для шаровых молний [Lushnikov et al., 1990]. Конечно, это ещё не установленный факт, но такой механизм обсуждается в литературе

В верхних слоях атмосферы космические бури также вызывают интенсивное образование зарядов. В дополнение к столкновительной зарядке в верхней атмосфере возможна зарядка молекул и аэрозольных частиц из-за жёсткого электромагнитного излучения. В ионосфере малые заряженные частицы играют совсем иную роль. Они образуют среду (запылённую плазму), в которой распространяются волны плотности заряда и электромагнитного поля. Присутствие аэрозольных частиц кардинальным образом влияет на свойства этих колебаний. Более того, в присутствии частиц возникают новые ветви колебаний электрического и магнитного поля, которые могут дать объяснения наблюдаемым низкочастотным изменениям магнитного поля.

Итак, мы ещё раз подчёркиваем важность связи «космические лучи — образование ионов и заряженных наночастиц в атмосфере — условия обитания и здоровье человека».

Эта связь ещё очень мало изучена, но она определённо существует и, на наш взгляд, играет огромную и ещё не до конца понятую роль.

ЛИТЕРАТУРА

- [Charlson, Heitzenberg, 1995] *Charlson R. J., Heitzenberg R. L.* (Eds.) *Aerosol forcing of climate*. L.; N. Y.: John Wiley and Sons Ltd., 1995.
- [Friedlander, 2000] *Friedlander S. K.* *Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*. 2nd ed. L.; N. Y.: John Wiley and Sons Ltd., 2000. 431 p.
- [Harrison, Carslow, 2003] *Harrison R. G., Carslow K. S.* Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere // *Review of Geophysics*. 2003. V. 41. 3/1012 P. 2-1–2-26.
- [Kirkby et al., 2011] *Kirkby J., Curtius J., Almeida J.* et al. Role of sulphuric acid, ammonia and Galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation // *Nature*. 2011. V. 476. P. 429–433.
- [Korhonen et al., 2004] *Korhonen H., Lehtinen K. E. J., Kulmala M.* Multicomponent aerosol dynamic model UHMA: Model development and validation // *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss*. 2004 V. 4. P. 471–506.
- [Krueger, Reed, 1976] *Krueger A. P., Reed E. J.* Biological impact of small air ions // *Science*. 1976. V. 193. P. 1209–1203.
- [Kulmala et al., 2004] *Kulmala M., Vehkamäki H., Petaja T., Dal Maso M., Lauri A., Kerminen V. M., Birmili W., McMurry P. H.* Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations // *J. Aerosol Science*. 2004. V. 35. P. 143–176.
- [Lushnikov, 2010] *Lushnikov A. A.* Introduction to Aerosols // *Aerosols — Science and Technology* / Ed. I. Agranovski. Ch. 1. Introduction to Aerosols. Wiley, 2010. P. 1–42. doi: 10.1002/9783527630134.ch1.

- [Lushnikov, Kulmala, 2000a] *Lushnikov A. A., Kulmala M.* Foreign aerosol in nucleating vapour // *J. Aerosol Science*. 2000. V. 31. P. 651–672.
- [Lushnikov, Kulmala, 2000b] *Lushnikov A. A., Kulmala M.* Nucleation burst in a coagulating system // *Physical Review E*. 2000. V. 62. P. 4932–4940.
- [Lushnikov, Kulmala, 2004a] *Lushnikov A. A., Kulmala M.* Charging of aerosol particles in the near free-molecule regime // *European Physical J. D*. 2004. V. 29. P. 345–355.
- [Lushnikov, Kulmala, 2004b] *Lushnikov A. A., Kulmala M.* Flux-matching theory of particle charging // *Physical Review E*. 2004 V. 70. P. 046413.
- [Lushnikov et al., 1990] *Lushnikov A. A., Negin A. E., Pakhomov A. V.* Experimental observation of the sol-gel transition // *Chemical Physics Letters*. 1990. V. 175. P. 128–132.
- [Lyubovtseva et al., 2005] *Lyubovtseva Yu. S., Sogacheva L., Dal Maso M., Bonn B., Keronen P., Kulmala M.* Seasonal variations of trace gases, meteorological parameters, and formation of aerosols in boreal forests // *Boreal Environment Research*. 2005. V. 10. P. 493–510.
- [Nadykto, Yu, 2003] *Nadykto A. B., Yu. F.* Uptake of neutral polar vapor molecules by charged clusters: Enhancement due to dipole-charge interaction // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. P. 4717–472.
- [Pierce, Adams, 2009] *Pierce J. R., Adams P. J.* Can cosmic rays affect cloud condensation nuclei by altering new particle formation rates? // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. P. L09820.
- [Pruppacher, Klett, 2004] *Pruppacher H. R., Klett J. D.* Microphysics of clouds and precipitation. N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 2004. 976 p.
- [Seinfeld, Pandis, 2006] *Seinfeld J. H., Pandis S. P.* Atmospheric Chemistry and Physics. N. Y.: Wiley, 2006.
- [Sipilä et al., 2007] *Sipilä M., Lushnikov A. A., Khriachtchev L., Kulmala M., Tervehattu H., Räsänen M.* Experimental observation of two-photon photoelectric effect from silver aerosol nanoparticles // *New J. Physics*. 2007. V. 9. N. 368.
- [Smirnov, 2000] *Smirnov B. M.* Clusters and Small Particles in Gases. N. Y.: Springer, 2000.
- [Yu, 2010] *Yu F.* Ion-mediated nucleation in the atmosphere: Key controlling parameters, implications, and look-up table // *J. Geophysical Research*. 2010. V. 115. P. D03206.
- [Yu, Turco, 2001] *Yu F., Turco R. P.* From molecular clusters to nanoparticles: Role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. N. D5. P. 4797–4814.

COSMIC WEATHER AND ATMOSPHERIC NANOAEROSOLS

A. A. Lushnikov^{1,2}, *V. A. Zagaynov*², *Yu. S. Lyubovtseva*¹, *A. D. Gvishiani*¹

¹ Establishment of the Russian Academy of Sciences, Geophysical Center, Moscow, Russia

² Federal State Unitary Enterprise “Karpov Institute of Physical Chemistry”, Moscow, Russia

Recent experiments in CERN (*Kirkby et al.* // *Nature*. 2011. V. 446. P. 429–433) clearly demonstrated the decisive role of cosmic radiation in the processes of formation of secondary atmospheric aerosols. On the other hand, these experiments showed that the amounts of H₂SO₄ and NH₃ in the atmosphere are not enough for explaining the rate of production of the secondary nanoaerosols.

Already long ago the role of atmospheric nanoparticles resulting from a chain of intra-atmospheric chemical and photochemical processes was clearly recognized. On growing, these particles convert to CCN and thus exert the cloudiness of the sky. The estimations of the particle formation productivity done for the rates of ion formation of order 10...30 ion

pairs/second in c. c. occurred much lower than that observed in the CERN experiment. This fact makes us to return to reconsideration of the elementary processes of aerosol-ion interactions.

In this presentation the following processes are considered.

1. Charging of a neutral nanoparticle by ions.
2. Condensational growth of ions and gas-to-particle conversion.
3. Recombination of ions on nanoaerosol particles.

Our consideration takes into account the fact that at ambient conditions the ratio of the Coulomb energy of the particle to the average kinetic energy of the incident ion is always of the order of unity which means that all aerosol electric processes go in the transition regime. Respective expression for the rates of particle formation and ion-particle processes are reconsidered in view of the above fact.

We consider the growth of centers produced in the processes of ions and charged particle formation. We show that at the initial stage of the process the condensation of low volatile substances is responsible for the particle growth. Coagulation becomes efficient at a later stage, where the particles reach the sizes of order 100 nm. The rate of the particle production is shown to be proportional to the square root of the ionization rate and can change by a couple of decimal orders during intense Sun events.

The small particles forming during Sun events can serve as CCN (cloud condensation nuclei). Their concentration can reach values of order 10^5 particles per c.c., but this fact not always leads to the formation of clouds because of low concentration of water vapor in the upper troposphere. However, over oceanic surface the Sun events can lead to the formation of heavy rain clouds, storms and hurricanes.

COMMUNICATION OF REGULARITIES OF DIFFERENTIAL ROTATION OF DEEP PHYSICAL COVERS OF THE SUN, EARTH, OTHER PLANETS AND REGULARITIES OF BIOLOGICAL AND ATMOSPHERIC ASH VALUE OF PLANETS

A. L. Kharitonov, G. P. Kharitonova

N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia, e-mail: ahariton@izmiran.ru, galina@izmiran.ru

In the report the main attention is given to application of the new Differential Space-Temporal Magnetic Measurement (DSTM) method for allocation of elements of differential rotation of physical covers of Earth, other planets, the Sun according to the magnetic field measured on spacecraft MAGSAT, CHAMP. It is shown that regularity of differential rotation of physical covers (atmosphere with ionosphere, hydrosphere, termicsphere, biosphere) is inherent in the most part of natural Space objects (to the Sun, planets, their natural satellites), generating the magnetic field in the interior. It is shown, how the structure of the magnetic field arising from deep physical non-uniformity of the substance of the mantle and the core influences emergence of biological, atmospheric and hydro-chemical zonal distribution of oceanic regions of Earth and other planets of Solar system.

INTRODUCTION

The choice of the subject of this report is caused by interest of many scientists to questions of the climate, the fauna, the flora change actual now, intensity of tectonic processes in the Earth (volcanic, seismic activity), and also the publications which have appeared recently on this subject in scientific literature in which authors try to understand the reasons of similar changes. Therefore the main objective of this report consisted in that on the complex of various physical-biological data to analyze the contribution brought by differential rotation of various space objects (the Earth, the Sun, the Saturn, the Jupiter, the Venus) in long-temporal physical and biological cycle changes (change of zonal distribution of differential rotation the Earth's mantle causing change of zonal distribution of salt of waters of the World Ocean, the global change of structure of the atmosphere, the global change of zonal distribution of the temperature mode in the water of World Ocean and correspondingly the global change of zonal distribution of the fauna, the flora change with temporal periods 60...600 years, for example Long Kondratieff's wave biocycle [Vladimirsky, 2012]).

METHODS OF THE MATHEMATICAL ANALYSIS AND USED EXPERIMENTAL DATA

For initial definition of differential rotation of the Mantle as one of the biggest (2900 km) and defining geophysical spheres (the hydrosphere — 5 km, the atmosphere — 70 km, the biosphere — 5 km), authors of this work applied the new method of the Differential Space-Temporal Magnetic Measurement (DSTM) according to the measured geomagnetic field on low-orbital spacecraft MAGSAT, CHAMP. A new DSTM method of gradient measurement [Fonarev et al., 2007], using data of only one magnetometer established on the spacecraft [Kharitonov, Serkerov, 2003;

Kharitonov et al., 2006] allows to allocate very accurately magnetic borders of zones with various differential speeds of rotation of the Mantle and biological borders too.

The method of DSTM consists in the optimal choice of the virtual temporary measuring base $\Delta t = v\Delta L$, where v — speed of the moving magnetometer, ΔL — virtual spatial measuring base. At creation of the numerical number of F_{n+1} values — F_n (F_n, F_{n+1} — magnetometer indications through t period). It is necessary, that during Δt one of increments of F_a or F_v was less sensitivity of the magnetometer (ϵ). F_a and F_v — respectively one of the component of the anomaly magnetic field in moving system of coordinates and the magnetic variation. Then F_a or F_v will be absent on the differential curve. At $\Delta t \ll T$, that F_v and F_a less be will magnetometer sensitivity (ϵ). That is base of DSTM method lies the filtration of fields.

For considered temporary eras of geophysical survey carried out by MAGSAT and CHAMP satellites it is possible to present the geomagnetic field as the sum of the constant and variable fields changing in time and space of fields, caused by the sources located as in Earth (the core, the mantle), and outside the limits of its firm cover (solar-magnetosphere-ionospheric sources) [Kharitonov et al., 2006]. Studying of existential structure of the geomagnetic field (F_e) measured on satellites [Rotanova et al., 2005] it is possible to consider as the sum of vectors of intensity of several fields

$$F_e(\varphi, \lambda, h) = F_M(\varphi, \lambda, h) + F_a(\varphi, \lambda, h) + F_m(\varphi, \lambda, h) + F_v(\varphi, \lambda, h),$$

where F_M — the component of the vector of the induction of the main magnetic field, caused by sources in Earth core (the so-called constant magnetic field of Earth); F_a — the component of the vector of the induction of the anomaly magnetic field, caused by magnetic not uniformity of crust (the so-called field of “constant” crustal anomalies); F_m — the component of the vector of the induction of the anomaly magnetic field, caused slowly changing in time and space electromagnetic not uniformity of the Earth’s mantle; F_v — the component of the vector of the induction of the variation geomagnetic field, caused quickly changing in time and space not uniformity external solar-magnetosphere-ionospheric origin. This field also often call the variation magnetic field of external geophysical spheres of Earth.

For the analysis of spatial structure of the geomagnetic field mathematical processing and numerical interpretation of the MAGSAT and CHAMP satellite given along some passes covering the territory of the Earth within geographic latitudes from +60 to -60° [Rotanova et al., 2005] was carried out.

The DSTM method of allocation of the magnetic field connected with constant crustal component (F_a) and slowly changing not uniformity of the mantle (F_m), against the field of the variations connected with external by solar-magnetosphere sources (F_v) and errors of measurements are methods of the differential magnetic measurements [Fonarev et al., 2012; Kharitonov et al., 2006].

The advanced DSTM method of the space-temporal gradient measurement allows to calculate not only course [Fonarev et al., 2012], but under certain conditions and the full gradient of the magnetic field according only to the one magnetometer from the spacecraft.

Magnetic limits of electromagnetic ash of the ionosphere as result value of differential rotation of the Earth’s mantle for magnetic survey of low-orbital circumterrestrial CHAMP (2002) spacecraft from DSTM method data is shown on the Figure 1.

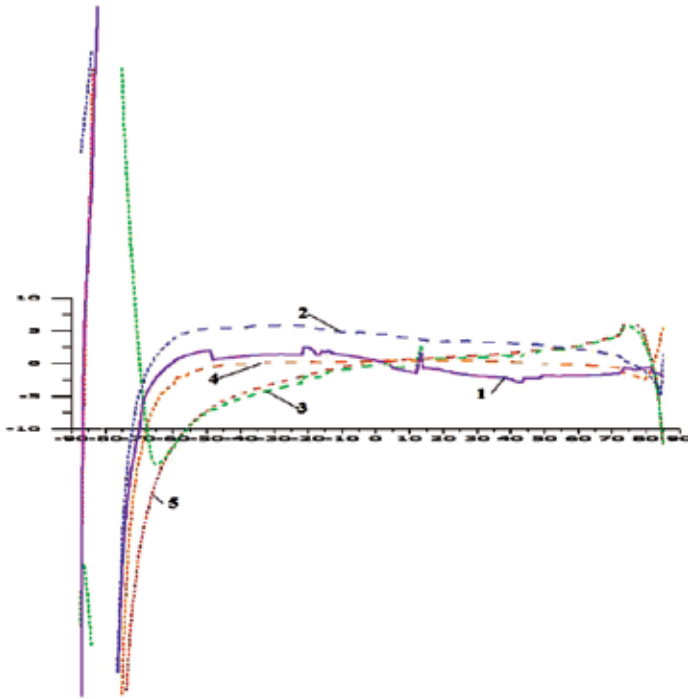


Figure 1. The sub-latitudinal zones of full gradient of Earth’s magnetic field, calculated by DSTM method from CHAMP satellite magnetic data on altitude equal 400 km, in the ionosphere for 2002 year. Along the horizontal axis values of the geographical longitude (in degrees) are shown. Along the vertical axis values of full gradient magnetic field (nT/km) are shown

Other used Distant Magnetic Deep Sounding (DMDS) method at the heart of which the solution of the inverse problem [Kharitonov, 1984] according to spacecraft MAGSAT, allows to calculate morphology of inhomogeneities of the magnetic field and the location of limits of ash in various till speed of movement differential latitudinal electromagnetic zones of the Earth’s mantle (Figures 2, 3) [Kharitonov, Serkerov, 2003]. It is similar “Sun spots” area to differential rotation on the Sun in the look of “Maunder’s butterfly”.

Similar property of differential rotation of various physical covers many space objects generating own magnetic fields (stars, planets), for example our star — the Sun possess. The striking example of differential rotation of atmospheric layers is Venus, Jupiter, Earth and other planets, generating own magnetic fields (Figures 4–6).

EXPERIMENTAL DATA ABOUT STRUCTURE ZONAL DISTRIBUTION OF PHYSICAL AND BIOLOGICAL PARAMETERS OWING TO DIFFERENTIAL LAYER ROTATION OF THE EARTH’S MANTLE

It is necessary to show that, MAGSAT allocated on experimental satellite magnetic data, CHAMP, differential rotation of layers of the Earth’s mantle, is as the result reflected in its various physical, chemical and biological processes.

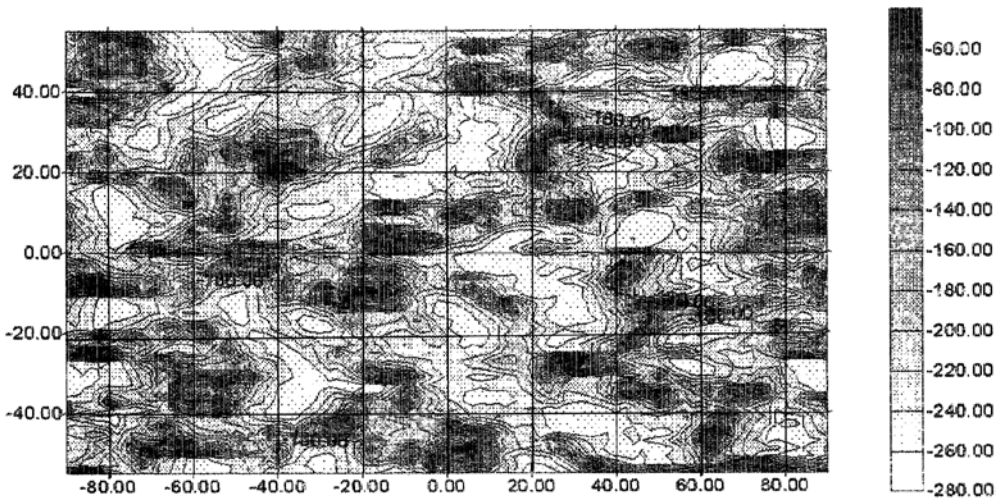


Figure 2. The sub-latitude magnetic anomalies of electromagnetic zones of the Earth's mantle for the upper mantle–transition zone interface (depth 400 km) in the look of “Maunder's butterfly” for area Sun spots. The scale to the right of the figure designates amplitude of waves (in kilometers) electromagnetic inhomogeneities in the Earth's mantle on aforementioned depth. Along the horizontal axis values of the geographical longitude (in degrees) are shown. Along the vertical axis values of the geographical latitude (in degrees) are shown

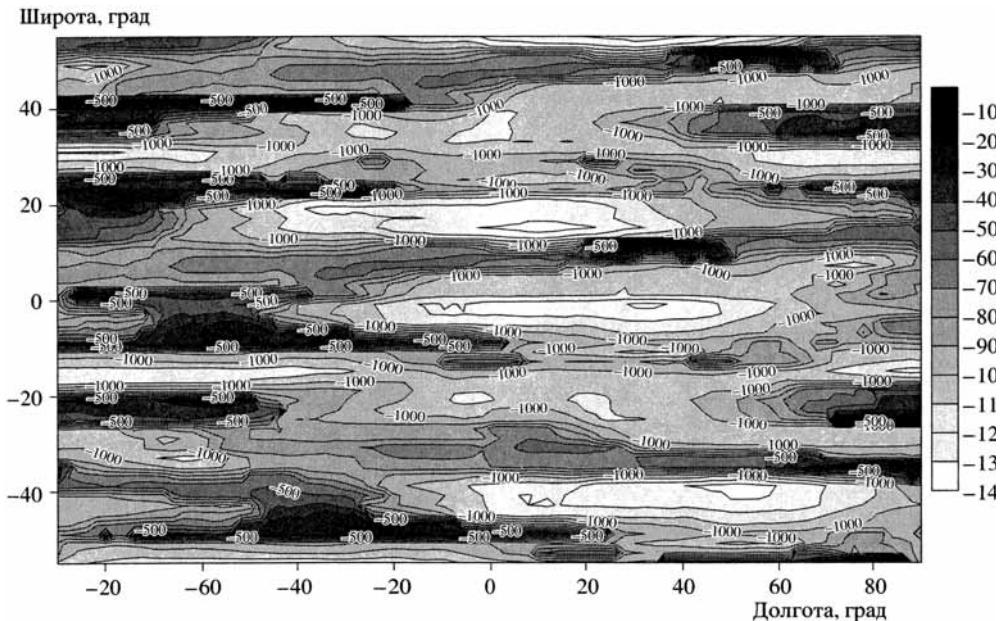


Figure 3. The sub-latitude magnetic anomalies of electromagnetic zones of the Earth's mantle for the Gutenberg discontinuity at the core-mantle interface (depth 2900 km) in the look of “Maunder's butterfly” for area Sun spots. The scale to the right of the figure designates amplitude of waves (in kilometers) electromagnetic inhomogeneities in the Earth's mantle on aforementioned depth. Along the horizontal axis values of the geographical longitude (in degrees) are shown. Along the vertical axis values of the geographical latitude (in degrees) are shown



Figure 4. The sub-latitudinal structure of differential rotation of the Venus atmosphere layers

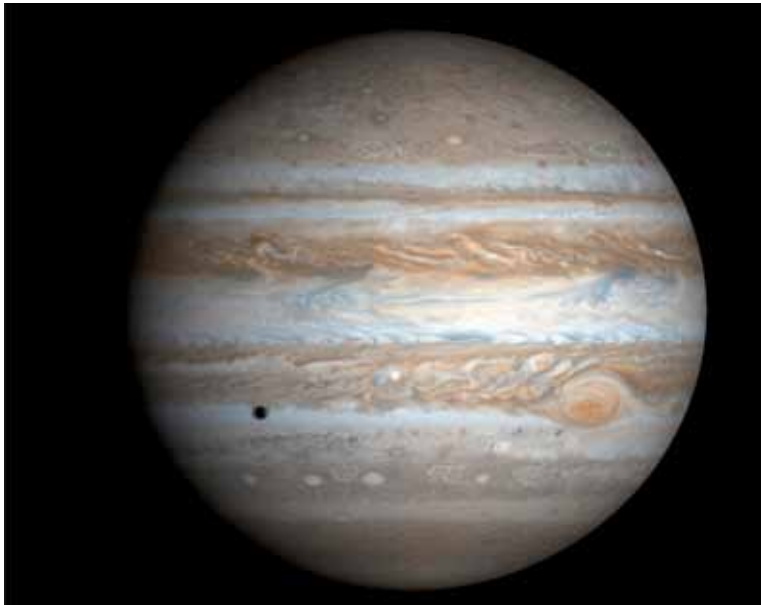


Figure 5. The sub-latitudinal structure of differential rotation of Jupiter's atmosphere layers

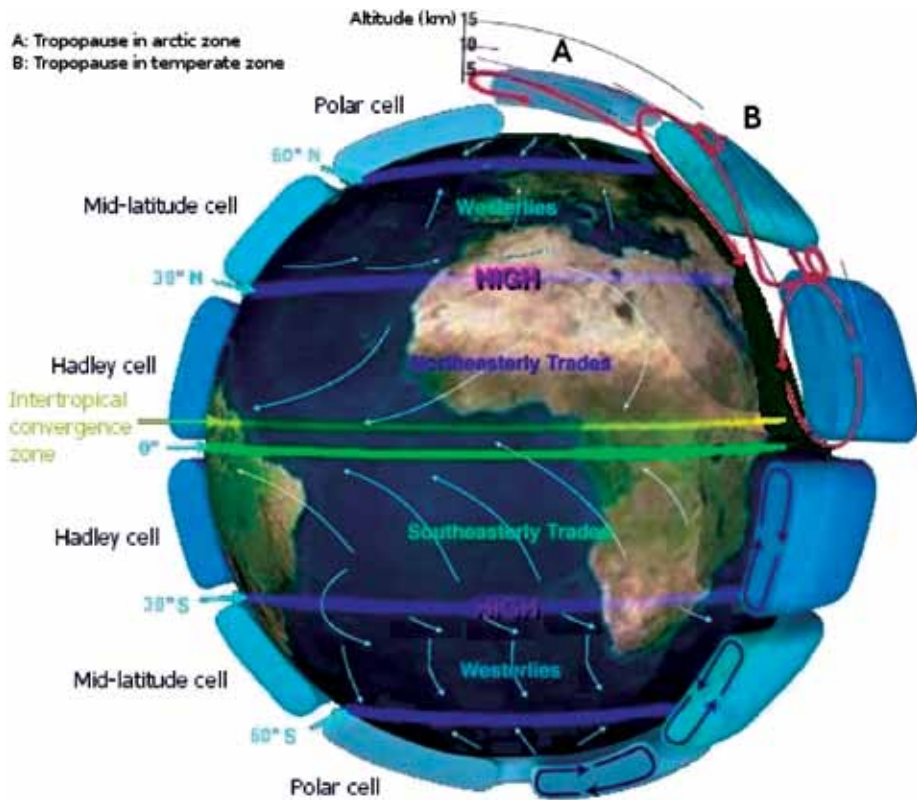


Figure 6. The sub-latitudinal structure of differential rotation of Earth's atmosphere layers

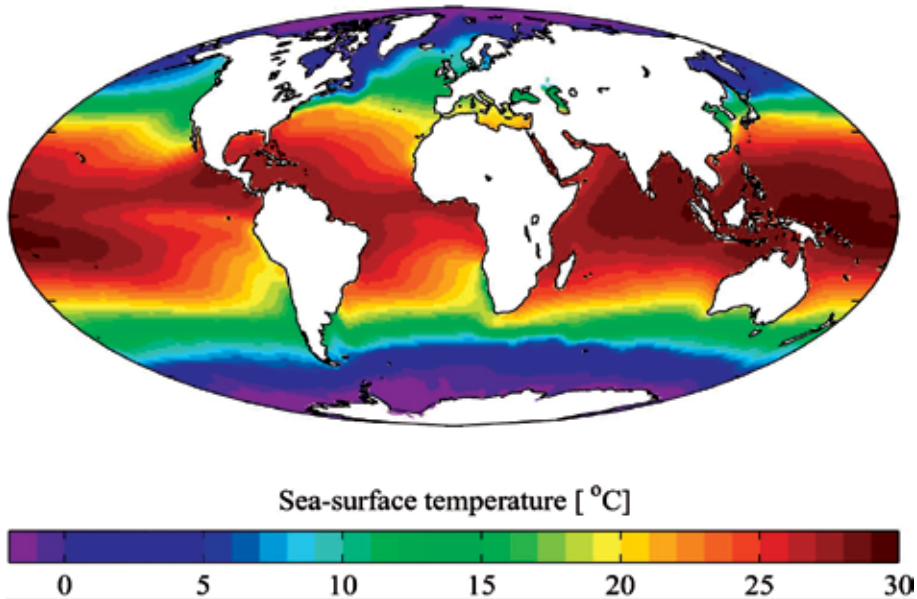


Figure 7. The structure of Sea-surface temperature sub-latitude zones are the magnetic projection of sub-latitude zones of the electromagnetic field of the Earth's mantle

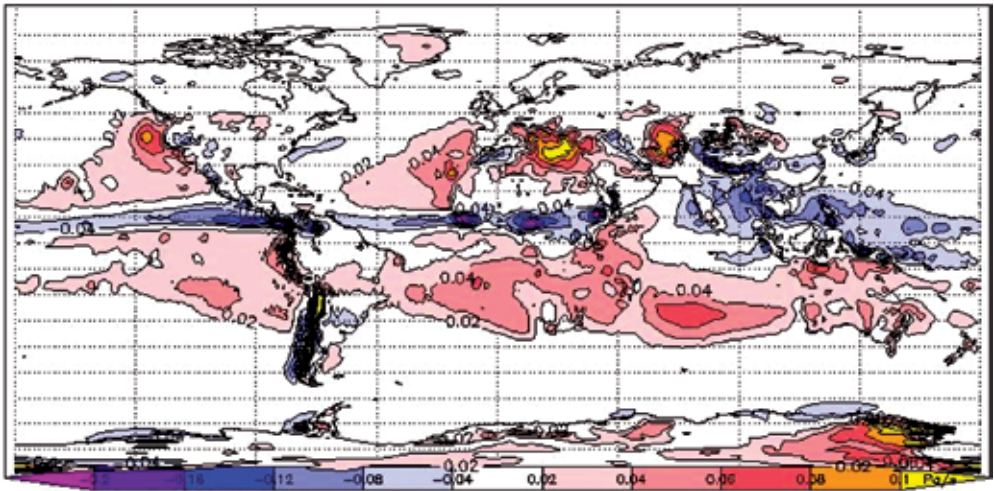


Figure 8. The differential rotation of sub-latitude zones of the vertical rate (Pa/s) of the atmosphere circulation of Earth (1979–2001 years)

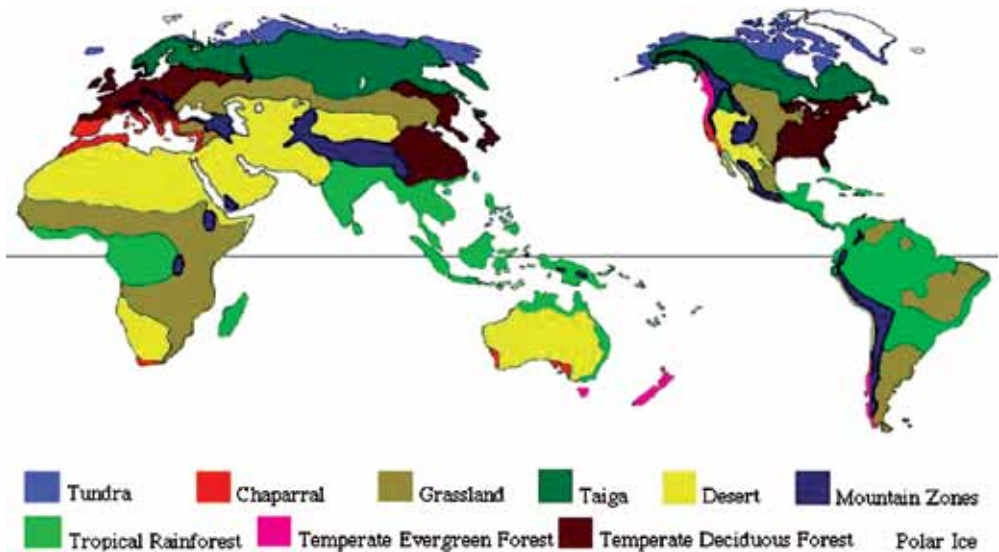


Figure 9. The structure of climatic sub-latitude zones of the Earth are the magnetic projection in electric carrying-out layers of the atmosphere (with the ionosphere) from sub-latitude electromagnetic zones of the Earth's mantle

In particular, it is possible to show that deep mantle temperature and chemical sub-latitude inhomogeneities of the Earth's mantle cause sea-surface temperature (Figure 7) and chemical sub-latitude inhomogeneities of the hydrosphere (the salt concentration in the sea water) and the vertical rate (Pa/s) of the atmosphere circulation of Earth (mean of annual 1979–2001 years) (Figure 8).

Moreover, mantle differential rotation causes similar differential rotation of the vertical rate (Pa/s) of the atmosphere circulation of Earth in 1979–2001 years (see Figure 8) and respectively forms its climatic sub-latitude zones (Figure 9).

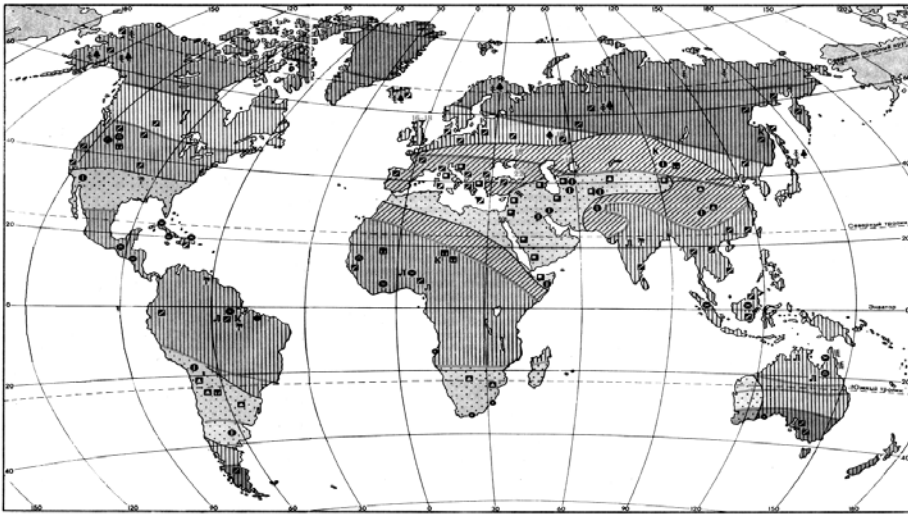


Figure 10. The world map of structure of the flora location and the sub-latitude climatic zones of the Earth in miocen geochronological temporal period are the magnetic projection in electric carrying-out layers of the atmosphere (with the ionosphere) from sub-latitude electromagnetic zones of the Earth's mantle [Ushakov, Yasamanov, 1984].



Figure 11. The world map of the location of the diabetes epidemic: 1 (black) — Heart Disease; 2 — Bindness; 3 — Kidney Failure; 4 — Extremity Amputations; 5 (yellow) — Nerve Disorders

Shift of limits of ash value of differential rotation of physical spheres of Earth from poles to the equator, owing to change of structure of convection in the outer core and therefore in the lower mantle, could bring, in our opinion, in last geological temporal periods to emergence both ice ages with die out of forms of the flora (Figure 10) and medical epidemic (fauna) (Figure 11), and the periods of the increased temperature of the water, the air with the creation of biological forms of life, owing to seismic and volcanic activity, in the course of evolutionary development of Earth [Khain, Mikhaylov, 1985].

CONCLUSIONS

- It is shown that differential rotation of physical covers is inherent in rotating space objects of different scales (planets, stars), generating own magnetic field.
- It is shown that the zonal distribution of physical processes is narrowly connected with the magnetic zonal distribution of the mantle environment of planets in the hydrosphere and the atmosphere, chemical elements of the hydrosphere and respectively the zonal distribution of the biosphere processes depending on above-mentioned factors.
 - The major geomagnetic discontinuities occur at 200, 400 and 2900 km.
 - It is shown that large-scale satellite geomagnetic anomalies and its of 60th year variations and Long biosphere Kondratieff's wave variations correlates with sub-latitudinal inhomogeneities in the Earth's mantle and the migration of sub-latitudinal inhomogeneity limits.

This work is executed with support of the Russian Foundation of Basic Researches (the grant of No. 10-05-00343-a).

REFERENCES

- [Fonarev et al., 2007] *Fonarev G. A., Kharitonov A. L., Kharitonova G. P.* Using of methods of the existential magnetometry for the analysis of the geomagnetic field measured on the CHAMP satellite // *Vestnic KRAUNC. Sciences about Earth.* 2007. N. 2. V. 10. P. 49–53.
- [Fonarev et al., 2012] *Fonarev G. A., Kharitonov A. L., Kharitonova G. P.* Use of methods of the differential existential magnetometry for the analysis of the geomagnetic field measured on satellites of the Earth // *Geophysical J.* 2012. (In press.)
- [Khain, Mikhaylov, 1985] *Khain V. E., Mikhaylov A. E.* General geotectonics. M.: Nedra, 1985. 291 p. (= *Хайн В. Е. Региональная геотектоника: океаны: синтез.* М.: Недра, 1985. 291 с.).
- [Kharitonov, 1984] *Kharitonov A. L.* Use of elements of correlation theory for the analysis and the interpretation of anomalous magnetic field: Autoref ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Troitsk: IZMIRAN. 1984. 25 p. (= *Харитонов А. Л. Применение элементов корреляционной теории для анализа и интерпретации аномального магнитного поля: Автореф. ... канд. физ.-мат. наук.* М.: ИЗМИРАН, 1984. 25 с.).
- [Kharitonov, Serkerov, 2003] *Kharitonov A. L., Serkerov S. A.* Research of the deep structure from satellite magnetic and gravitational data // *Issledovanie Zemli iz Cosmosa.* 2003. N. 1. P. 28–38 (= *Хассан Г. С., Харитонов А. Л., Серкеров С. А. Исследование глубинного строения по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исслед. Земли из космоса.* 2003. № 1. С. 28–38).
- [Kharitonov et al., 2006] *Kharitonov A. L., Fonarev G. A., Serkerov S. A., Hassan G. S., Kharitonova G. P.* The calculation of the topology of deep magnetic inhomogeneous of the Earth's mantle from MAGSAT, CHAMP geomagnetic satellite deep-sounding methods // *Proc. 1st Intern. Science Meeting SWARM.* European Space Agency. Nantes. France. 2006. WPP-261.
- [Obridko, 1985] *Obridko V. N.* Solar spots and Solar activity. M.: Nauka, 1985. 208 p. (*Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности.* М.: Наука, 1985. 255 с.).
- [Rotanova et al., 2005] *Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Frunze A. Kh.* Satellite CHAMP // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2005. N. 5. P. 710–715.

- [Ushakov, Yasamanov, 1984] *Ushakov S. A., Yasamanov N. A.* Drift of continents of Earth. М.: Misl, 1984. 206 p. (= *Ушаков С. А., Ясаманов Н. А.* Дрейф материков и климаты Земли. М.: Мысль, 1984. 206 с.).
- [Vladimirsky, 2012] *Vladimirsky B. M.* Synchronization of Long Kondratieff's waves by Solar activity — social and cultural indices // Abstr. Intern. Conf. Space Weather Effects of Humans in Space and on Earth. Moscow. ISR. 2012. P. 84.

СВЯЗЬ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ГЛУБИННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК СОЛНЦА, ЗЕМЛИ, ДРУГИХ ПЛАНЕТ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ, АТМОСФЕРНОЙ, ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ПЛАНЕТ

А. Л. Харитонов, Г. П. Харитонова

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, Россия,
e-mail: ahariton@izmiran.ru, galina@izmiran.ru

В статье основное внимание уделено применению нового метода пространственно-временной магнитной градиентометрии для выделения элементов дифференциального вращения физических оболочек Земли, Солнца по данным магнитного поля, измеренного на космических аппаратах MAGSAT, CHAMP Apollo, ACE и др. Показано, что закономерность дифференциального вращения физических оболочек присуща большей части природных космических объектов (Солнцу, планетам, их естественным спутникам), генерирующих магнитное поле в своих недрах. Показано, как структура магнитного поля, возникающего от глубинных физических неоднородностей вещества, влияет на возникновение биологической, атмосферной и гидрохимической зональности океанических регионов Земли и других планет Солнечной системы.

ВЛИЯНИЕ ЖАРКОЙ ПОГОДЫ, ДЫМА ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ В ВЯТСКИХ ПОЛЯНАХ ЛЕТОМ 2010 г.

С. Н. Котельников¹, Э. А. Олюнин², М. А. Манаков²

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН), Москва, Россия, e-mail: skotelnikov@mail.ru

² Вятско-Полянская станция скорой медицинской помощи, Вятские Поляны, Кировская обл., Россия

Волны жары, приземный озон и дым от лесных пожаров оказывают всё более значительное влияние на здоровье населения в связи с изменением глобального климата. Отрицательное воздействие озона на органы дыхания и сердечно-сосудистую систему хорошо изучено в зарубежных работах. Мы использовали методы статистического корреляционного анализа для обработки временных рядов вызовов скорой медицинской помощи, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями, среднесуточными концентрациями приземного озона и температуры воздуха в летние месяцы 2008, 2009 и 2010 гг.

При высоких температурах воздуха и низких концентрациях озона статистическая связь этих параметров с количеством вызовов скорой медицинской помощи отсутствует. А при воздействии среднесуточных концентраций приземного озона более 60 мкг/м^3 в течение 16 дней подряд коэффициент корреляции между озоном и количеством вызовов скорой медицинской помощи составил величину 0,62. Сильная задымленность от лесных пожаров уменьшила концентрацию озона и не увеличила количество вызовов скорой медицинской помощи.

Показано, что повышенные концентрации приземного озона оказывают модифицирующий эффект при воздействии высоких температур воздуха на сердечно-сосудистые заболевания.

ВВЕДЕНИЕ

Для условий России, с её низкими показателями продолжительности жизни, стремительной деградацией окружающей среды, количественная оценка влияния факторов риска на дополнительную смертность имеет большое значение. Демографический кризис в России может быть частично смягчён за счёт реализации профилактических мероприятий, направленных на минимизацию отрицательного воздействия тех или иных факторов на здоровье населения. Поэтому для определения основных направлений профилактической политики сохранения народонаселения в России важно количественно оценить вклад каждого из отрицательных воздействий, обуславливающих дополнительную смертность населения, в том числе неблагоприятных факторов окружающей среды и изменения климата.

Изменение климата, согласно оценкам экспертов IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Межправительственная группа экспертов по изменению климата), в ближайшие годы будет продолжаться. При этом прогнозируется возрастание числа дней с экстремально высокой температурой, учащение волн тепла [Climate..., 2007, 2010]. Как показали результаты исследований [Беликов и др., 2004; Звягинцев и др., 2011; Котельников и др., 2009], во время жаркой погоды, в загрязнённой атмосфере, интенсивное фотохимическое образование озона и его концентрации в городе и за городом может достигать в России огромных величин. В таблице классификации

веществ по степени опасности озону (O_3) присвоен высший класс опасности (первый) — «чрезвычайно опасные вещества». У всем известного хлора (боевое отравляющее вещество) класс опасности 2. В июле – августе 2010 г. в Московском регионе в течение примерно одного месяца практически непрерывно наблюдались концентрации озона и других загрязняющих веществ, значительно превышающие предельно допустимые. Уровни загрязнителей атмосферы и, в первую очередь, озона, превышали уровни, обычно наблюдавшиеся в странах Западной Европы в периоды эпизодов с самым сильным фотохимическим загрязнением атмосферы [Звягинцев и др., 2011]. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) установила верхний предел среднесуточной концентрации озона, равный 100 мкг/м^3 (средняя за 8 ч светлого времени). Среднесуточная концентрация озона в воздухе 100 мкг/м^3 уже вызывает увеличение смертности среди населения на 2 %, причём значительные отрицательные эффекты наблюдаются при среднесуточной концентрации озона 70 мкг/м^3 [Air quality..., 2005].

На территории России с аномальной жарой смертность за июль – август по сравнению с аналогичным периодом 2009 г. увеличилась на 57,8 тыс. случаев, причём в некоторых регионах (Москва, Поволжье) смертность возросла в 1,5...1,6 раза. В наибольшей степени возросло число случаев смерти от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхания [Ревич, 2010].

Если в России 58 тыс. дополнительных случаев смертей зарегистрированы среди 60 млн. населения, то в Европе не намного большее число — 70 тыс. среди значительно большего населения — 330 млн жителей семи европейских стран. В России необходимо создание современной сети станций мониторинга приземного озона и других опасных загрязнителей атмосферы с возможностью оперативного доступа к информации населения. В США правительство на специальном сайте (US EPA, www.epa.gov/airnow) каждый день информирует своих граждан о качестве атмосферного воздуха. Так же организовано информирование населения и в странах Евросоюза. В Германии даже в аптеках присутствует оперативная информация о концентрациях приземного озона и жители знают, как правильно ей пользоваться. Крайне необходимы детальный эпидемиологический анализ последствий жары и атмосферных загрязнителей на состояние здоровья различных групп населения, создание национального плана действий по снижению негативного влияния жары и высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха на население нашей страны.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В Кировской области регулярные измерения озона проводятся в Вятских Полянах на высоте пятого этажа пятиэтажного дома на окраине города в парковой зоне. Для измерения приземного озона используется серийный отечественный (производства ОПТЭК, Санкт-Петербург) хемилюминесцентный газоанализатор озона марки 3.02 П-А. Предел допускаемых значений основной относительной погрешности газоанализатора для диапазона $30...500 \text{ мкг/м}^3$ не более 20 %. Газоанализатор входит в состав автоматической станции мониторинга приземного озона. Сопутствующие метеопараметры измеряются автоматической метеостанцией Vantage Pro 2 Plus производства Davis Instruments. Станция мониторинга управляется через сеть мобильной

связи и работает в режиме он-лайн. Информация доступна через сеть Интернет на любой подключённый к сети терминал (мобильный телефон, компьютер и т. д.). Станция имеет «белый» IP-адрес и «видна» в любой стране. Город Вятские Поляны расположен на юге Кировской области, население вместе с районом около 50 тыс. Производств с вредными выбросами на территории района нет. Региональный воздушный фон загрязняющих веществ формирует местный автотранспорт и дальний перенос. Ближайший мегаполис — Казань — находится на расстоянии 180 км.

Для анализа временных рядов использовалась база данных станции скорой медицинской помощи Вятских Полян, которая обслуживает и район. Таким образом, статистическая выборка составила примерно 50 тыс. человек. Для анализа отбирались случаи вызова скорой медицинской помощи за сутки, связанные с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Это: ишемическая болезнь сердца, мерцательная аритмия, наджелудочковая пароксизмальная тахикардия, желудочковая тахикардия, блокады сердца, пороки сердца, острая левожелудочковая недостаточность, острый инфаркт миокарда, стенокардия, острое нарушение мозгового кровообращения, сердечная астма, отёк лёгких, коллапс, экстрасистолия и цереброваскулярные болезни. Количество вызовов скорой медицинской помощи за сутки, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями, исследовали с помощью методов математической статистики совместно с среднесуточными концентрациями приземного озона и среднесуточными температурами воздуха. Таким образом были проанализированы данные за август 2008 г. и за летний период 2009 и 2010 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2008 г. анализировались результаты за август месяц. Превышение многолетней среднемесячной температуры воздуха в этот месяц составило $2,3^{\circ}\text{C}$. Связь между количеством вызовов скорой медицинской помощи (далее КВС), среднесуточной температурой воздуха (далее температура) и среднесуточными концентрациями озона (далее озон) отсутствует. Двукратное (более 60 мкг/м^3) среднесуточное превышение предельно допустимой концентрации озона (ПДК_{СС}) составило два дня подряд. Коэффициент корреляции между озоном и температурой составил величину 0,76.

В 2009 г. анализировались результаты за три летних месяца. В июне многолетняя среднемесячная температура воздуха была превышена на $1,9^{\circ}\text{C}$. Двукратное превышение ПДК_{СС} составило восемь дней подряд. Коэффициент корреляции между озоном и КВС равен 0,24 (95%-я граница равна 0,298), связь положительная, но статистически не достоверная, а между КВС и температурой равна 0,22 при 95%-й границе, равной 0,29. Коэффициент корреляции между озоном и температурой равен 0,7. В июле температура воздуха была на $0,2^{\circ}\text{C}$ ниже многолетней среднемесячной. Двукратное превышение ПДК_{СС} составило четыре дня подряд. Связь между КВС, озоном и температурой воздуха отсутствует. Коэффициент корреляции между озоном и температурой равен 0,44. В августе многолетняя среднемесячная температура воздуха была превышена на $0,9^{\circ}$. Двукратное превышение ПДК_{СС} составило пять дней подряд. Коэффициент корреляции между озоном и КВС равен 0,28 при 95%-й границе, равной 0,256. Статистически связь

Коэффициент корреляции у КВС и озона равен $-0,04$ и у КВС и температуры — $0,15$. Статистическая связь между этими явлениями отсутствует. У температуры и озона коэффициент корреляции равен $0,62$. В августе многолетняя среднемесячная температура воздуха была превышена на $5,4$ °С. Двукратное и более превышение ПДК_{СС} составило 16 дней подряд с конца июля по 13 августа и максимальная разовая концентрация (среднее за 20 мин) составила 208 мкг/м³. Максимальные значения концентраций озона в Москве, Долгопрудном и Вятских Полянах были достигнуты в один день 6 августа [Звягинцев и др., 2011]. Коэффициент корреляции между КВС и озоном в августе составил $0,62$, между КВС и температурой — $0,56$, а между озоном и температурой — $0,86$. На рис. 1 показан ход среднесуточных значений концентраций озона в июле и августе, а на рис. 2 — одновременный ход среднесуточных значений концентраций озона и количество вызовов скорой медицинской помощи в августе.

Дым от лесных пожаров появился в городе вечером 11 августа. Ощущался сильный запах гари, видимость в городе составила 100...150 м. Это продолжалось несколько дней. В результате появления дыма концентрации озона понизились и КВС также уменьшилось.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [Bates, 2005] отмечается, что влияние приземного озона на здоровье населения настолько хорошо изучено за рубежом, что по количеству вызовов скорой медицинской помощи можно определять косвенно концентрации озона в воздухе. Этот же автор [Bates, 2005] утверждает, что увеличение концентрации озона в предшествующей неделе на 20 мкг/м³ приводит к увеличению смертности на $0,64$ % от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхания, а в исследованиях [Gruparis et al., 2004] авторы получили увеличение смертности в результате сердечно-сосудистых заболеваний только от озона на $0,45$ % при увеличении его часовых концентраций на 10 мкг/м³. Авторы работы [Ren et al., 2007] определили, что при высокой температуре воздуха и повышенных концентрациях озона наблюдается усиление отрицательного воздействия каждого фактора на здоровье населения, т.е. синергизм температуры воздуха и озона. Как видно из рис. 1, концентрации озона постоянно росли весь июль и в конце месяца превышали двукратное значение ПДК_{СС}. В августе также продолжался рост концентраций озона до 11 августа. В этот день была максимальная среднесуточная концентрация, равная 96 мкг/м³, а среднедневная превышала 120 мкг/м³. Ночные значения также были высокие, население спало с открытыми окнами и поэтому происходило суммирование дозы воздействия озона круглосуточно. Максимальное количество вызовов скорой медицинской помощи также пришлось на 11 августа. Более высокая температура в июле не показала связи с КВС, вероятно, это обусловлено низкими концентрациями озона в июле, а в августе температура и озон оказали суммирующее отрицательное воздействие на здоровье и привели к увеличению КВС, что показывает высокий коэффициент корреляции $0,62$. Выделить действие каждого фактора пока не представляется возможным, хотя высокий коэффициент связи между температурой и КВС может быть за счёт сильной связи озона и температуры. Воздействие дыма

от лесных пожаров не привело к увеличению вызовов скорой медицинской помощи.

Вероятный механизм отрицательного воздействия озона на сердечно-сосудистую систему человека можно подтвердить следующими аргументами. В работе [Дмитриев и др., 1988] авторы инструментальными методами показали, что повышенные концентрации озона при вдыхании вызывали у животных (крысы) окислительный стресс. У животных увеличивалось количество продуктов перекисного окисления липидов — малонового диальдегида (МДА) и диеновых конъюгатов (ДК). Эти продукты окисления токсичны для организма. А в работе [Голиков, Давыдов, 2005] авторы показали, что в результате окислительного стресса также нарушается баланс в системе прооксидант-антиоксидант в сторону прооксиданта. Вовлечение активных форм кислорода в метаболические реакции в условиях недостаточности эндогенной антиокислительной системы организма оказывает прямое повреждающее действие на кардиомиоциты, способствует аритмогенной активности миокарда, активирует прокоагулянтную систему крови, ускоряет деградацию эндотелиального NO, обеспечивающего вазодилатацию, и снижает антиангинальную эффективность нитратов.

Наши исследования затронули только самый верхний слой проблем, вызванных отрицательным воздействием загрязнённого воздуха на здоровье населения России. Необходим детальный эпидемиологический анализ всех групп риска, особенно детей.

ВЫВОДЫ

Как показали результаты исследования, в относительно чистой атмосфере, аномально жаркая погода не приводит к увеличению вызовов скорой медицинской помощи, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями. При длительном воздействии высоких концентраций (выше двух ПДК_{СС}) озона и высоких температурах воздуха наблюдается статистически достоверное увеличение количества вызовов скорой медицинской помощи, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Воздействие дыма от лесных пожаров не увеличило количество вызовов скорой медицинской помощи.

Авторы выражают благодарность Шамаевой Н. В. за большую работу по подготовке временных рядов для статистической обработки.

Работа выполнена при технической поддержке ЗАО «ОПТЭК», генеральный директор Челибанов В. П.

ЛИТЕРАТУРА

- [Беликов и др., 2004] *Беликов И. Б., Егоров В. И., Еланский Н. Ф., Звягинцев А. М.* Положительные аномалии приземного озона в июле – августе 2002 г. в Москве и её окрестностях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 75–86.
- [Голиков, Давыдов, 2005] *Голиков А. П., Давыдов Б. В.* Влияние мексикора на окислительный стресс при остром инфаркте миокарда // Кардиология. 2005. № 7. С. 21–26.

- [Дмитриев и др., 1988] *Дмитриев М. Т., Захарченко М. П., Давыдов О. В., Леонтьев Н. И.* О гигиенической оценке повышенных концентраций озона в воздушной среде // Гигиена и санитария. 1988. № 2. С. 78–80.
- [Звягинцев и др., 2011] *Звягинцев А. М., Блюм О. Б., Глазкова А. А., Котельников С. Н., Кузнецова И. Н., Лапченко В. А., Лезина Е. А., Миллер Е. А., Миляев В. А., Попиков А. П., Семутникова Е. Г., Тарасова О. А., Шалыгина И. Ю.* Аномалии концентраций малых газовых составляющих в воздухе европейской части России и Украины летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 7. С. 582–588.
- [Котельников и др., 2009] *Котельников С. Н., Миляев В. А., Саханова В. В.* Положительные аномалии концентрации приземного озона в атмосфере некоторых фоновых районов. М.: ИГКЭ, 2009. С. 227–234.
- [Ревич, 2010] *Ревич Б. А.* Горячее лето 2010 г. и смертность населения европейской части России // Тез. Всерос. совещания по проблеме состояния воздушного бассейна г. Москвы и Европейской территории России в экстремальных погодных условиях лета 2010 года. Москва, ИФА им. А. М. Обухова РАН, 25 нояб. 2010.
- [Air quality..., 2005] Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005 Summary of risk assessment. WHO Press, World Health Organization, 2005.
- [Bates, 2005] *Bates D. V.* Ambient Ozone and Mortality // *Epidemiology*. 2005. V. 16. Iss. 4. P. 427–429.
- [Climate..., 2007] Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. N.Y.: Cambridge, 2007.
- [Climate..., 2010] Climate Change and Communicable Diseases in EU Member States. Stockholm, 2010.
- [Gryparis et al., 2004] *Gryparis A., Forsberg B., Katsouyanni K., Analitis A., Touloumi G., Schwartz J., Samoli E., Medina S., Ross Anderson H., Niciu E.-M., Wichmann H.-E., Kriz B., Kosnik M., Skorkovsky J., Vonk J.-M., Dörbuda Z.* Acute Effects of Ozone on Mortality from the “Air Pollution and Health: A European Project Approach” // *American J. Respiratory and Critical Care Medicine*. 2004. N. 170. P. 1080–1087.
- [Ren et al., 2007] *Ren C., Williams G., Morawska L., Mengersen K.* Ozone Modifies Associations Between Temperature and Cardiovascular Mortality — The Analysis Using the NMMAPS Data // *Epidemiology*. 2007. V. 18. Iss. 5. P. S69–S70.

INFLUENCE OF HOT WEATHER, SMOKE FROM FOREST FIRES AND AMBIENT OZONE ON HEALTH OF THE POPULATION IN VYATSKIE POLYANY THE SUMMER OF 2010

S. N. Kotelnikov¹, M. A. Manakov², E. A. Oliunin²

¹ A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Science, Russia, e-mail: skotelnikov@mail.ru

² The Station of Emergency Care Vyatskie Polyany, Kirov region, Russian

Background: Heat waves, ambient ozone and smoke from forest fires have a drastic impact on urban populations, which could increase with climate change. Ozone (O₃) is a well-documented respiratory oxidant, but increasing epidemiological evidence points to extrapolatory effects, including positive associations between ambient O₃ concentrations and cardiovascular morbidity and mortality.

Methods: We used statistical analysis for the time series of daily emergency admissions interrelationship with cardiovascular diseases and daily average temperature (T °C) of air and 24-hour average ambient ozone levels for summer months 2008, 2009 and 2010.

Results: Lower concentration of ozone and high T °C no association with cardiovascular diseases. The influence 24-hour average ambient ozone more than 60 mkg/m^3 sixteen days are associated with increased emergency admissions with cardiovascular diseases. The smoke from forest fires has not increased quantity emergency admissions.

Conclusions: Ozone modified temperature effects on cardiovascular diseases of the population in Vyatskie Polyany the summer of 2010.

SHIFT OF THE EARTH'S MAGNETIC POLE: HOW IT WILL INFLUENCE ON TECHNOSPHERE AND BIOSPHERE

L. L. Lazutin

D.V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics (SINP), M.V. Lomonosov
Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: lll@srd.sinp.msu.ru

It is well known that magnetic storms negatively influenced on biosphere and technosphere. More exactly influence is caused by the polar magnetic storms (magnetospheric substorms), which intensity increased during global magnetic storms. Possible shift of the North magnetic pole toward Siberia will be accompanied by the shift of the auroral zone where substorm activity has maximum force. As a result negative consequences of the magnetic activity will be increasing in Russia and North Europe and decreased in North America. Modeling shows that a shift of the North pole to the location of the geographical pole will result in the shift of the auroral zone close to the latitudes of St. Petersburg and Oslo, whereas pole shift to the north coast of the Novaya Zemlia will bring auroral zone over the Moscow and Baikal Lake. Influence on biosphere and technosphere will be small during the years of solar minimum, but during years of solar maximum about 40 % of a days will reach high activity level when negative influences will be essential.

1. INTRODUCTION. TECHNOSPHERE AND BIOSPHERE REACTION TO THE MAGNETIC ACTIVITY

Information about the shift of the North magnetic pole toward Siberia and predictions that can reach Siberian coast in 50 years [Olsen, Manda, 2007] catalyze numerous publications (especially in internet) ranged from speculations of possible reverse of the Earth's magnetic field polarity to the predictions of the catastrophic end of the Earth's life. Meanwhile there is possibility to oversee possible consequences of the shift based not on the mystique speculations but on scientifically justified modeling. It is possible to calculate how magnetic activity influence upon Earth's technosphere and biosphere may be affected by the shift of the magnetic pole.

Study of the effects of magnetic activity on our life and environment was initiated by famous Russian scientist A. L. Chizhevsky (1973) and developed by his followers [Breus, Rapoport, 2004; Vladimirov, Temuriants, 2000, and publications of this proceeding]. Influence of the global magnetic storms on animals and human beings is well established. Especial attention is attracted to the effects on the heart diseases which are increasing during magnetic storms. We will not go deep into the phenomena of the magnetic storms, the popular review can be found in [Lazutin, 2012]. Mostly accepted opinions relate magnetic storm biomedical influence with intensity of the magnetic pulsations and that on technosphere with induced electric currents.

First registered effects on electric technical objects caused by very strong magnetic storm on September 1, 1859 are associated with a name of English astronomer R. C. Carrington who observed for the first time large solar flare which caused magnetic storm one day later.

Since Carrington times number of the technical objects on the Earth increased enormously and even much smaller magnetic storms caused technical disasters. Let us name the most important objects:

- High-voltage transmission systems, including underwater power cables
- Long communication lines
- High-voltage transformers damage
- Long pipe lines
- Railroad lines.

Magnetic storms may destroy or interrupt operation of those objects and for many hours large regions remain without electricity and communication service. The main source of these disasters is related with an induced electric fields and associated earths currents, which are created by the fast variation of the magnetic field during polar and global magnetic storms.

US National Energy Reliability Counsel placed magnetic storms at March 1989 and October 1991 in the same category as a hurricane Hugo and San-Francisco earthquake by the rate of disaster to national economy.

2. MAGNETOSPHERIC SUBSTORMS AND AURORAL ZONE

Although popular opinion relate all disasters with magnetic storms, the real influence belong to the magnetospheric substorms. Strong magnetic storms bring substorm activity to the subauroral and middle latitudes and increase substorm magnitude. Indeed, induced electric field $E \approx dB/dt$ proportional to the magnitude of the magnetic field and velocity of changes. Magnetic variations at the Earth's surface are created by the high altitude currents: ring current (Dst) of the magnetic storms and ionosphere westward currents of the substorm.

From Figure 1 where those current effects are presented, one can see that the magnitude of the very strong magnetic storm restricted by 400 nT and duration of the decrease may vary from 2...3 to 20...30 hours. As for substorm magnetic bays, decrease for 1000...2000 nT may be occurs for 1...10 minutes. That means that substorm induced electric field is two order higher than induced by Dst magnetic storms. As it was said before, the role of magnetic storms is important because they bring substorm activity to middle latitudes. But at the same time substorm activity remains higher in the auroral zone.

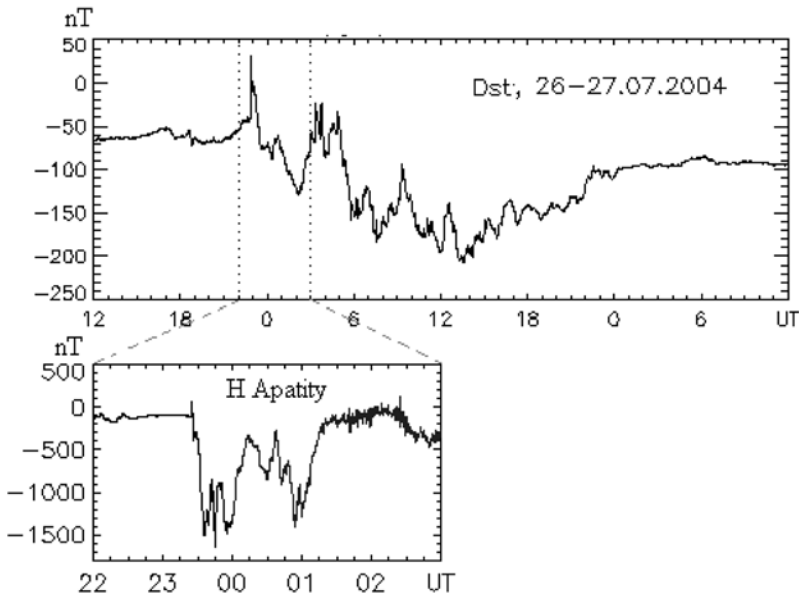


Figure 1. Dst index of the global magnetic storm and one of the substorm magnetic bays in the auroral zone

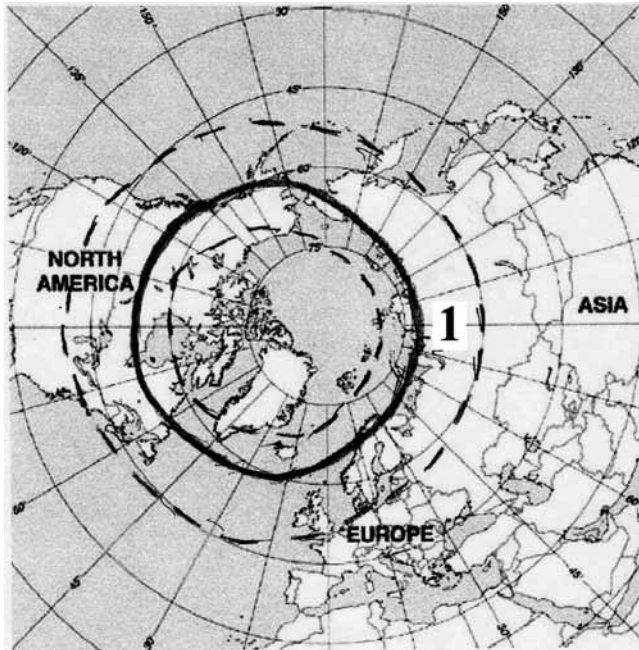


Figure 2. Auroral zone today and boundaries of auroral activity during strong magnetic storms (broken lines)

Figure 2 presents a global position of the auroral zone, the latitudes where active aurora or substorm magnetic bays are registered more often. With the increase of the magnetic activity latitudinal width of the zone is increasing and equatorial boundary is shifting toward the lower latitudes. By broken lines possible latitudes where active aurora may be observed during very strong magnetic storms are shown (adopted from [Starkov, 2000]). It is due to such equatorial shift of the active aurora which allows peoples of the middle latitudes to observe beautiful auroral display. Because of the magnetic pole asymmetric location both aurora and technical problems caused by magnetic disturbances are more often in Canada and USA than in Europe and Russia. But still technical disasters are rare because of the position of the belt of the most active and most often magnetic disturbances is helpfully come through the Arctic Ocean and the lands with low population and industrial activity.

Situation may be changed with the shift of the North magnetic pole.

3. MAGNETIC POLE SHIFT EFFECTS

Measurements of the North magnetic pole position show regular shift toward Siberia and velocity of the shift is increasing from 10 km/year in 1970 to more than 70 km/year in 2007. We cannot say whether this shift will continue, it is not a goal of this paper, but if it will proceed, we can calculate associated shift of the auroral zone and consequences of the magnetic disturbances effects on the noosphere.

For the modeling we take that auroral zone is located around the magnetic pole at the magnetic latitude 63° and that it conserve this relative position with the magnetic pole motion. Because the Earth's magnetic field is not exactly a magnetic dipole,

real auroral zone position usually is described in corrected magnetic coordinate and slightly deviates from that shown by Figure 2. But, first, it is impossible to predict how high order components of the Earth's magnetic field will be changing during magnetic pole shift, and, second, the simplified position of the auroral zone will not differ significantly from the real one. For our purpose deviation by several degrees is not important.

Figure 3 shows auroral zone positions calculated for two shift points of the North magnetic pole — number 2 new position is coinciding with geographic pole, and the number 3 corresponds to the North magnetic pole location at the Severnaya Zemlia. As a consequence of the shift for inhabitants of Canada and USA possibility to observe aurora borealis became much smaller, but at the same time a number of the serious consequence of the magnetic storms on the human health and industry will decrease significantly. But for the Europe and Russia, especially for the Siberia, situation will be totally different. Polar aurora will be shine over Baikal Lake nearly every week, as often as now is shining over Murmansk. At the same time that will bring high probability of the hearth attacks and technogenic catastrophes to Europe and Russia. And then auroral zone will be located not in deserted Arctic regions, but in the lands with dense population and overwhelmed by electric lines and oil tubes.

How often high level activity may be observed in auroral zone? To found that we used 3-hour Kp index of the magnetic activity during three years of solar cycle maximum, three years of solar minimum and three years of the transition from maximum to minimum. We considered that day was active if at least one of eight Kp values was equal 6 or higher, moderate, if Kp was between 3 and 6 with low activity if all Kp were less than 3.

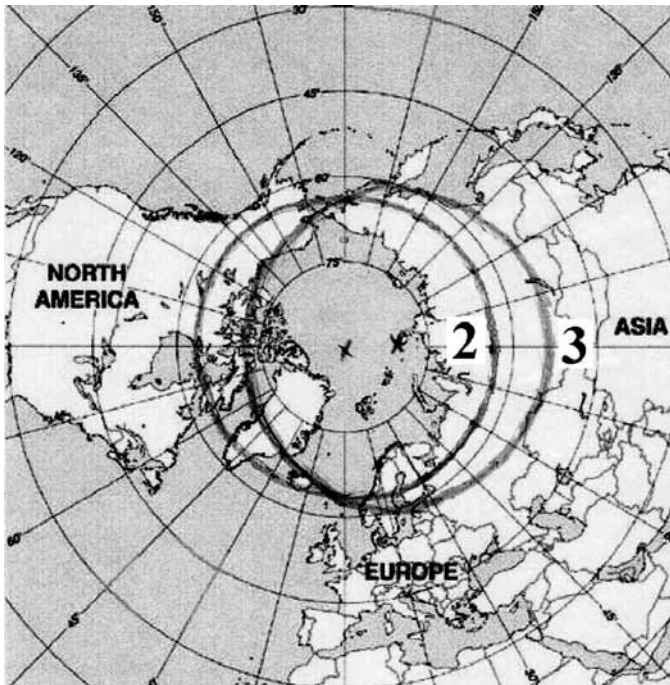


Figure 3. Two positions of the auroral zone in a case of the magnetic pole shift toward Siberia

The results of the analysis are shown by Table. Years of the solar activity minimum are not dangerous. During the last very deep minimum less than 2 % of days have high activity level. But in the activity maximum nearly half of days have high activity hours and only 15 % of days were relatively quite. There are no reasons to suppose that distribution of activity level will change after shift of the auroral zone, because magnetic activity is directed by solar wind velocity, pressure and magnetic field, independent of the Earth magnetic dipole orientation.

Number of days with different Kp depending of the 11-year solar cycle phase

Years, activity	Kp 0...2	Kp 3...5	Kp 6...9
1999–2001 (maximum)	182 (16.6 %)	467 (42.6 %)	447 (40.8 %)
2002–2004 (decrease)	226 (20.6 %)	754 (68.8 %)	116 (10.6 %)
2006–2008 (minimum)	545 (49.7 %)	532 (48.6 %)	19 (1.7 %)

CONCLUSIONS

- Shift of the North magnetic pole toward Siberia will cause associated shift of the auroral zone and the polar storms (substorms).
- Main technical and biological problems are created by polar magnetic storms (substorms) which magnitude increase and latitudinal distribution widened during magnetic storms.
- Probability of the technogenic and biomedical catastrophes will be essentially increasing in Europe and Russia, especially in Siberia and decreasing in Canada and USA.
- It is difficult to predict whether the shift of the North magnetic pole toward Siberia will continue, but it is important to know beforehand about such possibility and be prepared to use all possible measures to decrease consequences.

REFERENCES

- [Breus, Rapoport, 2004] *Breus T. K., Rapoport S. I.* Magnetic storms. Medico-byological and geophysical aspects. M., 2004 (= *Бреус Т. К., Рапопорт С. И.* Магнитные бури. Медико-биологический и геофизический аспекты. М.: Наука, 2004).
- [Chizhevsky, 1973] *Chizhevsky A. L.* Earths eko of the solar storms, M.: Nauka, 1973 (= *Чижевский А. Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Наука, 1973).
- [Lazutin, 2012] *Lazutin L. L.* Global and polar magnetic storms. M.: MSU, 2012 (= *Лазутин Л. Л.* Мировые и полярные магнитные бури. М.: Изд-во МГУ, 2012).
- [Olsen, Manda, 2007] *Olsen N., Manda M.* Will the Magnetic north pole move to Siberia? // EOS Trans. American Geophysical Union (AGU). 2007. V. 83. N. 29. P. 297.
- [Starkov, 2000] *Starkov G. V.* Global dynamics of the auroral luminosity // Physics of the nearearth interplanetary space. Apatity: PGI, 2000. V. 1. P. 409–500 (= *Старков Г. В.* Планетарная динамика аврорального свечения // Физика околоземного космического пространства: сб. Апатиты: ПГИ, 2000. Т. 1. С. 409–500).
- [Vladimirsky, Temuriants, 2000] *Vladimirsky B. M., Temuriants N. A.* Influence of the solar activity on biosphere-noosphere, M.: MNEPU, 2000 (= *Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А.* Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 374 с.).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ НА ТЕХНОСФЕРУ И БИОСФЕРУ

Л. Л. Лазутин

Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ МГУ) им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия,
e-mail: ll@srd.sinp.msu.ru

Источником воздействия магнитной активности на биосферу и техносферу являются не столько магнитные бури, сколько магнитосферные суббури, мощность которых возрастает во время магнитных бурь. Возможное смещение магнитного полюса в направлении Сибири приведёт к смещению в том же направлении авроральной зоны. В результате воздействие на биосферу и техносферу значительно вырастет на территории России и Северной Европы и уменьшится в Канаде и США. Проведённый расчёт показывает, что при смещении магнитного полюса к полюсу географическому область полярных магнитных бурь сместится на широту Петербурга, а смещение к северной оконечности Северной Земли — на широту Москвы. В годы минимума солнечной активности количество дней с Кр-индексом больше 6 составляет около 2 %, тогда как в годы максимума — порядка 40 %, и вероятность отрицательных эффектов существенно возрастает.

МЕДИЦИНСКАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РОССИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Ю. С. Любовцева¹, А. А. Макоско², Е. В. Воронова³,
О. О. Пятыгина¹, А. А. Шибалева¹, Р. И. Красноперов¹

¹ Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН), Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Представлены для оценки влияния изменения климата на здоровье населения России региональные карты изменчивости климата, характеристика демографической ситуации, карты смертности населения для двух лет, резко различающихся климатическими данными. В предположении, что наиболее серьёзные последствия для здоровья населения связаны с увеличением смертности и заболеваемости из-за волн жары, внимание акцентируется на воздействии на здоровье человека только высоких температур.

Приведённые климатические карты, данные о смертности и заболеваемости населения по регионам выявляют связи между здоровьем населения и изменением климата.

Использование ГИС-технологий позволило выявить регионы России, где климатические изменения особенно значительны, и оценить влияние этих изменений на здоровье. Показано, что смертность взрослого населения существенно зависит от температурного режима и возрастает с увеличением среднегодовой аномалии температуры приземного воздуха в данном регионе.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всём мире и в России заслуженное внимание уделяется влиянию климатических изменений на здоровье и продолжительность жизни людей. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки — медицине» предусматривает создание систем количественных критериев, которые одновременно отражали бы климатические изменения, изменения показателей природных факторов и показателей уровня жизни и здоровья населения.

Одним из способов анализа, сбора и хранения информации о динамических процессах, происходящих в ноосфере, является создание медицинских географических информационных систем (МГИС) [Гофман, 2012]. Географические информационные системы обеспечивают сбор, хранение, обработку, отображение и распространение пространственных данных, а также получение на их основе новой информации и знаний о пространственно-координированных явлениях. Технология ГИС объединяет традиционные операции работы с базами данных с преимуществами полноценного визуального представления и пространственного анализа.

В настоящее время существуют примеры успешного построения МГИС отдельных регионов [Струков, 2012]. Между тем, практически не предпринимались попытки построения МГИС для всей территории России, включающей в себя одновременно климатические, экологические, природные и медико-географические данные.

Цель настоящей работы — создание МГИС России, охватывающей всю территорию страны, в условиях изменяющегося климата и экологии, а также получение на этой основе информации об их связи и корреляции. МГИС составляется на основе информации, накопленной институтами РАН, РАМН, Росгидромета, Минздравсоцразвития и т.д., о динамике изменений климата, изменений состояния экосистем в пространстве и во времени, рисков заболеваемости и смертности населения.

В настоящее время в состав созданной нами МГИС по территории России включены три слоя: демография, состояние здоровья и болезни населения и изменения климата. В раздел демография входят следующие карты для 2005 и 2009 гг.: население в возрасте старше трудоспособного в процентах от общей численности, коэффициент миграционного прироста населения, общий коэффициент смертности (число умерших на тысячу человек и коэффициент младенческой смертности детей до одного года). Заболеваемость населения в 2005 и 2009 гг. представлена на следующих картах: общая заболеваемость взрослых болезнями системы кровообращения, контингенты больных злокачественными образованиями, болезни органов дыхания, контингенты больных хроническим алкоголизмом.

Для оценки влияния изменения климата на здоровье населения России в статье представлены региональные карты изменчивости климата, характеристика демографической ситуации, карты смертности населения для двух лет, резко различающихся климатическими данными. Поскольку предполагается, что наиболее серьёзные последствия для здоровья населения связаны с увеличением смертности и заболеваемости из-за волн жары, мы акцентируем внимание только на воздействии высоких температур на здоровье человека.

Приведённые нами климатические карты, данные о смертности и заболеваемости населения по регионам позволяют выявить связи между здоровьем населения и изменением климата.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Наблюдаемое в настоящее время изменение климата характеризуется как продолжающееся глобальное потепление [Об особенностях..., 2012]. Наиболее сильное потепление, обнаруженное по данным наблюдений во всём мире, зафиксировано после 1976 г. [Последствия..., 2008] и в значительной мере определяется антропогенным влиянием на современный климат.

Годовые аномалии температуры воздуха в приземном слое, осреднённые по территории России с 1936 по 2011 г., представлены на рис. 1. Здесь же показан линейный тренд, характеризующий среднюю скорость изменения температуры за 1976–2011 гг. Тренд рассчитан методом наименьших квадратов и выражен в градусах за десятилетие ($^{\circ}\text{C}/10$ лет). За последние тридцать лет потепление в России составило $1,5^{\circ}\text{C}$, что существенно выше, чем на земном шаре ($+0,6^{\circ}\text{C}$). В среднем по России скорость потепления за 1976–2011 гг. составила $+0,43^{\circ}\text{C}$ за 10 лет.

Для характеристики влияния изменения климата на здоровье населения мы приводим карты смертности населения (см. ниже, рис. 8) по России для 2005 и 2009 гг., температурные режимы которых существенно различаются.

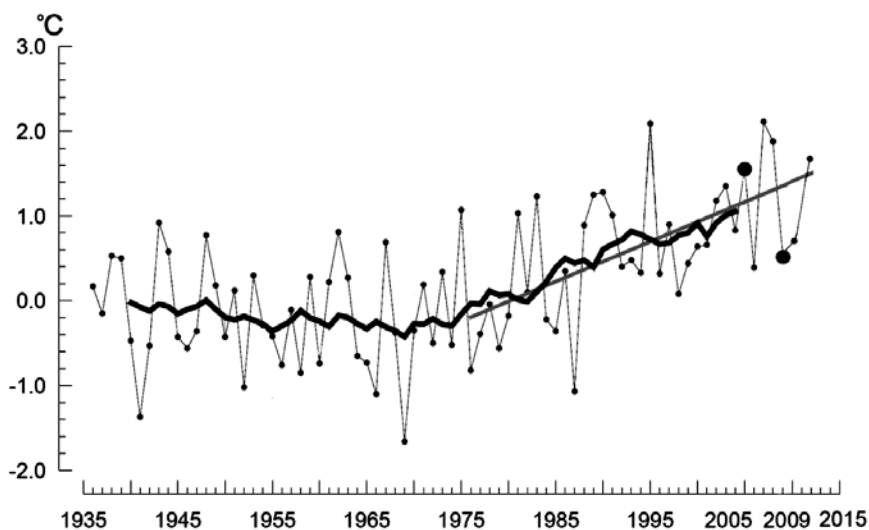


Рис. 1. Годовые аномалии (отклонения от среднего 1961–1990 гг.) температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$), осредненные по территории России. Сглаженная кривая получена 11-летним скользящим осреднением. Линейный тренд проведен по данным 1976–2011 гг. [Об особенностях..., 2012]

Как видно на рис. 1, самыми тёплыми для России были: 2007 г. ($+2,1^{\circ}\text{C}$), 1995 г. ($+2,07^{\circ}\text{C}$), 2008 г. ($+1,88^{\circ}\text{C}$) и затем 2005 г. ($+1,55^{\circ}\text{C}$), когда наблюдались экстремальные погодные условия в большинстве районов РФ. 2009 г. оказался лишь двадцать третьим в ранге тёплых лет, начиная с 1936 г. ($+0,55^{\circ}\text{C}$), и ни один из сезонов этого года не относился к экстремальным [Об особенностях..., 2009].

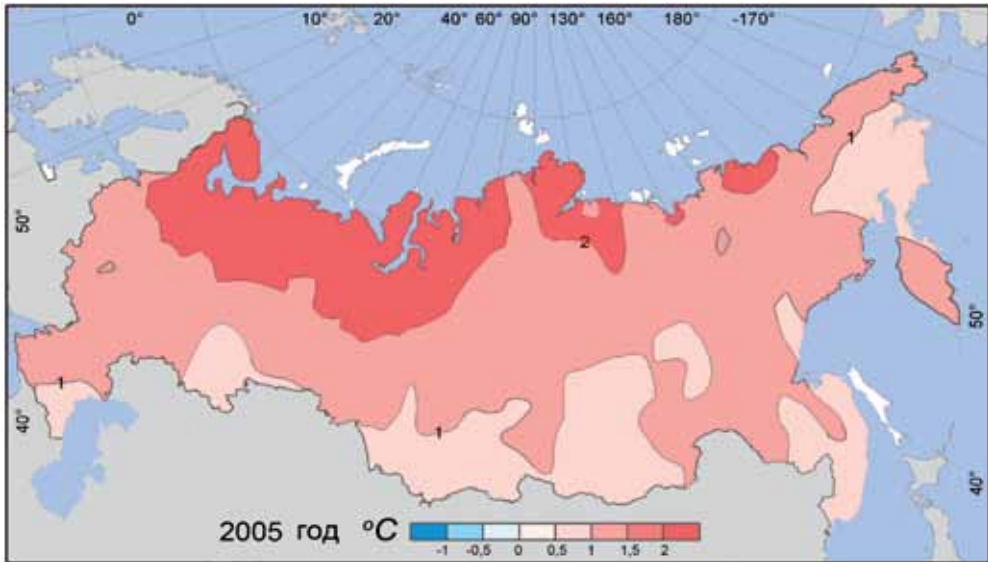
Остановимся подробнее на анализе температурного режима в эти годы. На рис. 2 приведены пространственные распределения по территории России аномалий среднегодовой температуры воздуха для этих лет. Среднегодовые и сезонные аномалии температуры приземного воздуха для России и физико-географических регионов России для 2005, 2009 и 2010 гг. приведены в табл. 1 [Обзор..., 2006; Об особенностях..., 2009; 2012].

В аномальном 2005 г. по данным Росгидромета были тёплая весна почти на всей территории России, жаркое лето и самая тёплая осень за весь период наблюдения (см. табл. 1). На Европейской части России (ЕЧР) и севере Сибири измеренные температуры в мае вошли в число 10 % самых высоких для весны. Летом на всей территории страны в приземном слое воздуха аномалии температуры были очень большими (см. табл. 1). В июле и августе жаркая погода отмечалась в Западной и Средней Сибири, Прибайкалье и Забайкалье. В Кемеровской и Новосибирской областях, на Алтае и юге Красноярского края температура достигала $+39^{\circ}\text{C}$. В августе жара была на ЕЧР. Рекордно тёплой осенью была почти на 50 % территории России. Для ЕЧР, Дальнего Востока, Западной Сибири аномалии температуры осенью превысили $+9^{\circ}\text{C}$., в Якутии $+10^{\circ}\text{C}$.

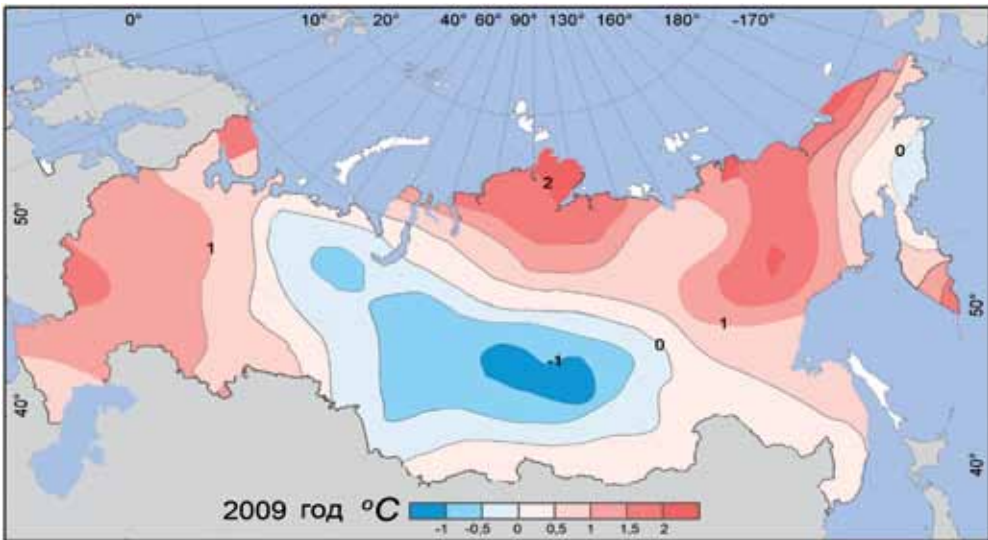
Лето 2009 г. оказалось холоднее лета 2005 г. для всех регионов России. Особенно резко различались температурные режимы летом в Западной Сибири ($+1,22$ и $-0,13^{\circ}\text{C}$), в Приамурье и в Приморье ($+1,21$ и $-0,19^{\circ}\text{C}$) и в

Прибайкалье и Забайкалье (+1,39 и +0,49 °С). Осень 2005 г. была теплее, чем в 2009 г. для всех регионов.

Сезонное различие в температурных режимах в 2005 и 2009 гг. привело к значительному различию среднегодовых аномалий: в Западной Сибири +1,47 и -0,12 °С, Средней Сибири +1,52 и +0,16 °С, Прибайкалье +0,92 и +0,01 °С, ЕЧР +1,52 и +1,03 °С, что хорошо видно при сравнении карт рис. 2а и б.



а



б

Рис. 2. Поле аномалий среднегодовой температуры (°С) приземного воздуха на территории России (отклонения от средних 1961–1990 гг.) [Обзор..., 2006; Об особенностях..., 2009]: а – 2005 г.; б – 2009 г.

Таблица 1. Среднегодовые и сезонные аномалии температуры (в °С) (отклонения от средней температуры 1936–1961 гг.) приземного воздуха для РФ и физико-географических регионов РФ для 2005, 2009, 2010 гг. [Обзор..., 2006; Об особенностях..., 2009; Российский..., 2011]

Период		Регион						
		РФ	Европейская часть России	Западная Сибирь	Средняя Сибирь	Прибайкалье	Северо-восток	Приамурье
Год	2005	1,35	1,52	1,47	1,52	0,92	1,21	0,89
	2009	0,55	1,03	-0,12	0,16	0,01	1,16	0,64
	2010	0,65	1,26	-0,7	0,29	-0,12	0,94	1,69
Зима	2005	0,27	2,21	-0,45	-0,05	-1,33	-0,96	0,76
	2009	0,7	2,81	0,28	-0,35	0,08	-0,45	1,11
	2010	-2,09	-2,15	-6,39	-2,43	-2,76	1,20	1,30
Весна	2005	1,32	0,26	1,75	2,27	1,48	1,95	-0,15
	2009	1,17	0,37	1,23	0,98	1,61	2,14	1,2
	2010	0,74	1,81	0,76	1,00	-1,19	-0,96	0,59
Лето	2005	1,05	0,68	1,22	1,07	1,39	1,08	1,21
	2009	0,49	0,42	-0,13	1,09	0,49	0,79	-0,19
	2010	1,83	3,64	-0,02	0,76	1,43	1,8	2,10
Осень	2005	2,73	2,87	3,37	2,80	2,05	2,78	1,81
	2009	1,0	2,17	0,94	0,17	-0,65	1,53	0,37
	2010	1,86	1,53	2,22	1,80	1,52	1,60	2,41

В 2010 г. среднегодовая аномалия по территории России составила +0,65 °С и превысила аномалию 2009 г. всего на +0,11 °С. В ранжированном по убыванию временном ряду среднегодовых аномалий температур, осреднённых по территории России за период наблюдений с 1936 по 2011 г., 2010 г. занимает всего лишь 22-е место. Однако сложился он из экстремально холодной зимы и рекордно жаркого лета с экстремальными условиями в ЕЧР [О состоянии..., 2011].

Жаркое лето 2010 г. в России отмечается как одна из самых крупных в мире аномалий этого года. Таким жарким для России в целом, для регионов ЕЧР, Приамурья и Приморья лето было впервые. Эпицентром летней жары в России были центр и юг ЕЧР. Среднесуточные температуры воздуха здесь превышали климатическую норму на +7,11 °С. Максимальные температуры достигали +33...38 °С. В Москве максимальная температура была +38,2 °С. Во всех федеральных округах ЕЧР июльская среднемесячная температура достигала абсолютного максимума. Аномалии среднегодовой температуры в этом регионе равна +1,26 °С [О состоянии..., 2011].

Одновременно на территории Западно-Сибирской низменности сформировалась большая область отрицательных аномалий температуры (до -1,5 °С). В поле среднегодовых аномалий выделились две большие области тепла (ЕЧР и Восточная Сибирь), разделённые обширным очагом отрицательных аномалий, охватившим всю Западную Сибирь (-0,7 °С) (кроме её северных районов), южную часть Красноярского края и Прибайкалье (-0,12 °С).

Данные, приведённые в табл. 1, позволили выделить регионы, для которых температурные режимы в рассмотренные годы резко различаются, это Западная Сибирь, Прибайкалье и Забайкалье, Приамурье и Приморье (см. рис. 2). Именно для этих районов мы будем искать связь изменения климата с заболеваемостью и смертностью населения [Любовцева и др., 2010].

ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НАСЕЛЕНИЯ РФ

При сопоставлении показателей смертности и заболеваемости населения в различных регионах РФ необходимо, прежде всего, учесть сложившуюся демографическую структуру населения, обусловленную различием природно-климатических условий, комфортностью проживания, безопасностью жизни, наличием или отсутствием развитой инфраструктуры и т. д.

В России на протяжении последних лет население страны непрерывно сокращается (рис. 3). По оценке Федеральной службы госстатистики численность постоянного населения РФ на 01.12.2010 составила 142,9 млн [Российский..., 2011]. В 1897 г. население Российской империи в современных границах составляло 67,047 млн чел. [Население..., 1998]. До середины 1960-х гг. (исключая годы войн и голода 1932–1933 гг.) естественный рост населения в РФ оставался высоким (более 1 % в год), а затем стабилизировался на уровне 0,5...0,7 % в год в течение примерно 30 лет. В 1993 г. впервые была зафиксирована убыль населения на 0,14 % или на 206 000 чел. (рис. 4). Начиная с 1995 г. убыль населения стала устойчивой. Сначала интенсивность убыли не превышала 0,2 % в год, в 1999 г. — 0,4 % в год, а в 2003 г. — 0,55 % в год. Чрезвычайно важно, что сокращение численности населения после 1993 г. происходит из-за его естественной убыли, т. е. превышения смертности над рождаемостью (см. рис. 4).

За период с 1992 по 2010 г. в России зафиксировано 27 554,1 тыс. родившихся, а число умерших составило 40 674,5 тыс. чел., т. е. смертность в нашей стране превышала рождаемость в полтора раза. Только за 2010 г. потеря численности населения составила 239,6 тыс. человек за счёт естественной убыли [Демографический..., 2010].

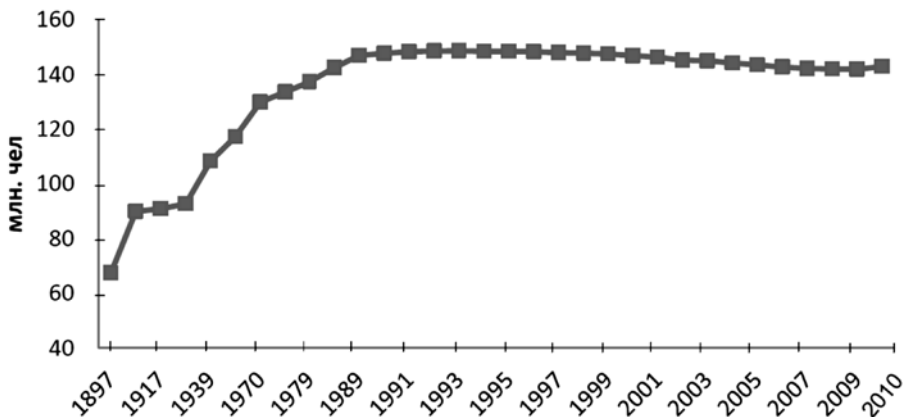


Рис. 3. Численность населения России [Российский..., 2011]

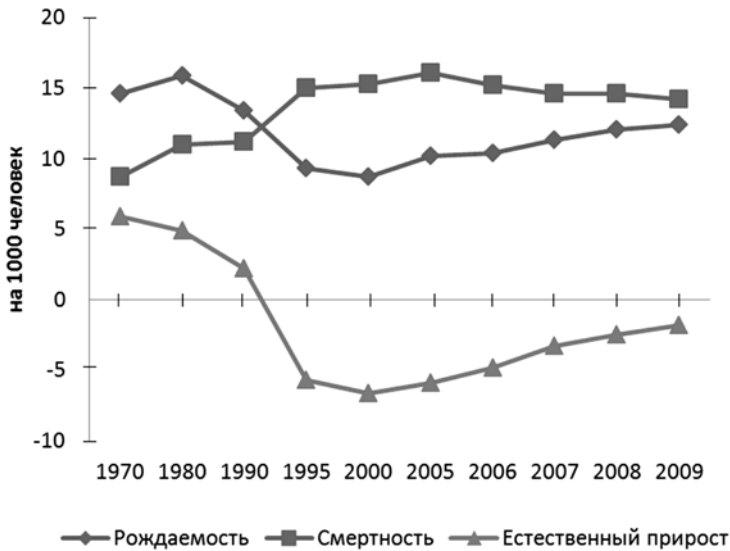


Рис. 4. Естественный рост населения России с 1970 г. [Российский..., 2011]

Естественный прирост был отрицательным в Центральном федеральном округе (ЦФО) (–4,7 на 1000 чел.), Северо-Западном ФО (С-ЗФО) (–3,9 на 1000 чел.), Приволжском ФО (–2,5 на 1000 чел.), в Дальневосточном ФО (–0,3 на 1000 чел.) и положительным в Южном федеральном округе (ЮФО) (+1 на 1000 чел.) и Уральском федеральном округе (+7 на 1000 чел.). В различных областях ЦФО естественная убыль населения изменялась от –3,4 до –9,9 на 1000 чел. В ЮФО естественный прирост населения составил 23,8 в Чеченской республике, 15 в Республике Ингушетия и 12,4 в Республике Дагестан на 1000 чел. [Численность и миграция..., 2009; Численность населения..., 2009].

Заметное влияние на изменение демографической ситуации России и изменение возрастно-половой структуры населения в этот период оказали объёмы и направления миграции населения. Миграционный прирост с 1992 по 2010 г. составил 6,4 млн чел., что компенсировало сокращение численности населения России. В 2009 г. приток населения в ЦФО составил 46 на 10 000 чел. и 35 на 10 000 чел. в 2005 г. В СЗФО при значительном притоке населения в Санкт-Петербург (68 на 10 000 чел.) в 2009 г. наблюдается массовый исход из республики Коми и Мурманской области – 50...70 на 10 000 чел. Самая большая миграция наблюдалась из Магаданской области (154 в 2005 г. и 96 в 2009 г. на 10 000 чел.) и из Еврейской АО (75 в 2005 г. и 201 в 2009 г. на 10 000 чел.).

При снижении общей численности населения количество людей в возрасте 55...59 лет почти удвоилось, численность детей до 5 лет увеличилась на 21 %, 20...24 года — на 13 %, а численность детей 10...14 лет сократилось на 43 %, а в возрасте 15...19 лет на — 25 %. В 2009 г. только 15,9 % постоянного населения России составляли люди моложе трудоспособного возраста, 21,2 % — старше трудоспособного возраста и 62,9 % — трудоспособного возраста (рис. 5). Средний возраст населения изменился с 34,9 лет в 1990 г. до 38,8 лет в 2009 г.

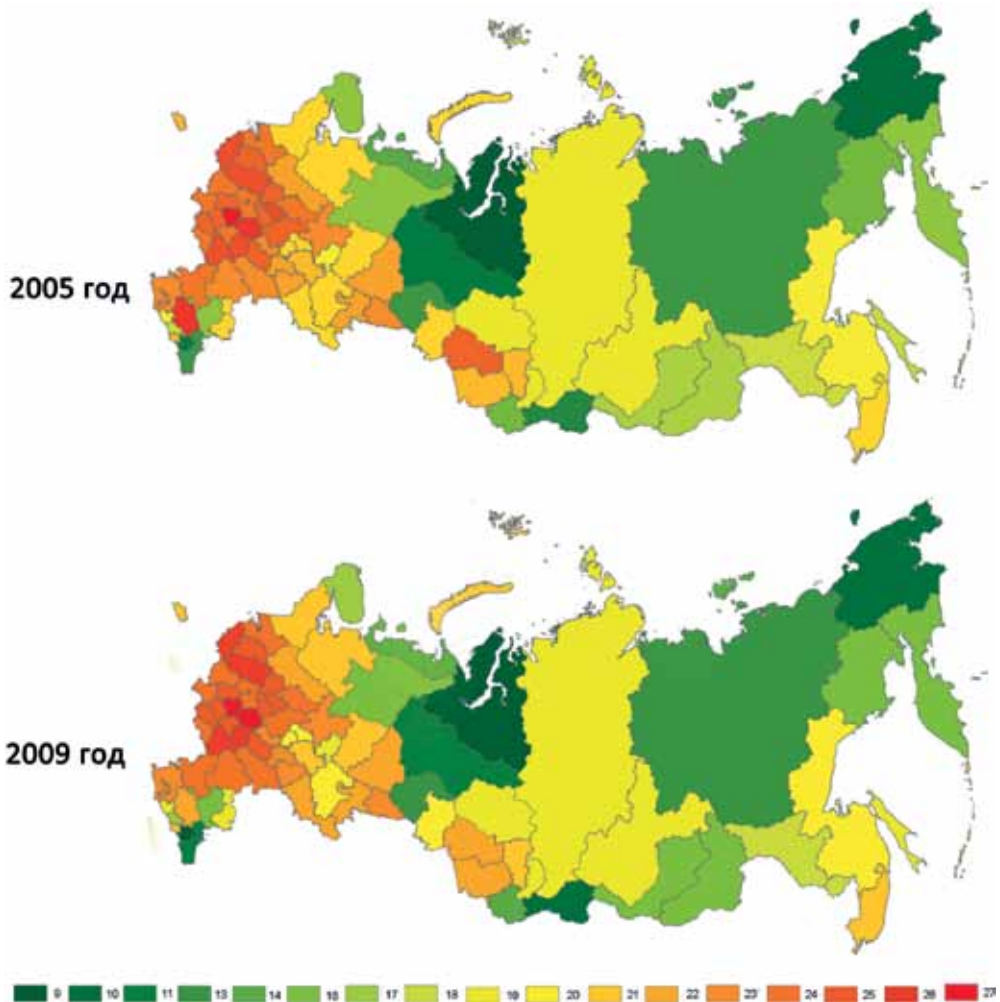
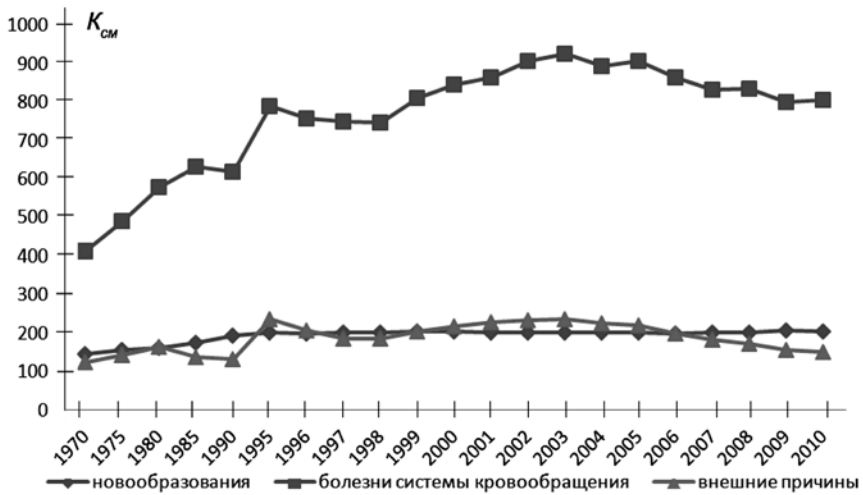


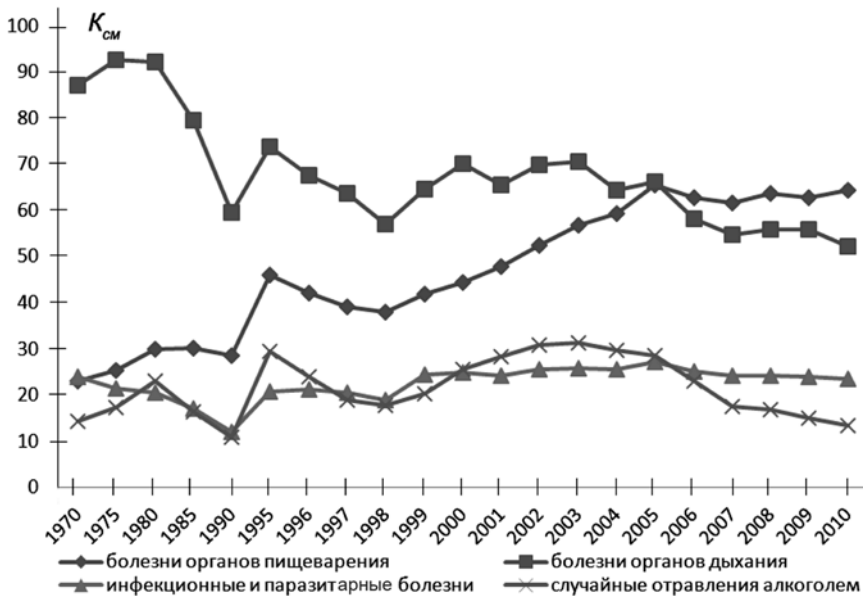
Рис. 5. Население в возрасте старше трудоспособного в процентах от общей численности населения

Региональное распределение по возрастам оказалось неравномерным. Максимальное количество детей (до 15 лет) в Чеченской республике 32,9 %, в Ингушетии 28,8 %, в Дагестане 25,7 %, в республике Тыва 28,9 %, а также в Ненецком, Чукотском, Ямало-Ненецком округах 21...22 %. Минимальное — в Москве и Санкт-Петербурге (12,5 %). На рис. 5 показано, что доля населения старше трудоспособного возраста максимальна в Центральном ФО (23,5...27,4 %) и минимальна в республиках Кавказа (8,6...11,4 %).

В северных районах нашей страны с суровыми природно-климатическими условиями доля стариков существенно снижена из-за оттока их в связи с реальными угрозами их здоровью. В Ямало-Ненецком, Ханты-Мансийском и Чукотском автономных округах их доля составляла всего 8,8...10,5 % в 2009 г. В целом по РФ население в возрасте старше трудоспособного увеличилось с 20,4 до 21,6 % с 2005 по 2009 г.



а



б

Рис. 6. Коэффициент смертности взрослого населения (K_{CM}) — число умерших на 100 000 чел. по основным классам причин смерти

СМЕРТНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ В РФ

В 2009 г. по данным Росстата большая часть россиян умирала от болезней системы кровообращения (56 %), от новообразований (14,5 %) и внешних причин смерти (11,6 %). Болезни органов дыхания (3,9 %), пищеварения (4,4 %), а также инфекционные и паразитарные болезни (1,6 %) существенно меньше влияют на продолжительность жизни населения [Здоровье..., 2011].

Динамика изменения смертности взрослого населения РФ от разных причин с 1970 по 2011 г. показана на рис. 6 [Коэффициенты..., 2010; Здоровье..., 2011]. Приведённые данные убедительно доказывают, что в целом по России постепенно снижается: смертность от внешних причин (в том числе от отравления алкоголем), болезней системы кровообращения (БСК), инфекционных болезней, но пока растёт смертность, связанная с новообразованиями и болезнями органов пищеварения.

Смертность от БСК в РФ очень высока и является одной из острейших проблем нашей системы здравоохранения [Здоровье..., 2010, 2011]. Она намного выше, чем в развитых странах. Так, в Японии $K_{см}$ от БСК равен 250, в США — 270, во Франции — 240.

Высокая смертность от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) обусловлена многими причинами: демографической ситуацией, снижением рождаемости, и как следствие, увеличением доли пожилых людей с более высоким риском ССЗ, экономическими факторами, неадекватной медико-социальной помощью, огромным социальным расслоением общества (большой процент нищих). По данным [Здоровье..., 2010] не менее 20 % смертей от ССЗ в РФ связано со злоупотреблением алкоголем.

Смертность от внешних причин в РФ долгое время занимала второе место в структуре смертности после БСК. По количеству погибших от ВП наша страна опережает многие страны мира. Только за период с 1990 по 2010 г. в России погибло 6,06 млн чел. Для мужского населения $K_{см}$ от внешних причин очень высок и равен 290 в 2009 г.

Начиная с 2003 г. $K_{см}$ от внешних причин уменьшался, в том числе резко сократилось количество смертей от отравления алкоголем. Соответственно, на первое место вышли две причины смерти: болезни системы кровообращения и новообразования. Злокачественные новообразования являются проблемой первостепенной важности для многих экономически развитых стран, где уровень смертности от злокачественных образований стоит на втором месте после БСК.

По данным [Здоровье..., 2010] максимальное количество заболевших злокачественными новообразованиями приходится на возрастную группу 65...79 лет (1389 чел. на 100 000 населения при детской заболеваемости 12,3 чел. на 100 000 населения). Поэтому увеличение количества заболевших злокачественными новообразованиями с 1998 по 2008 г. на 15,2 % можно связать с постарением населения России. Наиболее высокий уровень заболеваемости злокачественными новообразованиями, так же как и БСК, традиционно отмечается в административных территориях нашей страны, среди населения которых велик удельный вес старших возрастных групп (см. рис. 5). Подчеркнём, что одинаковая зависимость БСК и новообразований от демографической структуры населения регионов России приводят к тому, что карты этих болезней очень похожи [Любовцева и др., 2012].

Основные причины младенческой смертности показаны на рис. 7. Младенческая смертность (до 1 года), как и детская смертность (до 5 лет), в России постепенно снижается [Здоровье..., 2010, 2011]. Разрыв максимальной и минимальной детской смертности по регионам также велик.

Наиболее высокие коэффициенты детской смертности отмечались в Дальневосточном и Южном (в Чечне — 16,6 %) округах, самые низкие — в Северо-Западном (в Санкт-Петербурге — 4,8 %) и Уральском округах [Любовцева и др., 2012].

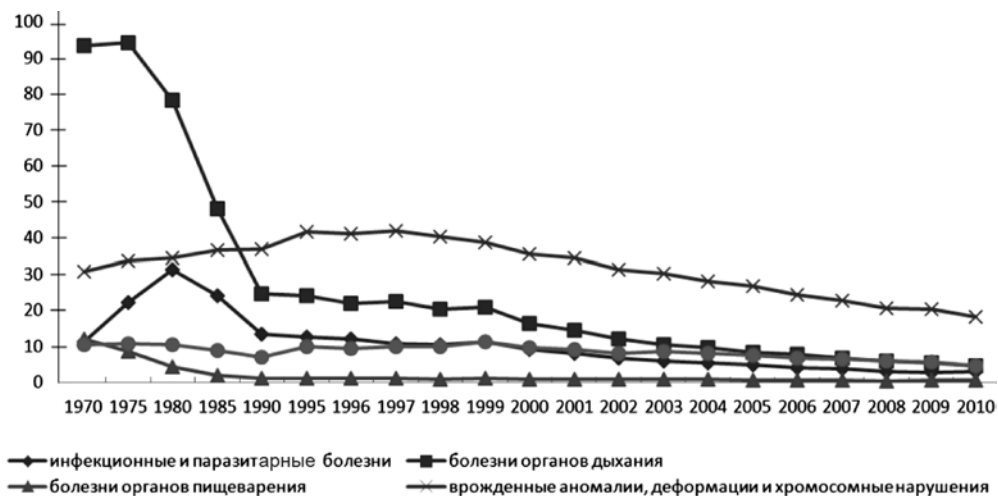


Рис. 7. Младенческая смертность на 1000 родившихся живыми и умерших до 1 года

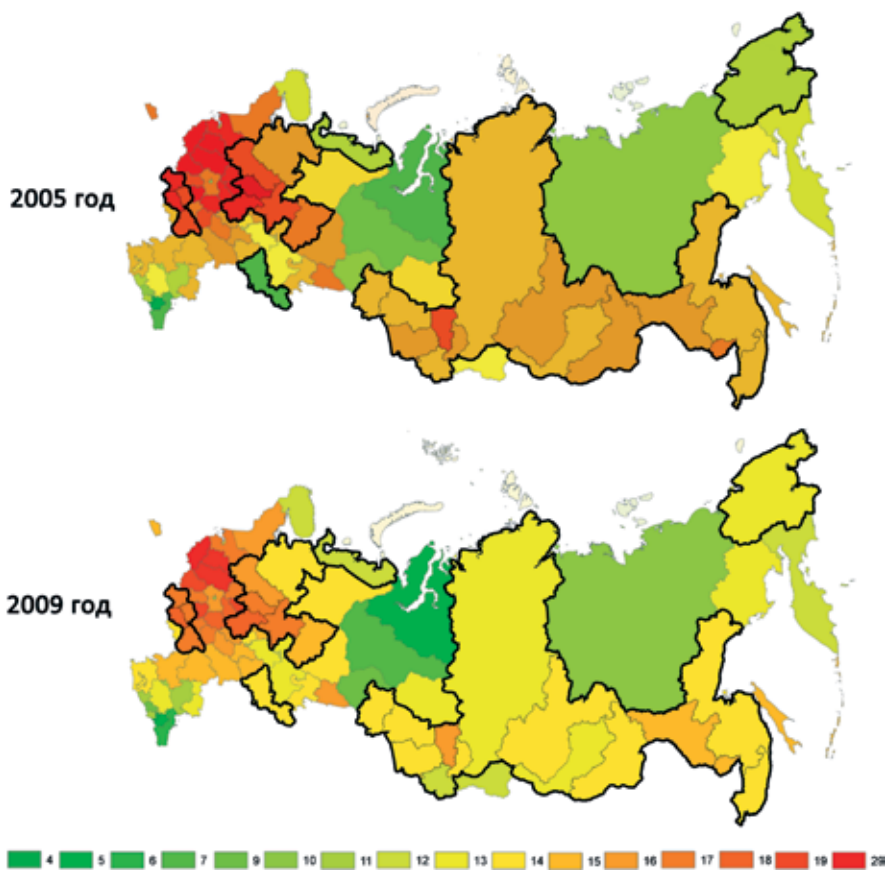


Рис. 8. Общий коэффициент смертности $K_{см}^o$ (число умерших на 1000 чел.)

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И СМЕРТНОСТЬ

По данным Росстата в 2005 г. умерло больше на 293,4 тыс. чел., чем в 2009 г. Среди них от БСК — больше на 62,8 тыс. чел., от ВП — на 91,3 тыс. чел., среди них от отравления алкоголем — на 19,5 тыс. чел., от новообразований — на 5,7 тыс. чел., от БОД — на 15,3 тыс. чел.

Сопоставим коэффициенты смертности $K_{см}$ по основным классам причин смерти для 2005, 2009 и 2010 гг. для России в целом и для отдельных федеральных округов. Для этого воспользуемся данными табл. 2 и рис. 8, где показаны распределения общего коэффициента смертности для 2005 и 2009 гг. В 2005 г. коэффициент смертности по всем основным заболеваниям, кроме новообразований, оказался выше, чем в 2009 г.

Среди основных причин смерти следует выделить БСК (908,8 чел. для 2005 г. и 801 чел. для 2009 г.), внешние причины (220,7 и 158,3 чел.) и новообразования (201,2 и 206,9 чел.). Здесь же для сравнения приведены значения коэффициента смертности ($K_{см}$) по основным причинам смерти для 2010 г. В 2010 г., также как и в 2009 г., все значения $K_{см}$ ниже, чем в 2005 г., кроме новообразований. Рост $K_{см}$ от новообразований в 2009 и 2010 гг. по сравнению с 2005 г. отражает общую тенденцию динамики этих заболеваний и смертности от них, характерных для России. Пока в России смертность от новообразований увеличивается с каждым годом.

Таблица 2. Коэффициент смертности $K_{см}$ — (число умерших на 100 000 чел.) по основным классам причин смерти в 2005, 2009, 2010 гг.

Причины смерти	2005 г.	2009 г.	2010 г.
Умершие от всех причин	1610	1416	1419,2
От болезни системы кровообращения	908	801	805,9
От внешних причин смерти	220,7	158,3	151,7
Из них отравления алкоголем	28,6	15	13,4
От новообразований	201,2	206,9	205,1
От болезней органов дыхания	66,2	56	52,3
От болезней органов пищеварения	65,5	62,7	64,4

В 2010 г. существенно выросло количество людей умерших от БСК (на 15 200 чел. больше) и болезней органов пищеварения (на 3000 больше) по сравнению с 2009 г. Всего количество умерших в России составило 2028,5 тыс. чел., что на 18 тыс. больше, чем 2009 г.

Пространственное распределение по территории России общего коэффициента смертности для 2005 и 2009 гг. показано на рис. 8. Здесь общий коэффициент смертности означает число умерших на 1000 чел. Карты региональной зависимости $K_{см}^o$ прежде всего наглядно показывают, что уровень $K_{см}^o$ существенно различается для отдельных регионов России.

Наиболее высокий общий коэффициент смертности наблюдается в Центральном федеральном округе (17,4) и в Северо-Западном федеральном округе (17,7), где велика доля пожилых людей. Наименьший $K_{см}^o$ в Южном федеральном округе (13,2).

Сравнение $K_{\text{см}}^{\circ}$ для двух лет показало, что значение общего $K_{\text{см}}^{\circ}$ в аномальном 2005 г. выше для всех округов и областей, чем в 2009 г. Диапазон изменения $K_{\text{см}}^{\circ}$ достаточно велик: от 24,5 (Псковская область) до 3,8 (Ингушетия) в 2005 г. до 20,9 и 3,7 в 2009 г.

При сравнении карт 2005 и 2009 гг. видно, что смертность в 2005 г. существенно выше в районах Западной Сибири, Приамурья, Приморья и Забайкалья, где наблюдалось максимальное потепление по сравнению с 2009 г.

Максимальное различие для 2005 и 2009 гг. общего $K_{\text{см}}^{\circ}$ наблюдается в Западной Сибири: Ямало-Ненецкий (5,9 и 5,4), Ханты-Мансийский А. О. (7,1 и 6,6), Тюменская (9,8 и 8,8), Омская (15,5 и 13,6), Новосибирская (16,1 и 14,1), Томская области (14,5 и 12,9). В 2005 г. значение общего $K_{\text{см}}^{\circ}$ варьирует от 18,7 до 16,7 для Кемеровской и Иркутской областей. Для этих же районов в 2009 г. $K_{\text{см}}^{\circ} = 15,9...13,5$.

В 2010 г. особенно интересно провести сравнение $K_{\text{см}}^{\circ}$ с 2005 и 2009 гг. для области образовавшегося обширного очага отрицательных аномалий среднегодовой температуры в Западной Сибири, Южной части Красноярского края и Прибайкалье (см. табл. 1). Значения общего коэффициента смертности для Сибирского Федерального округа изменились с 16,5 в 2005 г. до 14,2 в 2010 г., для ДВФО — с 15,3 в 2005 г. до 13,8 в 2010 г.

Максимальные различия для 2005 и 2010 гг. общего $K_{\text{см}}^{\circ}$ наблюдаются в Сибирском федеральном округе (Республика Хакасия 17,4 и 13,9; Алтайский край 16,7 и 15,0), в Забайкальском крае 17,2 и 13,4; Иркутской 17,0 и 14,4; Кемеровской области 18,7 и 16,1 и в Дальневосточном федеральном округе (Приморский край, Хабаровский край 16,3 и 14,6; Амурская область 16,9 и 15,3; Сахалинская область 17,4 и 14,9; Еврейская АО 17,9 и 15,5). Следует добавить, что в 2005 г. $K_{\text{см}}^{\circ}$ для всех областей ЕЧР выше $K_{\text{см}}^{\circ}$ в 2010 г. По сравнению с 2009 г. ситуация иная. Есть несколько областей, где общий коэффициент смертности выше, чем в 2009 г. Это Владимирская, Костромская, Липецкая, Орловская, Рязанская, Тамбовская и Ярославская области.

Таким образом, на территории России для 2005, 2009 и 2010 гг. выделены регионы, где климатические изменения радикально влияют на температурные режимы регионов, их среднегодовые и сезонные аномалии температуры. Показано, что увеличение среднегодовой аномалии температуры приземного воздуха приводит к существенному увеличению коэффициента смертности. Увеличение коэффициента смертности максимально в регионах, где зафиксированы максимальные положительные аномалии.

В первом приближении разницу между значениями $K_{\text{см}}^{\circ}$ для каждой из областей в 2005 и 2009 гг. можно отнести за счёт изменения климата. Различие $K_{\text{см}}^{\circ}$ между отдельными областями определяется многими причинами, включая демографию, антропогенную активность [Ревич, 2010], социальные условия, уровень безработицы, бедности и медицинского обслуживания населения.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН по программе «Фундаментальные науки — медицине» и гранта РГНФ № 12-06-00-375а.

ЛИТЕРАТУРА

- [Гофман, 2012] *Гофман В. В.* ГИС в здравоохранении и медицине в РФ // ArcReview. 2012. Т. 1. № 60. С. 1–3.
- [Демографический..., 2010] Демографический ежегодник России. 2010. С. 295–300.
- [Заболееваемость..., 1996] Заболееваемость населения. Здравоохранение в Российской Федерации: Статистич. сб. М.: Госкомстат России, 1996.
- [Здоровье..., 2010] Здоровье России: Атлас / Под ред. Бокерия Л. А. М.: НССХ им. А. Н. Бакулева РАМН, 2010. 266 с.
- [Здоровье..., 2011] Здоровье России: Атлас / Под ред. Бокерия Л. А. М.: НССХ им. А. Н. Бакулева РАМН, 2011. 374 с.
- [Коэффициенты..., 2010] Коэффициенты смертности по основным классам причин смерти по субъектам Российской Федерации // Демографический ежегодник России 2010. 2010. С. 295–300, 252–253.
- [Любовцева и др., 2010] *Любовцева Ю. С., Красноперов Р. И., Гвишиани А. Д., Мако-ско А. А., Воронова Е. В., Лушиников А. А.* Информационное наполнение медицинской геоинформационной системы России // Тез. докл. Международ. конф. «Влияние космической погоды на человека в космосе и на земле». ИКИ РАН, Москва, Россия, 2–8 июня 2012.
- [Население..., 1998] Население России за 100 лет (1897–1997) Статистический сборник. М.: Госкомстат России, 1998. 222 с.
- [О состоянии..., 2011] О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 году: Гос. докл. Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета. М., 2011.
- [Об особенностях..., 2009] Об особенностях изменения климата на территории РФ в 2009 году: Докл. Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета. М., 2009.
- [Об особенностях..., 2012] Об особенностях климата на территории РФ за 2011 год: Докл. Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета. М., 2012.
- [Обзор..., 2006] Обзор загрязнений природной среды за 2005 год. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета, 2006.
- [Последствия..., 2008] Последствия изменения климата: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета, 2008. 287 с.
- [Ревич, 2010] *Ревич Б. А.* Экологические приоритеты и здоровье: социально-уязвимые территории и группы населения // Экология человека. 2010. № 7.
- [Российский..., 2011] Российский статистический ежегодник. 2011. С. 99–105.
- [Стандартизованные..., 1997] Стандартизованные коэффициенты смертности по основным классам причин смерти // Демографич. ежегодник России: Статистич. сб. М., 1997.
- [Струков, 2012] *Струков Д. П.* ГИС здравоохранения Санкт-Петербурга: задачи, геопорталы, опыт // ArcReview. 2012. Т. 1. № 60. С. 7–10.
- [Численность и миграция..., 2009] Численность и миграция населения Российской Федерации в 2008 г. // Статистич. бюл. М., Росстат. 2009. С. 29.
- [Численность населения..., 2009] Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту на 1 января 2009 года // Статистич. бюл. М., Росстат, 2009. С. 26–29.

MEDICAL GEOINFORMATION SYSTEM OF RUSSIA IN THE CONDITION OF CHANGING CLIMATE

*Yu. S. Lyubovtseva*¹, *A. A. Makosko*², *E. V. Voronova*³,
*O. Pyatygina*¹, *A. Shibaeva*¹, *R. I. Krasnoperov*¹

¹ Geophysical Center Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Obukhov Institute for Physics of Atmosphere Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Moscow State University, Moscow, Russia

During last years all over the world and in Russia the considerable attention is given to the influence of climatic changes to the human health and the life interval. The program of fundamental research of Russian Academy of Science “Fundamental Science to Medicine” assumes the creation of a system of quantitative criteria that would represent the simultaneous climate changes, the changes of natural factors and the changes of life and health levels of the population.

The medico-geographical information nets (MGIN) is a method for analyzing and collecting the information on the dynamical processes going on in the noosphere. Geographical information nets (GIN) are the systems providing collection, storage, treatment and spreading the spatial data that can serve for obtaining a new information and knowledge on spatially coordinated phenomena. The GIN technologies combine the traditional operations with the data bases and possess the advantages of full-fledged visual presentation and spatial analysis.

At present time there exist the successful examples of creating MGIN for some regions of Russia. This work aims at creating the MGIN of Russia overlapping the whole territory of the country under the conditions of the climatic and ecological changes as well as using MGIN as a basis for obtaining the information on their interconnections and correlations. The MGIN is composed on the basis of the information on the dynamics of the climate changes, the spatial and temporal changes in the states of ecosystems, risks of deceases and mortality of the population

A special MGIN-project is developed for estimating and mapping the influences of climate changes on the public health. The MGIN contains the maps of data bases, regional maps of climate changes, demographic data and the population dynamics in Russia, the mortality and its main causes for each region. The GIS technologies allowed for separate the regions of Russia, where the climatic changes are especially strong and to evaluate the influence of these changes on the public health in Russia.

The mortality of the adult population is shown to essentially depend on the temperature regime and to increase with the annual average surface air temperature anomaly in the region.

ВЕГЕТАТИВНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ КРОВООБРАЩЕНИЯ И СОСТОЯНИЕ МИОКАРДА У МУЖЧИН ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ МОНИТОРИНГЕ И РАЗНОЙ АКТИВНОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А. Л. Марков

Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, Россия, e-mail: volkarb@mail.ru

Обследованы мужчины Сыктывкара. Выявлено, что наиболее чувствительными к метеорологическим и космическим параметрам оказались стресс-индекс и показатель активности регуляторных систем. Возмущённое состояние геомагнитного поля (18 февраля 2011 г.) не оказало существенного влияния на функциональное состояние организма практически здоровых мужчин-северян.

В рамках международного проекта «Марс-500» в период с апреля 2009 г. по ноябрь 2011 г. на Севере России (Сыктывкар, 62° с. ш.) проведено исследование по единой методике (разработанной в ГНЦ РФ — Институте медико-биологических проблем РАН) группы мужчин-северян.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить изменения вегетативной регуляции кровообращения и состояния миокарда у мужчин Европейского Севера России при длительном мониторинге и разной активности геомагнитного поля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследовано 8 практически здоровых мужчин Сыктывкара (61° 40' с. ш.) возрастом от 27 до 44 лет (средний возраст $30,00 \pm 4,31$ лет) с апреля 2009 г. по декабрь 2011 г. (24 точки наблюдения). Группа добровольцев-северян включала научных сотрудников академических институтов КНЦ УрО РАН (от аспиранта до старшего научного сотрудника) и служащих Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (от инспектора до начальника отдела).

Для выявления особенностей функционального состояния организма 8 мужчин-северян при разной активности геомагнитного поля Земли обследование проводили при возмущённом (18 февраля 2011 г.) и спокойном состоянии поля (февраль 2011 г.).

В исследовании использовали аппаратно-программный комплекс «Эко-сан-2007» (Медицинские компьютерные системы, Зеленоград), включающий в себя аппаратно-программные комплексы «Кардивар» (анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР)) и «КардиоВизор-06» (дисперсионное картирование ЭКГ). Анализ ВСР проводили в соответствии с рекомендациями группы Российских экспертов [Баевский и др., 2001]. Вычисляли частоту сердечных сокращений (ЧСС), стресс-индекс (SI), показатель активности регуляторных систем (ПАРС), а также основные показатели временного

(SDNN, RMSSD, pNN50) и спектрального (TP, HF, LF, VLF, ULF, HF, %, LF, %, VLF, %, LF/HF, IC) анализа ВСП. С помощью системы скрининга сердца «КардиоВизор-06» регистрировали индекс ДК ЭКГ «Миокард». Кроме того, рассчитывали индекс функциональных изменений (ИФИ) [Баевский, Берсенева, 2008].

Данные по температуре (T), давлению (P) и относительной влажности воздуха (RH) в Сыктывкаре в дни исследования взяты с сайта <http://meteo.infospace.ru>; значения индексов геомагнитной активности Kp и Ap — с сайта ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/geomagnetic_data/indices/kp_ap. Содержание кислорода в воздухе (PO_2) определяли по формуле Клайперона.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью программ Statistica 6.0 и «Биостат 4.03». Проводили проверку выборки на нормальность распределения вариантов. Результаты исследования в тексте и таблицах представлены в виде среднего значения показателя и стандартного отклонения ($M \pm SD$), в случае асимметричного распределения вместо них использованы медиана (Me) и 25-й и 75-й перцентили. Статистическую значимость различий между изучаемыми выборками по анализируемым показателям оценивали с помощью критерия Вилкоксона. Для выявления взаимосвязей между изучаемыми показателями вычисляли коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Различия и коэффициенты корреляции считали значимыми при $p < 0,05$.

Влияние атмосферных и геомагнитных факторов на вегетативную регуляцию кровообращения и состояние миокарда у мужчин Европейского Севера России при длительном мониторинге

У трёх добровольцев не выявлено значимой корреляционной связи между физиологическими показателями и индексами геомагнитной активности, а также метеорологическими параметрами.

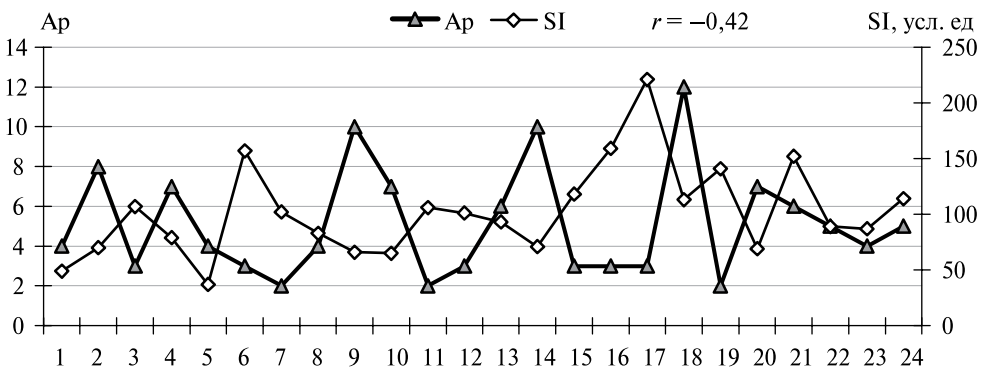


Рис. 1. Динамика SI и Ap у добровольца № 4

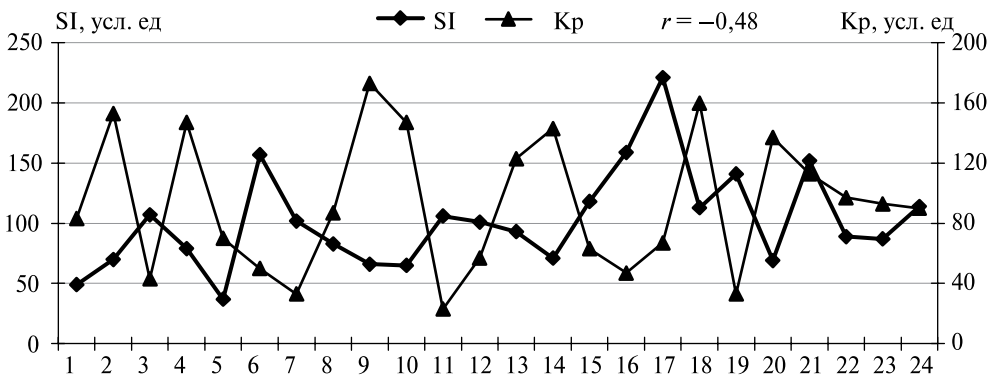


Рис. 2. Динамика SI и Kp у добровольца № 4

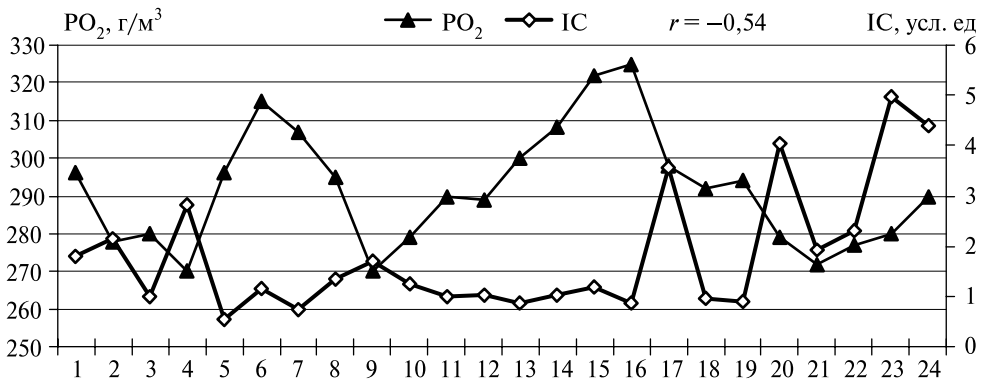


Рис. 3. Динамика IC и PO₂ у добровольца № 6

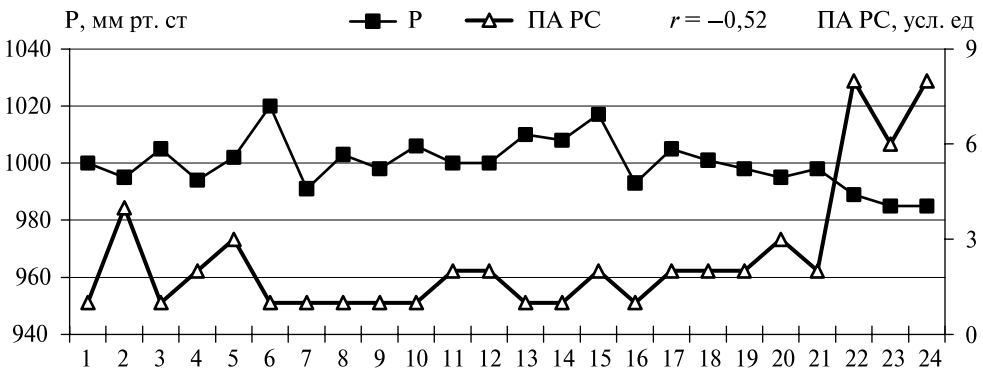


Рис. 4. Динамика ПАРС и P у добровольца № 6

У испытуемого № 4 выявлена связь SI с Kp и Ap ($r=-0,48$, $p=0,02$ и $r=-0,42$, $p=0,04$, соответственно) (рис. 1, 2) и ПАРС с RH ($r=-0,49$, $p=0,02$), PO₂ ($r=-0,47$, $p=0,02$), T ($r=0,50$, $p=0,01$). У волонтера № 5 отмечена связь ИФИ с T ($r=0,42$, $p=0,04$) и PO₂ ($r=-0,44$, $p=0,03$). У добровольца № 6 установлена связь IC с T ($r=0,46$, $p=0,02$) и PO₂ ($r=-0,54$,

$p=0,01$) (рис. 3), а также SI и ПАРС с P ($r=-0,53, p=0,01$ и $r=-0,52, p=0,01$) (рис. 4). У обследуемого № 7 показана обратная связь индекса «Миокард» с P ($r=-0,45, p=0,03$). У волонтера № 8 показана связь SI с индексами геомагнитной активности Кр и Ар ($r=-0,52, p=0,01$ и $r=-0,52, p=0,01$, соответственно), а также индекса «Миокард» с P ($r=0,46, p=0,02$).

Таким образом, количество статистически значимых корреляционных связей атмосферных и геомагнитных факторов с показателями вегетативной регуляции кровообращения, индексом ДК ЭКГ «Миокард» и ИФИ у обследованных лиц различалось. Показано, что наиболее чувствительными к метеорологическим и космическим параметрам оказались SI (5 связей) и ПАРС (4 связи), тогда как индекс ДК ЭКГ «Миокард», IC и ИФИ имели по 2 значимые связи.

Вегетативная регуляция кровообращения и состояние миокарда у мужчин Сыктывкара при разной активности геомагнитного поля

Во время возмущения магнитного поля выявлено, наряду с закономерным ростом показателей геомагнитной активности Кр и Ар ($p<0,05$), увеличение P ($p<0,05$). Метеорологические показатели Rh, T, PO_2 при разной активности геомагнитного поля находились на одном уровне (табл. 1).

Таблица 1. Метеорологические и геомагнитные показатели в Сыктывкаре при разной активности геомагнитного поля ($M\pm SD$)

Показатели	Спокойное состояние геомагнитного поля	Возмущённое состояние геомагнитного поля	p
P	995,88±4,81	1003,3	$p<0,05$
Rh, %	76,74±2,88	76,1	$p>0,05$
T, °C	-23,76±4,78	-23,1	$p>0,05$
PO_2 , г/м ³	323,25±6,30	325	$p>0,05$
Кр-индекс	87,50±40,33	267	$p<0,05$
Ар-индекс	4,38±1,77	21	$p<0,05$

Индекс функциональных изменений, являющийся показателем адаптационного потенциала основных жизненно важных систем организма [Баевский, Берсенева, 2008] как при спокойном, так и при возмущённом состоянии геомагнитного поля, находился на одном уровне ($2,32\pm0,20$ и $2,40\pm0,30$ усл.ед., соответственно): функционирование основных систем находится в пределах нормы (ИФИ $< 2,59$ усл.ед.).

Индекс ДК ЭКГ «Миокард», количественно оценивающий состояние миокарда [Иванов, Сула, 2008; Рябыкина, Вишнякова, 2008], значимо не различался у сравниваемых групп ($12,88\pm3,68$ и $13,31\pm4,65$ %).

У мужчин — жителей Сыктывкара не выявлено значимых различий по большинству показателей ВСР при разной активности геомагнитного поля (табл. 2). Отмечено лишь, что абсолютные значения ULF-волн значимо выше ($p<0,05$) при возмущённом состоянии геомагнитного поля, что, возможно, свидетельствует о включении в управление сердечным ритмом

нейрогуморального и метаболического уровней регуляции. Таким образом, во время возмущённого состояния геомагнитного поля у мужчин-северян баланс симпатическая-парасимпатическая нервная система не изменяется, однако увеличивается роль в регуляции кровообращения нейрогуморального и метаболического уровней регуляции.

Таблица 2. Показатели variability сердечного ритма у мужчин-северян при разной активности геомагнитного поля (Me, 25-й и 75-й перцентили)

Показатели	Спокойное состояние магнитного поля	Возмущённое состояние магнитного поля	<i>P</i>
ЧСС, уд/мин	70,00 63,50...76,25	72,00 65,25±75,75	<i>p</i> > 0,05
RMSSD, мс	38,00 32,00...38,75	32,50 27,75±40,50	<i>p</i> > 0,05
pNN50, %	16,15 10,90...18,43	8,90 5,75±18,33	<i>p</i> > 0,05
SDNN, мс	46,78 39,82...60,01	50,79 37,01±57,71	<i>p</i> > 0,05
SI, усл. ед.	88,50 70,75...112,25	85,50 50,50±140,25	<i>p</i> > 0,05
TP, мс ²	1629,0 1252,5...3425,2	2317,7 1255,0±2883,3	<i>p</i> > 0,05
HF, мс ²	468,2 374,6...617,5	387,3 327,4±639,3	<i>p</i> > 0,05
LF, мс ²	626,2 319,1...1689,5	617,0 399,6±814,8	<i>p</i> > 0,05
VLF, мс ²	249,4 181,9...552,5	243,6 191,8±439,1	<i>p</i> > 0,05
ULF, мс ²	213,5 123,8...334,4	517,4 438,7±755,4	<i>p</i> < 0,05
HF, %	29,55 26,30...39,95	32,50 22,20±41,98	<i>p</i> > 0,05
LF, %	49,90 27,25...51,58	43,60 32,18±56,80	<i>p</i> > 0,05
VLF, %	20,50 12,90...27,90	20,50 17,43±30,88	<i>p</i> > 0,05
LF/HF, усл. ед.	1,66 0,79...2,16	1,36 0,92±2,24	<i>p</i> > 0,05
IC, усл. ед.	2,39 1,58...2,80	2,08 1,40±3,51	<i>p</i> > 0,05
ПАРС, баллы	3,00 2,75...4,25	3,00 1,75±4,50	<i>p</i> > 0,05

На основании анализа значений ПАРС во время возмущённого и спокойного состояния геомагнитного поля у мужчин-добровольцев выявлены функциональные состояния: норма (по 5 человек), донозологическое и преморбидное состояния (по 1 и 2 человека, соответственно).

Таким образом, возмущённое состояние геомагнитного поля не оказало существенного влияния на функциональное состояние организма практически здоровых мужчин-северян.

Работа выполнена при поддержке гранта УрО РАН для молодых учёных и аспирантов (2011).

ЛИТЕРАТУРА

- [Баевский, Берсенева, 2008] *Баевский Р. М., Берсенева А. П.* Введение в донозологическую диагностику. М.: Слово, 2008. 220 с.
- [Баевский и др., 2001] *Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В.* и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестн. аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.
- [Иванов, Сула, 2008] *Иванов Г. Г., Сула А. С.* Метод дисперсионного картирования ЭКГ в клинической практике. М., 2008. 42 с.
- [Рябыкина, Вишнякова, 2008] *Рябыкина Г. В., Вишнякова Н. А.* Оценка эффективности метода дисперсионного картирования для контроля проводимой терапии // Альманах клинич. медицины. 2008. № 19. С. 18–26.

VEGETATIVE REGULATION OF BLOOD CIRCULATION AND MYOCARDIUM CONDITION IN MALE RESIDENTS OF RUSSIAN EUROPEAN NORTH AT LONG MONITORING AND DIFFERENT ACTIVITY OF A GEOMAGNETIC FIELD

A. L. Markov

Institute of Physiology at Komi Science Centre of the Ural Division
of Russian Academy of Science, Syktyvkar, Russia, e-mail: volkarb@mail.ru

Eight healthy men living in the city of Syktyvkar were studied. It was shown that stress index and index of activity of the regulatory systems were more responsive to meteorological and geomagnetic factors. The indignant condition of a geomagnetic field (February 18, 2011) didn't influence a functional condition of organism significantly in all male northerners participating in the study.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 18.03.2013

Заказ 3210

Формат 70×100¹/₁₆

Тираж 200

37,05 усл.-печ. л.