

ПРОГНОЗ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ГРАНИЦЫ РЕАЛИЗАЦИИ (ОПЫТ ТРЁХ ЦИКЛОВ)

© 2017 г. В. Н. Ишков

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва
ishkov@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 26.03.2017 г.

Все значимые краткосрочные возмущения околоземного космического пространства вызваны исключительно солнечными вспышечными событиями и областями в короне Солнца с открытым в межпланетное пространство магнитным полем (корональные дыры). Вспышечные процессы возникают как следствие взаимодействия новых всплывающих магнитных потоков в пределах активных областей (вспышки) и вне их (выбросы волокон), с уже существующими магнитными полями. Наблюдение за всплыванием новых магнитных потоков, оценка их величины и темпа всплывания позволяет прогнозировать солнечные вспышки и выбросы волокон и оценивать степень их геоэффективности. Основными агентами, визуализирующими распространение возмущения от солнечных вспышек и волокон в короне Солнца и в межпланетном пространстве, являются корональные выбросы вещества, характеристики которых в идеале позволяют оценить возможное возмущение геомагнитного поля, возможный рост потоков заряженных частиц больших энергий в ОКП. Для успешного прогноза геоэффективных активных явлений на Солнце и их последствий в ОКП необходимо знать обстановку на Солнце за последние 3 суток, учитывая момент развития и характеристики текущего цикла и эпоху солнечной активности.

DOI: 10.7868/S0023420617060012

1. ВВЕДЕНИЕ

Начало космической эры стало новым шагом в деле исследований Земли в широком смысле, от ее глубин до границ с гелиосферой, как наземными приборами, так и установленными на борту космических аппаратов. Все возрастающие темпы освоения космоса поставили в повестку дня задачу оценки и прогноза солнечной активности (СА) во всех её проявлениях, также как и состояния космической среды, как вблизи Земли, так и в любой заданной области гелиосферы.

В данной работе околоземное космическое пространство (ОКП) понимается как область, начинающаяся с высот 50–60 км от Земли и простирающаяся на расстояние в десятки земных радиусов до границ с гелиосферой, в которой вещество ее заполняющее, все еще больше связано с нашей планетой, а не с Солнцем или каким-либо другим астрономическим телом. Понятно, что в этой области мы имеем дело главным образом с естественной плазмой.

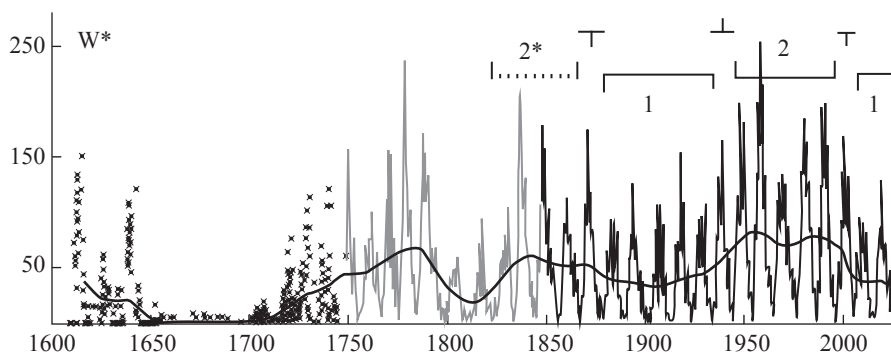
Под термином “КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА” в настоящее время понимается состояние верхних слоев земной атмосферы (мезосферы,

термосферы), магнитосферы, ионосферы, — всех слоев ОКП в любой заданный отрезок времени.

В настоящее время пришло полное понимание того, что основное воздействие на ОКП оказывает само Солнце и активные явления в его атмосфере.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗА СА

Солнечной активностью принято называть всю совокупность наблюдаемых явлений в атмосфере Солнца, вызывающих изменения его излучения в различных диапазонах электромагнитных волн и потоках частиц различных энергий. Эти изменения в оптическом диапазоне проявляются в изменении количества различных солнечных структур и почти не заметны в диапазоне оптического излучения, изменение солнечной постоянной $\leq 0.1\%$. Однако в мягком рентгеновском излучении эти изменения проявляются и в количестве структур, и в излучении: разница уровня “фонового” излучения в диапазоне 1–8 Å (1–12.5 кэВ) в максимуме и в минимуме СА превышает 2 порядка (больше чем в 100 раз). Состояние СА характеризуется наблюдательными индексами, наиболее длительный



Полный ряд наблюдений относительных чисел солнечных пятен. Чёрной сплошной линией представлен достоверный ряд (W1) с границами структурных эпох “пониженной” (1) и “повышенной” (2) СА с переходными циклами между ними; 2* — вероятный период “повышенной” солнечной активности, включающий солнечные циклы 10–6; последний справа — вероятный ход развития следующего 25 СЦ. Серая сплошная линия — восстановленный до 1749 г. (W2) ряд чисел Вольфа. Крестики — мало достоверный ряд, восстановленный по отдельным литературным источникам и архивным материалам. Преобразованный рисунок (<http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot>).

ряд имеет относительное число солнечных пятен (W). Этот индекс впервые введен Р. Вольфом и определяется с 1849 г. (достоверный ряд W1), когда регулярные наблюдения солнечных пятен стали вести несколько обсерваторий в Европе. Кроме того, Вольф восстановил среднемесячные значения данного индекса до 1749 г. (пронумерованный ряд W2) и среднегодовые до 1700 г., по отрывочным данным отдельных европейских наблюдателей. Современные исследователи по литературным данным качественно продлили этот ряд до 1610 г. (рисунок).

2.1. Сценарий цикличности СА. Практически все исследователи использовали в своих работах ряд W2, а многие и весь известный, не учитывая их достоверности. Поэтому в [1] было проведено сравнение рядов W1 и W2 и проверена их согласованность. Обоснованность этого подчеркнула спектральная оценка столетних интервалов (1749–1849), (1799–1899), (1849–1949) и (1899–1999), показавшая качественную близость спектральных гармоник трех последних интервалов и их значимые отличия на первом интервале, который явно отличается положением и значением основной гармоники и её спектральной шириной. Кроме того, из сравнения рядов вытекает отличный характер поведения основных характеристик ряда на интервале 1749–1849 годов, причем увеличение длины этого ряда ведет к ухудшению разрешения некоторых важных спектральных характеристик (обычно наоборот) и существенное искажение “высокочастотной” части спектра восстановленного ряда. Всё это ставит вопрос о корректности использования восстановленной части ряда в большинстве приложений. Другими словами для исследования влияния СА на различные долговременные процессы можно пользоваться лишь

достоверным рядом чисел Вольфа (1849–2016 г.) с середины 9 и по 24 цикл СА. В то же время, как показано в работе [2], в статистику достоверных солнечных циклов (СЦ) можно условно включить СЦ 8 и 9, примыкающих к достоверным и не противоречащим характеристикам СЦ достоверного ряда, увеличив тем самым статистику до 17 циклов СА.

Достоверный ряд чисел Вольфа показывает удивительное постоянство в основных проявлениях развития отдельных 11- и 22-летних СЦ и структура его цикличности подразумевает периодическую смену эпох “повышенной” (СЦ 6, 7, 8–10; 18–22) и “пониженной” (СЦ 12–16; 24 – и 4 последующих) СА, каждая по пять циклов [3]. Принципиальные различия характеристик и основных свойств СЦ различных эпох СА определяются разным диапазоном изменений величин средних значений общего магнитного поля Солнца, что проявляется в характере пятнообразовательной деятельности, а отсюда, и в активных явлениях на Солнце, и в характеристиках межпланетного магнитного поля. Между этими эпохами наблюдаются переходные периоды (СЦ 11, 23 и 17), во время которых примерно за 15 лет меняется характер пятнообразовательной активности, т.е. режимов генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца, что и приводит к изменениям в общем магнитном поле Солнца. В сводной табл. 1 приводятся основные числовые параметры достоверных СЦ соответствующих эпох и переходных периодов. Надо отметить, что внутри эпох СА выполняются все наблюдательные правила развития СЦ, как, например, правило Гневышева-Оля, по которому каждый четный цикл ниже последующего нечетного. В переходные периоды эти правила могут нарушаться, что и случилось в СЦ 22 и 23, которые были достаточно необычными по

Таблица 1. Солнечные циклы достоверных “повышенной” и “пониженной” эпох и периодов перестройки солнечной активности.

N	T ₀	W* _m	T _M	T _c	W* _M	T _Y ↑	T _Y ↓	T _Y	T1 _m	T2 _m	Sp _{less}
1.1. Солнечные циклы достоверной эпохи “повышенной” солнечной активности											
18	1944.II	7.7	1947.V	1954.III	151.8	3.2	7.0	10.2	33 ^m	33 ^m	444
19	1954.IV	3.4	1958.III	1964.IX	201.3	3.9	6.5	10.4	33 ^m	38 ^m	221
20	1964.X	9.6	1968.XI	1976.VI	110.6	4.1	7.8	11.8	38 ^m	69 ^m	269
21	1976.VI	12.2	1979.XII	1986.VIII	164.5	3.5	6.8	10.2	69 ^m	33 ^m	273
22	1986.IX	12.3	1989.VII	1996.V	158.1	2.9	6.7	9.6	33 ^m	40 ^m	308
Σ		9.2			157.26	3.52	6.96	10.44	41.2 ^m		302
1.2. Солнечные циклы достоверной эпохи “пониженной” солнечной активности											
12	1878.XII	2.2	1883.XII	1890.II	74.6	5.0	6.3	11.3	65 ^m	59 ^m	732
13	1890.III	5.0	1894.I	1901.II	87.9	4.5	8.2	12.1	59 ^m	77 ^m	937
14	1902.I	2.6	1906.II	1913.VII	64.2	4.1	7.6	11.7	77 ^m	59 ^m	1045
15	1913.VIII	1.5	1917.VIII	1923.VII	105.4	4.0	6.1	10.1	59 ^m	48 ^m	526
16	1923.VIII	5.6	1928.IV	1933.VIII	78.1	4.7	5.6	10.3	48 ^m	54 ^m	666
Σ		3.4			82.44	4.5	6.5	10.9	61 ^m		781
24	2009.I	1.7	2014.IV	2020.V–IX	81.9	5.25	5.9	12	68 ^m	59 ^m	
1.3. Солнечные циклы достоверных периодов перестройки солнечной активности											
10	1855.XII	3.2	1860.II	1867.II	97.9	4.17	7.25	11.42	38 ^m	34 ^m	402
11	1867.III	5.2	1870.VIII	1878.XI	140.5	3.42	8.50	11.92	34^m	65^m	1025
16	1923.VIII	5.6	1928.IV	1933.VIII	78.1	4.7	5.6	10.3	48 ^m	54 ^m	666
17	1933.IX	3.4	1937.IV	1944.I	119.2	3.6	6.9	10.5	54^m	33^m	262
22	1986.IX	12.3	1989.VII	1996.V	158.1	2.9	6.7	9.6	33 ^m	40 ^m	308
23	1996.VI	8.0	2000.IV	2008.XII	120.7	3.8	8.9	12.7	40^m	68^m	821

T₀ – начало СЦ; W*_m – начальное значение сглаженных чисел Вольфа; T_M – время максимума СЦ; W*_M – максимальное значение сглаженных чисел Вольфа; T_Y↑ – длительность ветви роста в годах; T_Y↓ – длительность ветви спада в годах; T_Y – длительность СЦ в годах; T1_m, T2_m – длина фазы минимума перед и после данного СЦ в месяцах; Sp_{less} – количество беспятенных дней в соответствующих фазах минимумов; Σ – средние величины по эпохам. Полу жирным шрифтом выделены опорные солнечные циклы переходных периодов.

своим характеристикам и, в какой-то степени, нарушали сложившуюся картину развития СЦ [4]. Эти особенности вполне объясняются переходным периодом от эпохи “повышенной” к эпохе “пониженной” СА [3]. Текущий 24 СЦ развивается как цикл низкой величины, вспышечная активность которого существенно ниже всех предыдущих СЦ космической эры, и открывает вторую эпоху “пониженной” СА. Исходя из наблюдательных характеристик данной эпохи (табл. 1) и устойчивости сценария солнечной цикличности, можно с большой долей уверенности дать прогноз, что последующие 4 СЦ будут циклами средней и низкой величины.

2.2. Геоэффективные солнечные явления: солнечные вспышечные события. Солнечные исследования последних десятилетий не оставили сомнения, что геоэффективными явлениями на Солнце,

полностью определяющими состояние ОКП, являются исключительно большие вспышечные события и корональные дыры (КД). К классу вспышечных явлений мы относим:

- солнечные вспышки со всем спектром динамических проявлений движения вещества и излучения во всех диапазонах электромагнитного спектра,
- выбросы солнечных волокон со всеми сопутствующими им явлениями.

Солнечные вспышки происходят в активных областях (АО) с группами солнечных пятен и без них и представляют собой реакцию солнечной атмосферы на быстрый процесс выделения энергии, который приводит к резкому локальному нагреву всех слоев солнечной атмосферы, появлению разного вида динамических явлений, сопровождающемуся

генерацией мощного электромагнитного излучения в широком диапазоне частот от γ -квантов до километровых радиоволн и потоками частиц электронов, протонов, нейтронов и тяжелых ядер.

Солнечные волокна представляют собой облака плотной и более холодной, чем окружающая среда, плазмы, которые в магнитном поле солнечной атмосферы приобретают вид протяженных образований, вытянутых вдоль линии раздела полярностей. Основная доля волокон или каналов волокон (начальная и, возможно, конечная стадии эволюции волокон) выделяют нейтральную линию по всей поверхности Солнца. Так как АО всегда являются биполярными структурами, они либо образуются в районах по обе стороны от нейтральной линии, либо их образование влечёт за собой перестройку крупномасштабного магнитного поля, и линия раздела полярностей всё равно оказывается внутри АО. Соответственно и волокна практически всегда присутствуют во всех АО, когда непосредственно в виде волокна, когда в виде канала волокна в зависимости от сложности и величины магнитного поля АО. Выбросы солнечных волокон в огромном большинстве случаев происходят вне АО в малых магнитных полях (< 50 Гс) и при наблюдениях с хорошим разрешением, начинаясь с ускоряющегося подъёма всего тела волокна или его части, быстро формируют две эмиссионные ленты пониженной яркости, вытягивающиеся вдоль линии раздела полярностей, ранее обозначенной волокном, на которых через десятки минут становятся видны вспышечные арочные структуры – типичная картина двухленточной вспышки. Т.е. выбросы волокон вне АО можно представить как вспышки с медленным ростом интенсивности к максимуму (> 1 часа) и значительным временем спада интенсивности (> 3 часов). В АО большие вспышки очень часто сопровождаются выбросами волокон, которые либо предшествуют самой вспышке (достаточно редко), либо, если есть полный ряд наблюдений вспышечного процесса, волокно выбрасывается в процессе взрывной фазы вспышки.

Как показано в [5] вспышечные явления являются следствием взаимодействия новых всплывающих магнитных потоков (ВМП) с уже существующими магнитными полями, как в АО, так и вне их. Наиболее успешная попытка классифицировать явление ВМП по отношению к вспышечной активности впервые сделана в работах Головки [6, 7]. В зависимости от величины и времени существования магнитного потока было выявлено три эволюционные ветви популяции ВМП на Солнце и среди них, что весьма существенно, выделены ВМП с быстрой эволюцией. Эти работы позволяют рассматривать процесс осуществления больших

солнечных вспышек как самостоятельный процесс внутри общего развития АО, который производит ВМП с быстрой эволюцией. Ограниченный по времени, такой процесс всплывания нового магнитного потока может ускорить эволюцию АО, но, в общем случае, такое влияние можно считать несущественным, т.к. АО продолжает существовать за счёт внутренних эволюционных изменений, связанных с родительским магнитным потоком. В общем случае, само явление АО следует рассматривать как появление и развитие одного или нескольких близких ВМП ($\sim 10^{13}$ Вб), одновременно или последовательно всплывающих в атмосферу Солнца с малым (эволюционным) темпом всплывания ($1.7 \cdot 10^{12}$ Вб/сут) по оценке [7], проходящего развитие от появления первых признаков флоккула через стадию образования, развития и распада группы пятен до полного исчезновения флоккула. На всех фазах развития АО могут происходить всплывания новых магнитных потоков, магнитное поле которых, взаимодействуя с магнитным полем АО, всегда вызывает повышение вспышечной активности, пропорциональное тому количеству энергии, которое поступило с новым ВМП. Такой взгляд открывает новое направление в подходах к прогнозированию больших солнечных вспышек [5].

Из наблюдений за ВМП можно суммировать признаки, после которых наступает рост вспышечной активности:

- для осуществления больших солнечных вспышек необходимо, чтобы новый ВМП был достаточно большим ($> 10^{13}$ Вб) и скорость его всплывания была не менее $5 \cdot 10^{12}$ Вб/сут;

- большие солнечные вспышки появляются через 1 – 2 сут после обнаружения ВМП в пределах АО, что справедливо для эпохи “повышенной” СА и переходного периода (СЦ 23), когда и были проведены эти исследования, однако в 24 СЦ, в эпоху “пониженной” СА, этот интервал времени составил всего 1 ± 0.5 сут [3];

- вспышки больших и средних баллов в АО группируются в серии, кортежи [8, 5], которые происходят в ограниченном временном интервале и, что важно, генетически связаны с одним ВМП.

Интервал времени, за который в АО осуществляется основная доля вспышек больших и средних баллов, составляет период вспышечного энергосвечения. В зависимости от степени развития АО, характеристик ее магнитного поля, величины, структуры и скорости всплывания нового ВМП данный период может занимать в среднем 55 ± 30 часов или 16% времени прохождения АО по видимому диску Солнца [5]. Быстрый рост площади группы пятен, их числа, быстрое усложнение магнитной

и пространственной структуры АО, значимый рост фоновых значений потоков мягкого рентгеновского излучения и радиопотока – основные признаки всплывания нового ВМП. Эти признаки позволяют осуществлять прогноз периода всплывающего энерговыделения за сутки – двое до реализации больших солнечных вспышек.

2.3. Геоэффективные солнечные явления: корональные дыры. Корональные дыры представляют собой протяженные области в короне Солнца с пониженной плотностью и температурой, характеризующиеся дефицитом излучения в некоторых спектральных линиях крайнего УФ, рентгеновском и микроволновом диапазонах с открытым в межпланетное пространство магнитным полем. Большая КД обычно существует 3 – 8 солнечных оборота, практически не меняя своего положения. Однако видимые границы ее могут сдвигаться до 20° /сут, изменяя ее размеры или сдвигая ее как целое [9]. Геоэффективными являются КД в интервале гелиоширот $N30^\circ - S30^\circ$, протяженностью $\geq 10^\circ$ по гелиошироте, площадью ≥ 5000 тысячных долей видимой полусферы [10], и локализующиеся в усиленных фоновых магнитных полях. Солнечная плазма КД не удерживается магнитными силами и беспрепятственно выходит в межпланетное пространство, создавая высокоскоростные потоки солнечного ветра с типичными скоростями 500–700 км/с с повышенными величинами межпланетного магнитного поля, плотностью и температурой. При прохождении через такой высокоскоростной поток магнитосфера Земли взаимодействует с ним, откликаясь геомагнитным возмущением. КД наиболее долгоживущие геоэффективные явления на Солнце являются источниками рекуррентных магнитных бурь. Особо следует отметить роль КД как усилителей геоэффективности солнечных вспышечных явлений. Присутствие корональной дыры вблизи АО или месту выброса солнечного волокна резко повышает их геоэффективность и расширяет диапазон их локализации. Пример – событие 14.IV.1994 г., когда выброс высокоширотного ($S50^\circ$) волокна, расположенного под большой корональной дырой, привел к полной перестройке магнитных структур южного полушария Солнца и к большой магнитной буре 17.IV.1994 г. [11].

3. ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОКП (КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА)

Электромагнитные воздействия от вспышечных событий проявляются практически в момент развития процесса, а корпускулярные и плазменные возмущения через солнечный ветер, распро-

страняясь в гелиосфере, воздействуют на магнитосферы планет, их спутников и комет, вызывая значительные отклонения от фонового, спокойного состояния практически всех слоев их атмосфер.

Агентами, передающими эти возмущения от Солнца через гелиосферу и непосредственно воздействующими на ОКП, являются:

– корональные выбросы вещества, являющиеся следствием активных взрывных и эволюционных процессов во вспышках и выбросах волокон; наблюдения и характеристики корональных выбросов вещества дают возможность определить направление движения возмущения в межпланетном пространстве и оценить возможность его прихода в ОКП;

– высокоскоростные потоки солнечной плазмы, следующие за ударной волной от больших вспышечных событий или истекающих из областей с открытой конфигурацией магнитного поля – КД.

Возмущения от большого вспышечного события можно представить в виде трех этапов воздействия [<http://swpc.noaa.gov/NOAAscales>], которые последовательно реализуются в ОКП. Сначала, в момент развития геоэффективной солнечной вспышки, ОКП облучается потоком электромагнитного излучения (R – электромагнитный удар). Затем, через временной промежуток от нескольких минут до 10 часов в зависимости от энергии, в ОКП приходят потоки солнечных заряженных частиц (S – корпускулярный удар – солнечное протонное событие) и, наконец, через 17–96 часов в ОКП приходят потоки плазмы повышенной скорости, плотности и температуры (G – плазменный удар), вызывая возмущения в геомагнитном поле – магнитные бури. Заметим, что выбросы солнечных волокон и КД вызывают в ОКП только магнитные возмущения. Полную цепочку возмущений от отдельного большого вспышечного события представляет табл. 2 в виде трех отдельных этапов воздействия [<http://swpc.noaa.gov/NOAAscales>]. Так как эта шкала воздействий составлена по событиям эпохи “повышенной” СА, в неё добавлены наблюдаемые оценки для переходного периода (23 СЦ), и для СЦ 24 как цикла начала эпохи “пониженной” СА, с предварительными результатами исследования геомагнитных возмущений первой эпохи “пониженной” СА (СЦ 12 – 16) по данным геомагнитного Аа-индекса и наблюдений прихода межпланетных ударных волн по регистрации внезапных импульсов геомагнитного поля (SI) и внезапных начал магнитных бурь (SSC) по наблюдениям уже работавшей в то время сети геомагнитных станций [12].

Таблица 2. Шкала возмущений ОКП (Космической погоды) для эпох “повышенной”, “пониженной” СА и переходных периодов (на основе <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAAscales.pdf>)

Воздействие на ОКП			Эпоха “повышенной” СА	Переходный период (по 23 СЦ)	Эпоха “пониженной” СА (по 24 СЦ)
Балл	Возмущение	Величина	Частота в СЦ	Частота в СЦ	Частота в СЦ
R: Электромагнитный удар: максимальный рентгеновский балл вспышки (Вт/м²)					
R5	экстремальное	X20 ($2 \cdot 10^{-3}$)	< 1	2	0.01
R4	очень большое	X10 (10^{-3})	8	4	0.1
R3	большое	X1 (10^{-4})	175	115	~60
R2	умеренное	M5 ($5 \cdot 10^{-5}$)	350	272	~100
R1	малое	M1 (10^{-5})	2000	1295	~700
S: Корпускулярный удар: поток протонов с $E \geq 10$ МэВ и $J_p \geq 1$ см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹					
S5	экстремальное	10^5		Пока не наблюдалось	
S4	очень большое	10^4	1/эпоху	3	0.1
S3	большое	10^3	3–10	11	5
S2	умеренное	10^2	25	37	7
S1	малое	10^1	50	38	31
S0	малое	10^0	~50	59	49
G: Плазменный удар (геомагнитные возмущения): трехчасовой Kp-индекс					
G5	экстремальное	$K_p = 9$	4	20	~2/эпоху
G4	очень большое	$K_p = 8-(9-)$	100	25	3
G3	большое	$K_p = 7$	200	90	14
G2	умеренное	$K_p = 6$	600	344	116
G1	малое	$K_p = 5$	1700	1327	536

В настоящее время задача отражения ситуации в ОКП и оценки ее состояния решается службами “КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ”, которые созданы при ведущих институтах и организациях во всем мире (более 40 адресов), основными из которых являются: в США (NOAA SWPC – <http://www.swpc.noaa.gov>), в Европе (ESA – http://www.esa-spaceweather.net/spweather/current_sw/index.html), МЦД по индексам СА в Брюсселе – <http://sidc.oma.be/html/LatestSWData.html#SUN>), в Японии (<http://hiraiso.nict.go.jp>), в Австралии (<http://www.ips.gov.au/>); в России: ИЗМИРАН (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>), ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/sw.htm>), ИПГ (<http://ipg.geospace.ru/center-of-geliogeophysics/>). Их задача – давать в реальном времени основные характеристики явлений, определяющих состояние ОКП и индексы, характеризующие состояние магнитосферы, ионосферы и других слоев земной атмосферы. Наиболее информативные страницы данных о состоянии космической погоды предоставляет нам Служба Солнца Сервисного центра лаборатории состояния ОКП Национальной лаборатории по исследованию окружающей среды (SWPC NOAA USA) – <http://www.swpc.noaa.gov>.

4. ПРОГНОЗ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ И СОСТОЯНИЯ ОКП

Под прогнозом геоэффективных солнечных явлений здесь понимается совокупность всех видов прогнозов, в задачу которых входит расчет развития процессов и явлений, происходящих в солнечной атмосфере и непосредственно влияющих на магнитную и радиационную обстановку в ОКП на заданные интервалы времени с учетом характеристик текущей эпохи СА. Интервалы времени, на который возможен прогноз, определяются характеристиками физических процессов всплывания новых магнитных потоков в атмосфере Солнца, характера их взаимодействия с уже существующим магнитным полем, а также закономерностями появления и эволюции солнечных структур, таких как солнечные вспышечные события и КД.

Понимание наблюдательных принципов реализации сценария солнечной цикличности и взаимодействия новых ВМП с уже существующими магнитными полями привело в 1990 г. к созданию в ИЗМИРАН методики краткосрочных прогнозов солнечных активных явлений и их последствий во всех трёх классах возмущений в ОКП [13]. Ежедневный обзор состояния СА и ОКП публикуется по понедельникам на страницах ИЗМИРАН: русский вариант <http://www.izmiran.ru/services/saf/>,

и английский <http://www.izmiran.ru/services/saf/?LANG=en>. Каждый первый понедельник месяца дополнительно дается обзор развития текущего СЦ и предварительные величины основных индексов солнечной и геомагнитной активности.

По времени прихода возмущений к Земле можно утверждать, что наиболее информативным может быть ежедневный прогноз состояния ОКП, но в реальной жизни такую скважность прогноза могут обеспечить только специализированные прогностические группы. Для научного обеспечения данными прогноза можно согласиться с 3-дневным интервалом, который обеспечивает полную информацию о рекуррентных возмущениях, но уже появляется “мёртвая зона” для спорадических возмущений. В нашем прогнозе был выбран недельный интервал составления прогноза с дополнительными выпусками при появлении признаков или реализации геоэффективного вспышечного события, что хорошо работает на фазах роста, спада и минимума СЦ, однако, в условиях вспышечной активности нескольких АО одновременно возникают достаточно серьезные трудности. Поэтому при необходимости поддержки какого-либо проекта и при быстрой изменчивости состояния ОКП потребителю предоставляется ежедневный прогноз. При составлении прогноза:

- учитываются все значимые АО и, в случае появления первых признаков новых ВМП, проводится оценка скорости всплытия и, по мере развития, их величины;

- регистрируются все значимые, возможно геоэффективные, солнечные вспышки;

- выявляются солнечные волокна, в которых наблюдаются признаки нестабильности;

- анализируются характеристики всех корональных выбросов вещества, связанных с наблюдаемыми вспышечными событиями;

- оцениваются все КД в зоне влияния на Землю с точки зрения их геоэффективности.

Структура обзора все это время остается неизменной и включает в себя заголовок и несколько разделов, причем первый абзац раздела представляет собой собственно обзор, а второй, прогноз на следующую неделю:

- **заголовок**, в котором указываются временные периоды обзора и прогноза, номер и начало кэррингтоновского оборота Солнца, дающего возможность определять абсолютные долготы солнечных структур, положение Земли относительно эклиптики и гелиоширотная зона геоэффективности активных явлений для данного периода;

- раздел состояния **пятнообразовательной активности** Солнца с 4-х уровневой оценкой пятнообразовательной активности (очень низкий –

$W \leq 11$; низкий – $W \leq 30$; средний – $W \leq 80$; высокий – $W > 81$), с расчетным средним значением относительного числа солнечных пятен за прошедшую неделю и количестве групп солнечных пятен на видимом диске Солнца; для всех больших или вспышечно-активных групп пятен даётся их эволюционные и вспышечные характеристики; в следующем абзаце дается прогноз пятнообразовательной активности на следующую неделю;

- раздел состояния **вспышечной активности** дает её уровень (очень низкий – вспышки рентгеновского класса В; низкий – С; средний – М1 – М4.9; высокий – $M \geq 5$), количество выбросов солнечных волокон и количество корональных выбросов вещества (класс, угловая ширина); **таблица** основных характеристик **солнечных вспышек** рентгеновского балла $\geq M1$ и всех зарегистрированных **выбросов солнечных волокон** с указанием динамических явлений, связанных с ними, и даётся прогноз уровня вспышечной активности на следующую неделю;

- **таблица** наблюдаемых на видимом диске Солнца **КД** с их координатами, площадью в Mm^2 , возрастом в оборотах Солнца и геоэффективностью на прошлом обороте;

- раздел информации о **секторных границах** межпланетного магнитного поля, знаке сектора и прогноз даты прохождения следующей секторной границы;

- **таблица** основных **ежедневных данных**: гелиогеофизические индексы (W , $F_{10.7}$, X_{bcg} , Sp , число вновь образованных групп пятен (N), знак сектора ММП, флюэнс релятивистских электронов с $E > 2$ МэВ по данным космической обсерватории *GOES*, предварительный среднесуточный Ар-индекс по данным Службы ОКП SWPC US, Dst-индекс и A_{ms} – среднесуточный А-индекс по данным обсерватории ИЗМИРАН;

- раздел данных о времени начала и продолжительности **потоков релятивистских электронов с $E > 2$ МэВ** на геостационарных орбитах высокого и экстремального уровней и прогноз на следующую неделю;

- уровень **геомагнитной активности** на каждый день и характеристики магнитных бурь, зарегистрированных за рассматриваемый период (интенсивность по шкале возмущений, A^* -индекс магнитной бури и её продолжительность) по данным ИЗМИРАН и центра Службы ОКП SWPC US в Болдере, и прогноз геомагнитных возмущений на следующую неделю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

27 лет публикаций прогноза солнечных активных явлений и состояния ОКП в ИЗМИРАН охватывают неполные три цикла и, как выяснилось

впоследствии, включают в себя переходной период (СЦ 22 – 23) между эпохами “повышенной” и “пониженной” СА и 24 СЦ – первый цикл 2-й эпохи “пониженной” СА. Время подтвердило, что принципы составления прогноза, учитывающие закономерности развития СЦ с учетом эпохи СА для пятнообразовательной активности, процессы взаимодействия магнитных потоков в АО и вне их для солнечных вспышечных событий и временного интервала прохождения КД геоэффективных гелиоширот для основной доли рекуррентных возмущений, с учётом характеристик межпланетного возмущения, дают достаточную информацию для построения предварительных прогнозов первого уровня. Они должны давать время начала воздействия на ОКП с точностью до 1 сут (для магнитных возмущений и возрастных потоков релятивистских электронов), интервалы входных данных для уточняющих прогностических моделей отдельных видов воздействий и реакции выбранных сред на данные возмущения (прогнозы 2-го уровня). Например, прогнозируемый интервал изменений числа Вольфа $\Delta W = 20$ в большинстве случаев достаточен для моделей ионосферы и моделей распространения радиоволн.

Особое значение имеет прогноз периода вспышечного энерговыделения АО, за который в данной АО реализуются практически все значимые вспышки большого и среднего баллов. В текущем СЦ этот период наступает через 1 ± 0.5 сут после обнаружения первых признаков появления нового ВМП в границах АО, что даёт возможность с высокой вероятностью (70 – 90%) дать первое предупреждение о начале периода осуществления больших вспышек. Следует подчеркнуть, что это прогноз не отдельной вспышки, а именно интервала времени в ~ 55 час, когда осуществится основная доля вспышек от энергии привнесённой в АО новым ВМП. Особо надо подчеркнуть, что наш метод не позволяет прогнозировать время и мощность отдельного вспышечного события в этой серии. Прогноз воздействия каждой из этой серии вспышек на ОКП оценивается по параметрам и динамическим явлениям отдельного вспышечного события. Ещё одно ограничение состоит в реальной трудности выделения нового значимого ВМП в сложных компактных АО с большими площадями и в АО вблизи лимбов Солнца. Вместе с тем этот метод успешно был опробован при полётах космических обсерваторий ГРАНАТ (защита научных приборов от больших потоков энергичных солнечных протонов), ГАММА (разворот к Солнцу при возможности осуществления мощных солнечных вспышек со значимым γ -излучением) и проекта КОРОНАС (для служебного наблюдения вспышечных событий).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ишков В.Н., Шибеев И.Г.* Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. Сер. физическая. 2006. Т. 70. № 10. С. 1439.
2. *Shibaev I., Ishkov V.* Investigation of the Statistical Characteristics of Wolf Numbers Reliable Series: Signs of Solar Cycles Likelihood // 7th Scientific Conf. “Space, Ecology, Safety” SES2011. 2012. Sofia, Bulgaria. P. 297.
3. *Ишков В.Н.* Периоды “пониженной” и “повышенной” солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Солнечная и солнечно-земная физика. 2013 / Ред. Ю.А. Наговицин. Санкт-Петербург; ВВМ. 2013. С. 111.
4. *Ишков В.Н.* Характеристики солнечной активности затяжной фазы минимума 23–24 солнечных циклов // Циклы активности на Солнце и на звёздах / Ред. В.Н. Обридко, Ю.А. Наговицин. Санкт-Петербург; ВВМ. 2009. С. 57.
5. *Ишков В.Н.* Всплывающие магнитные потоки – ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // Изв. РАН. Сер. физическая. 1998. Т. 62. С. 1835.
6. *Головки А.А.* Области нового магнитного потока с быстрой эволюцией. 1. Диаграмма “магнитный поток – время жизни” // Солнечные данные. 1986. № 5. С. 48.
7. *Головки А.А.* Соотношение между максимальным магнитным потоком и временем жизни активных областей // Астроном. журн. 1997. Т. 75. С. 618.
8. *Обашев С.О., Минасянц Г.С., Макаренко Н.К.* Структура временного ряда образованного вспышками в отдельных группах пятен // Солнечная активность. Ред. Т.Б. Омаров. Алма-Ата; Наука, 1973. С. 103.
9. *Choi Y., Moon Y.-J., Choi S. et al.* Statistical Analysis of the Relationships among Coronal Holes, Corotating Interaction Regions, and Geomagnetic Storms // Solar Physics. 2009. V. 254(2). P. 311. doi: 10.1007/s11207-008-9296-3
10. *Joselyn J.A.* SESC methods for short-term geomagnetic prediction // Solar Terrestrial Prediction Proceedings. 1984. P. 404.
11. *McAlister A.H., Dryer M., McIntosh et al.* A quiet CME and a severe geomagnetic storm: April 14–17, 1994 // Proceedings of the Second SOLTIP Symposium / Ed. Watanabe. 1994. V. 5. P. 191.
12. *Mayaud P.N.* Analysis of Storm Sudden Commencements for the Years 1868–1967 / J Geophys Res. 1975. V. 80. № 2. P. 111.
13. *Ишков В.Н.* Всплывающие магнитные потоки и вспышечные явления на Солнце. Диссертация ... кандидата ф.-мат. наук. ИЗМИРАН. Троицк. 2008.