

УДК 524.1-352

## ИНДЕКС ДОЛГОВРЕМЕННОГО ВЛИЯНИЯ СПОРАДИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА МОДУЛЯЦИЮ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2018 г. А. В. Белов\*, Р. Т. Гущина\*\*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк*

*\*e-mail: abelov@izmiran.ru*

*\*\*e-mail: rgus@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 09.02.2017 г.

Корональные выбросы вещества не только создают Форбуш-эффекты, но вносят вклад и в долговременную модуляцию космических лучей. Это делает корональные выбросы главным спорадическим проявлением солнечной активности, которое следует учитывать в моделях модуляции. В работе предложен новый вариант СМЕ-индекса, полученный на основе сопоставления данных спутниковых коронографов с Форбуш-эффектами и долговременными вариациями космических лучей.

DOI: 10.7868/S0016794018010030

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Спорадические солнечные явления, прежде всего выбросы солнечного вещества (СМЕ), оказывают влияние на галактические космические лучи (КЛ). В тех случаях, когда выброс приходит к Земле, в КЛ наблюдаются Форбуш-понижения (например, [Forbush, 1954; Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2009]) и это влияние может быть весьма значительным. По данным наземных нейтронных мониторов самые большие Форбуш-понижения достигают ~30% и превосходят по величине вариации КЛ, обусловленные квазиодиннадцатилетним циклом солнечной активности [Belov, 2009].

Главный эффект в КЛ обычно наблюдается через несколько дней после событий на Солнце, но межпланетное возмущение, вызванное СМЕ, может существовать в гелиосфере несколько месяцев, все это время воздействуя на КЛ. Ранее даже высказывались предположения [Lockwood, 1971], что именно Форбуш-понижения вносят главный вклад в создание долгопериодных вариаций КЛ. Это не так, долгопериодные вариации КЛ создаются, главным образом, циклическими изменениями солнечных магнитных полей по величине и по конфигурации, в частности, приводящими к изменениям формы гелиосферного токового слоя [Крымский и др., 2001; Белов и др., 2002]. Однако вклад спорадических явлений существенен, и пренебрегать им не следует [Cliver et al., 2013].

Модель долгопериодных вариаций, которую разрабатывает наша группа [Белов и др., 2002],

основана на нескольких индексах, вычисляемых для поверхности источника солнечного ветра [Hoeksema and Scherrer, 1986]. Это наклон гелиосферного токового слоя, среднее и полярное солнечные магнитные поля, т.е. относительно медленно меняющиеся индексы, определяющие структуру и состояние гелиомагнитосферы. В последнее время к ним добавилась [Гущина и др., 2016] площадь низкоширотных корональных дыр, которая также является индексом с циклическим поведением. Эти индексы, в совокупности, хорошо воспроизводят наблюдаемые долговременные вариации КЛ с жесткостью 10 ГВ. Однако они не учитывают спорадические явления и значительную часть короткопериодных вариаций. Нужен какой-то дополнительный индекс, чтобы учесть влияние спорадических явлений и, в первую очередь, Форбуш-эффектов (ФЭ). С самого начала мы понимали, что для такого индекса лучше всего использовать информацию о СМЕ. Но такая информация появилась сравнительно недавно, поэтому мы пытались заменить ее другими данными. Пробные расчеты показали, что известный индекс солнечных вспышек [Atas, 1987] плохо отражает короткопериодные изменения и практически дублирует число солнечных пятен. Значительно полезнее оказался индекс рентгеновских вспышек  $x_f$  [Belov et al., 2007], но и он решает проблему лишь частично. Во-первых, большая часть вспышек, в том числе и мощных, никак не связана с наблюдаемыми вариациями КЛ, во-вторых, полные и достаточно однородные рентгеновские наблюдения Солнца существуют

только с 1975 г., а однородный ряд вариаций КЛ, который мы изучаем, начинается с 1953 г. Чтобы исследовать весь период 19–24-го циклов, мы в качестве индекса спорадических явлений  $I_{SC}$  применяли количество внезапных начал геомагнитных бурь  $N_{SSC}$ .

Этот индекс более тесно связан с ФЭ, но и у него есть очевидные недостатки. Хотелось бы иметь полностью солнечную модель, а  $I_{SC}$ -индексу явно не достает глобальности. Это же относится и к любым другим индексам, основанным на геофизических данных или на околоземных наблюдениях солнечного ветра.

К настоящему времени период наблюдений коронографов Soho/LASCO превысил 20 лет и с каждым новым годом использование прямых наблюдений СМЕ для изучения долгопериодных вариаций КЛ становится все привлекательнее. В работе [Mavromichalaki and Paouris, 2012] был предложен и рассчитан ежемесячный СМЕ-индекс. Его включение в модель долговременной модуляции КЛ для 23–24-го циклов оказалось вполне успешным [Paouris et al., 2012, Paouris et al., 2015; Гущина и др., 2014], и согласие модели с экспериментальными данными заметно улучшилось. Вместе с тем, стало ясно, что СМЕ-индекс может быть значительно усовершенствован.

В данной работе мы предлагаем новый вариант СМЕ-индекса, полученный на основе сопоставления данных спутниковых коронографов с ФЭ и долговременной модуляцией КЛ.

## 2. ДАННЫЕ

Долговременные вариации КЛ за 1957–2015 гг. получены нами с помощью методики [Belov et al., 1993] по среднемесячным данным наземных нейтронных мониторов и по стратосферным наблюдениям [Стожков и др., 2007]. Кроме того, в представляемой работе используются характеристики ФЭ, полученные по среднечасовым данным мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки и объединенные в базу данных ФЭ и межпланетных возмущений [Belov, 2009]. Все вариации КЛ приведены для жесткости 10 ГВ.

СМЕ-индекс определяется по наблюдениям внеатомных коронографов Soho/LASCO, собранных в удобную и полезную базу данных [Yashiro et al., 2004, [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/SME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/SME_list/)]. Информация о внезапных началах геомагнитных бурь ( $N_{SSC}$ ) взята с сайта [<http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com/ssc.dat>].

## 3. СМЕ-ИНДЕКС

Любое облако солнечной плазмы, выходящее в межпланетное пространство, несет в себе магнитное поле и не может не влиять на КЛ. С лю-

бым ICME (продолжением СМЕ в солнечном ветре) связан ФЭ [Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2009], часто (но не обязательно) наблюдаемый на Земле. Кроме того, достаточно крупные ICME – это распространяющиеся крупномасштабные возмущения, долго существующие в межпланетном пространстве, они усложняют структуру гелиомагнитосферы и являются одним из модулирующих КЛ факторов. Понятно, что чем больше в межпланетном пространстве неоднородностей, к тому же, как правило, с усиленным магнитным полем, тем сильнее влияние солнечного ветра на галактические КЛ. На эффективность ICME влияет и их скорость, чем она выше, тем, как правило, больше возрастает плотность солнечного ветра и напряженность ММП в ведущей части межпланетного возмущения, тем мощнее связанные с ним геомагнитные бури [Николаева и др., 2011; Richardson et al., 2012], тем глубже Форбуш-понижения [Belov, 2009; Belov et al., 2014]. С учетом этого в работе [Mavromichalaki and Paouris, 2012] в СМЕ-индекс включены частота и скорость СМЕ и этот СМЕ-индекс выглядит так:

$$P_i = 0.68N + 0.32V_p, \quad (1)$$

где  $N$  – количество СМЕ, а  $V_p$  – средняя скорость СМЕ за месяц.

СМЕ-индекс в этой форме уже использован в нескольких работах [Гущина и др., 2012, 2014; Valabín, 2015], описывающих модели модуляции КЛ, и показал свою полезность. Возможно, это наилучший из уже использованных индексов для учета вклада спорадических факторов в долгопериодные вариации КЛ. Однако нам представляется, что форма (1) не полностью использует возможности СМЕ-наблюдений и СМЕ-индекс можно и нужно улучшить. Естественно ожидать, что СМЕ с большими скоростями должны иметь больший вес в СМЕ-индексе. Поэтому предлагается включать скорость СМЕ в индекс не аддитивно, как в (1), а мультипликативно, а линейную зависимость от скорости заменить на степенную. Тогда вместо (1) получим:

$$I_{СМЕ} = \sum_{i=1}^n \frac{w}{360} (V_i/V_0)^b. \quad (2)$$

Здесь  $n$  – количество СМЕ,  $V_i$  – скорость конкретного СМЕ. Параметр  $V_0$  имеет размерность скорости (в дальнейшем мы будем считать, что  $V_0 = 400$  км/с), а показатель  $b$  следует подобрать так, чтобы СМЕ-индекс был наиболее эффективным. Есть несколько методических вопросов, возникающих при вычислении  $I_{СМЕ}$  и заслуживающих внимания.

1. Какие СМЕ учитывать? Ясно, что маленькие и наименее мощные из наблюдаемых СМЕ практически не влияют на структуру солнечного ветра

**Таблица 1.** Ежемесячные СМЕ-индексы, полученные по наблюдениям Soho/LASCO в 1996–2015 гг.

1996	−99.0	−99.0	−99.0	−99.0	16.8	0.5	3.7	6.5	0.8	2.5	5.8	4.1
1997	1.0	4.6	1.9	8.7	4.7	2.0	2.4	2.5	10.9	13.0	29.5	5.9
1998	13.7	8.7	37.1	51.3	56.3	52.4*	51.0*	80.8*	64.4*	43.5*	71.6*	58.6*
1999	48.0*	61.3*	15.2	31.3	55.4	90.9	49.8	35.5	60.1	30.5	38.7*	36.3
2000	41.7	49.8	46.4	42.7	93.8	60.7	83.0	42.0	54.6	50.1	108.6	41.6
2001	54.9	37.3	50.2	168.8	51.1	67.2	20.5	44.6	71.7	76.5	76.6	73.6
2002	50.7	31.1	81.3	71.8	80.3	30.1	135.3	85.2	57.0	101.8	58.1	41.8
2003	34.2	24.4	41.4	39.7	58.3	61.3*	12.7	14.0	16.8	114.4	181.2	10.8
2004	50.6	12.1	12.4	37.7*	20.8	35.3	66.3	15.9	39.1*	17.4	95.7	47.0
2005	124.1	25.8	13.3	16.2	60.2	43.7	174.8	84.6	118.6	4.0	7.9	15.7
2006	9.6	4.5	4.3	8.5	11.4	6.0	11.0	12.9	13.0	4.6	39.5	26.3
2007	17.2	8.7	4.3	3.8	8.3	4.8	6.4	5.4	2.5	2.5	1.9	4.5
2008	3.9	2.8	3.7	6.0	2.6	1.9	1.8	1.3	0.7	1.7	2.4	2.1
2009	1.7	10.6*	1.5	1.4	1.5	1.9	1.6	1.5	2.3	2.0	2.2	3.1
2010	3.1	15.0	13.5	8.2	7.5	6.9	7.6	38.8	10.1	5.9	11.6	12.7
2011	11.6	16.3	58.8	30.2	31.9	64.6	16.3	43.3	89.8	48.2	56.1	43.4
2012	86.0	25.3	132.8	54.5	66.8	58.7	108.3	73.6	63.3	24.7	64.9	27.5
2013	28.8	39.3	33.1	40.2	104.3	54.1	27.0	38.4	29.7	79.3	67.6	68.0
2014	95.8	90.6	58.9	55.5	55.7	75.4	31.1	38.4	90.8	34.9	47.9	59.5
2015	20.4	30.9	62.1	59.8	48.4	67.0	28.7	23.0	24.9	21.5	55.5*	41.1*

Примечание: \* – индексы рассчитаны по данным о Форбуш-эффектах.

и не являются эффективными [Raouris, 2013]. Чтобы снизить их влияние, мы добавили множитель  $w/360$ , где  $w$  – угловая ширина СМЕ. Более сильная зависимость от угловой ширины, вряд ли, целесообразна. Дело в том, что она отражает только широтный размер выброса, да и то не всегда. Узкий по широте СМЕ может иметь большую долготную протяженность. С другой стороны, максимально широкий (гало) по наблюдениям коронографа выброс из центральной зоны солнечного диска может в реальности иметь небольшой размер [Michalek, 2006; Belov et al., 2014].

2. Если применять СМЕ-индекс для сравнения с событиями на Земле или около Земли, то следовало бы учесть, что, как правило, возмущения солнечного ветра, обусловленные СМЕ, доходят до орбиты Земли за 2–4 дня (иногда это время бывает меньше суток, а для некоторых ICME превышает 5 дней). Однако, поскольку мы, в первую очередь, думали о долгопериодных вариациях КЛ, которые создаются всей гелиосферой, мы здесь запаздывание не учитывали и временные ряды никак не сдвигали.

3. Наблюдения Soho/LASCO достаточно полные, но все-таки иногда прерываются по различным причинам. Сведения о перерывах (обычно коротких) в наблюдениях содержатся в базе данных [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Мы использовали эти сведения, полагая, что из-за этих

перерывов часть СМЕ могла быть пропущена и СМЕ-индекс с учетом этого должен быть увеличен. Поэтому в окончательном виде СМЕ-индекс (2) умножался на коэффициент  $\epsilon = t_m / (t_m - t_g)$ , где  $t_m$  – количество дней в месяце, а  $t_g$  – количество дней всех перерывов в наблюдениях. Если коэффициент  $\epsilon$  был меньше 0.8, то такие месяцы в расчеты не включались. Единственный длительный перерыв в наблюдениях Soho пришелся на 1998–1999 гг., когда была потеряна связь с этим космическим аппаратом [[http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)].

4. Здесь мы определяем среднемесячные индексы, и может возникнуть вопрос: не надо ли учитывать реальную продолжительность различных месяцев. По-видимому, это не нужно, так как нас интересует не удельная эффективность СМЕ, а их интегральный эффект.

Таким образом, предлагаемый индекс (таблица 1) учитывает количество СМЕ, их скорость и угловой размер. Сравнительно медленный ( $V = 400$  км/с) выброс типа гало ( $w = 360^\circ$ ) даст единственный вклад в  $I_{\text{СМЕ}}$ , а вклад быстрых СМЕ будет определяться параметром  $b$ , к выбору которого мы перейдем.

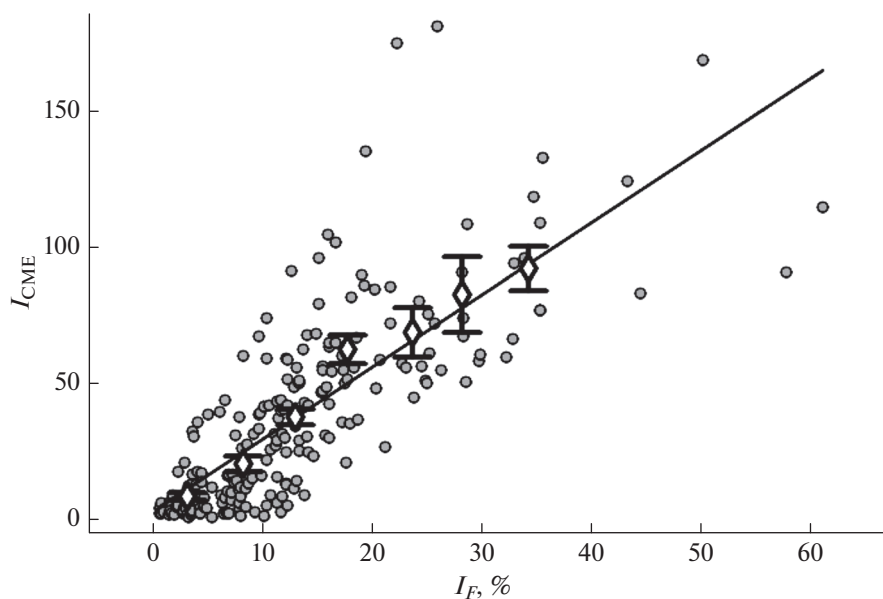


Рис. 1. Связь между ФЭ-индексом  $I_F$  и СМЕ-индексом  $I_{CME}$  в 1996–2015 гг.

#### 4. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Поскольку мы ищем индекс, позволяющий учитывать вклад ФЭ в долгопериодные вариации, естественно использовать именно ФЭ для определения оптимальных параметров. Мы смогли это сделать, обладая информацией обо всех ФЭ (начиная с июля 1957 г.), собранной в базу данных ФЭ и межпланетных возмущений. С ее помощью мы рассчитали для каждого месяца простой ФЭ-индекс  $I_F$ , как сумму величин всех ФЭ, начавшихся в данном месяце, а затем сравнили  $I_{CME}$  и  $I_F$  индексы. Показатель  $b$  в выражении (2) подбирался так, чтобы коэффициент корреляции между  $I_{CME}$  и  $I_F$  был максимальным. Для 114 месяцев в период с января 1996 г. по октябрь 2015 г. при  $b = 1.66$  коэффициент корреляции  $0.77 \pm 0.04$  (рис. 1). Степень корреляции двух индексов оказалась достаточно высокой. Следует помнить, что, хотя все СМЕ создают ФЭ в гелиосфере, далеко не все из них наблюдаются на Земле. Зато часть ФЭ, наблюдаемых на Земле, связана не со СМЕ, а с корональными дырами. Кроме того, некоторые наблюдавшиеся ФЭ, связаны с выбросами солнечного вещества, которые не удалось зарегистрировать на коронографах [Howard and Harrison, 2012].

#### 5. СМЕ-ИНДЕКС И ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ КЛ

Хорошая корреляция между индексами  $I_F$  и  $I_{CME}$  дает возможность использовать регрессионную связь двух индексов (прямая на рис. 1), чтобы заполнить пробелы в наблюдениях СМЕ. Это цен-

ная возможность, поскольку эти пробелы существенно затрудняют использование СМЕ-индекса в долгопериодных исследованиях. Для 16 месяцев (июнь 1998 г.—февраль 1999 г., ноябрь 1999 г., июнь 2003 г., апрель и сентябрь 2004 г., февраль 2009 г., ноябрь и декабрь 2015 г.) СМЕ-индекс был рассчитан по формуле

$$I_{CME} = -7.55 + 3.426I_F, \quad (3)$$

соответствующей линейной регрессии и ортогональному варианту метода наименьших квадратов. 16 мес. — это малая часть из 230 мес., и они не мешают индексу  $I_{CME}$  оставаться СМЕ-индексом. Справедливым будет замечание, что при малых значениях  $I_F$  выражение (3) не позволяет получить разумную величину  $I_{CME}$ . Поэтому выражение (1) следует дополнить ограничением:  $I_{CME} = 0$ , когда (3) дает отрицательное значение. Таких месяцев было немного, и все они относятся к периоду 2006–2009 гг., т.е. к последнему аномально низкому минимуму солнечной активности.

Скорректированный таким образом  $I_{CME}$ -индекс был использован в модели долгопериодной модуляции КЛ, заменив применявшиеся ранее индексы спорадических солнечных явлений: индекс рентгеновских вспышек  $x_f$ , количество внезапных начал геомагнитных бурь  $N_{SSC}$  и  $Pi$ -индекс, введенный в работе [Mavromichalaki and Paouris, 2012].

Не будем здесь подробно останавливаться на деталях модели, которая была описана ранее [Белов и др., 2002; Гущина и др., 2008]. Скажем только, что в качестве солнечных индексов совместно с СМЕ-индексом были использованы наклон гелиосферного токового слоя  $hcsf$ , среднее магнит-

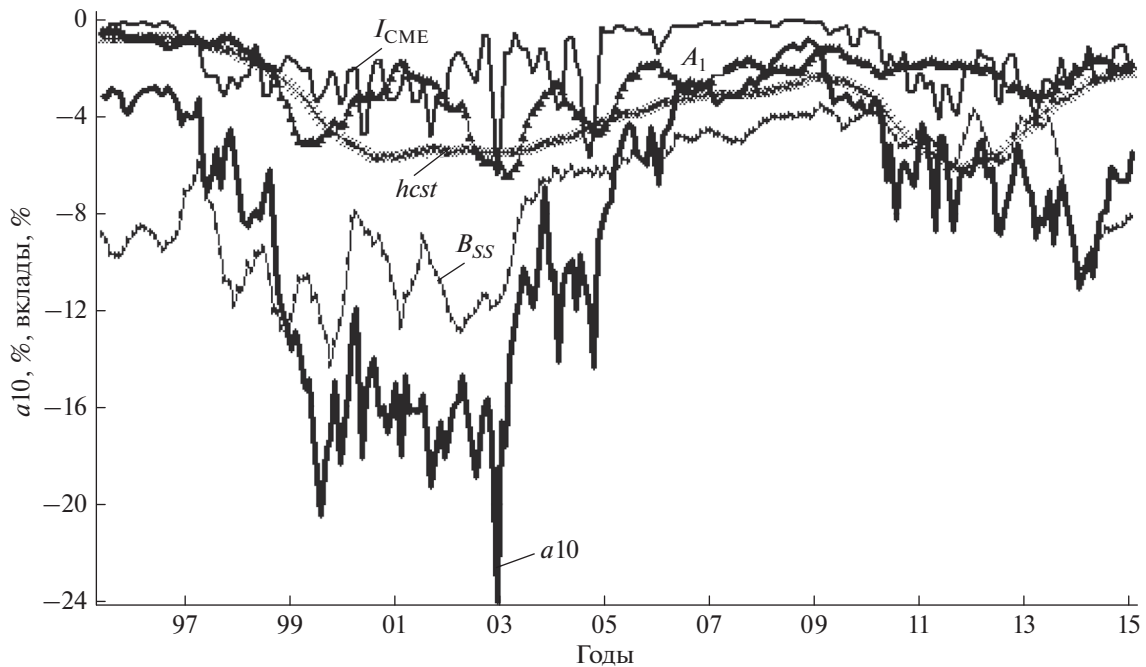


Рис. 2. Наблюдаемые в 05.1996–12.2015 гг. вариации КЛ (с жесткостью 10 ГВ) –  $a_{10}$ , % (к 2009 г.) и вклады в модуляцию от изменений индексов СА –  $I_{CME}$ ,  $A_1$ ,  $h_{est}$  и  $B_{SS}$ .

ное поле Солнца  $B_{ss}$ , величина дипольной составляющей  $H_{pol}$  магнитного поля Солнца и площадь низкоширотных дыр  $A_1$  [Гушина и др., 2016].

Таким образом, описание долговременной модуляции КЛ для 1996–2015 гг. выполнено с помощью модели, включающей пять солнечных индексов:  $h_{est}$ ,  $B_{ss}$ ,  $H_{pol}$ , один из индексов корональных дыр – площадь низкоширотных дыр  $A_1$  (выбор этой характеристики КД сделан на основании результата работы [Гушина и др., 2016]) и индекс  $I_{CME}$ .

Спектр долговременных вариаций КЛ рассчитан по методике, предложенной в работе [Belov et al., 1993], с помощью которой изотропная составляющая космического излучения определена на основе всей имеющейся информации об интенсивности космического излучения, полученной при его регистрации наземной сетью НМ (~40 мониторов) и при зондировании стратосферы в трех пунктах [Стожков и др., 2007]. Дальнейший анализ выполнен по среднемесячным значениям амплитуды долговременных вариаций галактических КЛ для частиц с жесткостью 10 ГВ –  $a_{10}$ , % (% относительно 2009 г.), т.е. для частиц с энергией, к которой наиболее чувствительны НМ.

Для вышеперечисленных солнечно-гелиосферных характеристик и амплитуды долговременных вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ ( $a_{10}$ , %) выполнен многопараметрический регрессионный анализ. На рис. 2 представлен результат модельного описания вариаций КЛ для 1996–2015 гг.

Для этого периода мы имеем высокий коэффициент корреляции  $\rho = 0.96$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma = 1.54\%$  для параметров  $A_1$ ,  $B_{ss}$ ,  $I_{CME}$  и  $h_{est}$  (определенного на  $R = 2.5R_0$ ) с временами запаздывания 11, 4, 1 и 20 месяцев соответственно для указанных характеристик.

Если вместо  $I_{CME}$  использовать другой СМЕ-индекс,  $P_i$ , корреляция модельных и экспериментальных данных хуже. Таким образом, индекс  $I_{CME}$  оправдывает наши ожидания и подходит для долгосрочного моделирования вариаций КЛ. Отметим, что по величине вклад в модуляцию КЛ в этот период (23-й цикл и часть 24-го цикла), создаваемый действием выбросов солнечного вещества, близок к вкладу от корональных дыр, достигая 6.5%. Временные изменения вклада от  $I_{CME}$  в 24-м цикле четко отражаются в наблюдаемых вариациях КЛ, описывая осцилляции с переменным периодом на фоне уменьшения одиннадцатилетней вариации КЛ. Время запаздывания для  $I_{CME}$  (1 месяц) получилось самым коротким по сравнению с другими индексами. Это означает, что для модуляции КЛ наиболее существенны не все СМЕ, а только недавние, т.е. СМЕ во внутренней части гелиосферы. С другой стороны, для долговременной модуляции КЛ важны не только СМЕ (и Форбуш-понижения) в том же месяце – в этом случае запаздывание было бы 0 месяцев (описание индексов). Важен также и предыдущий месяц. А это означает, что, поскольку за 1–2 мес. сравнительно быстрые (и наиболее эффек-

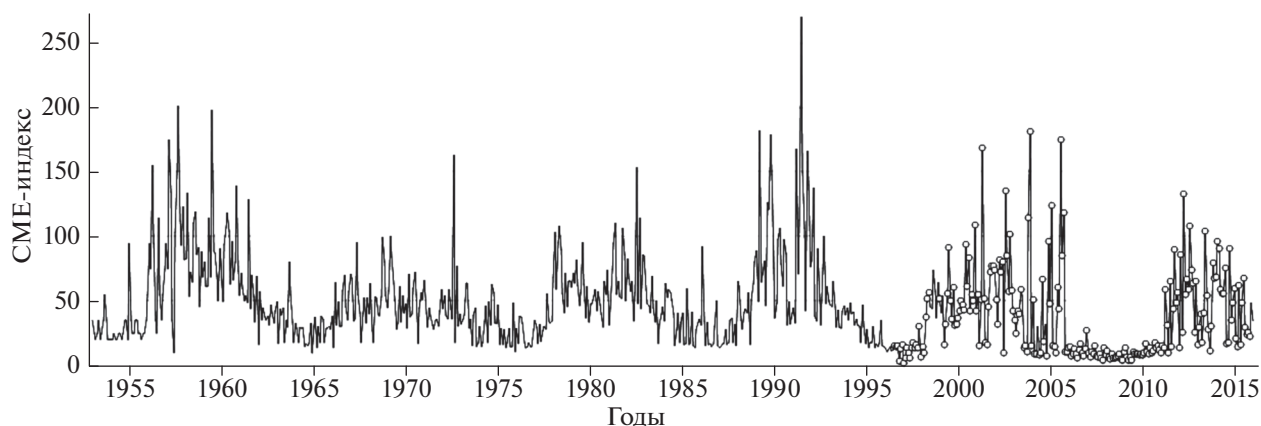


Рис. 3. Поведение расширенного СМЕ-индекса в 1953–2015 гг. Месяцы, в которые использовались наблюдения коронографов Soho/LASCO, выделены кружками.

тивные) выбросы могут уйти на 6–10 а. е. и далее, СМЕ во всей внутренней гелиосфере заметно влияют на интенсивность КЛ у Земли.

Однако важно помнить, что все остальные солнечные индексы, используемые в модели модуляции, имеют значительно большее запаздывание и отражают более крупномасштабные воздействия структуры и состояния гелиосферы на модуляцию КЛ.

## 6. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СМЕ-ИНДЕКСА НА РАННИЕ ГОДЫ

Достаточно надежные и однородные вариации КЛ, основанные на измерениях нейтронных мониторов, получены начиная с 1953 г. [Belov et al., 1993]. Чтобы получить индекс спорадических солнечных явлений для всего этого периода, можно распространить СМЕ-индекс на годы, предшествующие миссии Soho. В период с июля 1957 г. до середины 1996 г. это можно сделать, используя полученную связь СМЕ-индекса с частотой и величиной ФЭ. Сравнительно небольшой период 1953–1957 гг., когда нет надежных данных о ФЭ, пришлось заполнить с помощью  $I_{SC}$ -индекса, который упоминался во Введении и является количеством внезапных начал геомагнитных бурь за месяц  $N_{SSC}$ . По данным 1996–2015 гг. метод наименьших квадратов в ортогональном варианте дает зависимость

$$I_{СМЕ} = -5.2 + 20I_{SC}, \quad (4)$$

аппроксимирующую реальные данные с коэффициентом корреляции  $0.56 \pm 0.06$ . В данном случае трудно ожидать более тесной корреляции, поскольку в  $I_{SC}$ -индексе не отражаются межпланетные возмущения, прошедшие мимо Земли, а также те  $I_{СМЕ}$ , скорость которых недостаточна для создания межпланетной ударной волны. Поэтому только сравнительно малая часть межпланетных

возмущений, реально модулирующих КЛ, входит в  $I_{SC}$ . По этой же причине при малых значениях  $I_{SC}$  выражение (4) дает неадекватный результат. В месяцы без SSC к Земле, как правило, приходят значительные СМЕ и, с еще большей вероятностью, они проходят мимо Земли. С учетом этого мы использовали выражение (4) для  $I_{SC} > 1$ , а для  $I_{SC} = 0$  и  $I_{SC} = 1$  нашли средние значения  $I_{СМЕ}$ , которые оказались близки к 19 и 24 соответственно.

Расширенный СМЕ-индекс для всего 63-летнего периода показан на рис. 3. Как и следовало ожидать, в поведении  $I_{СМЕ}$  хорошо виден квазиодинамический цикл солнечной активности. Однако поведение  $I_{СМЕ}$  сильно отличается от поведения чисел солнечных пятен и имеет более “всплесковый” характер, с большими перепадами между соседними месяцами. Обращает на себя внимание длительный (около трех лет) период аномально низких значений СМЕ-индекса в последнем минимуме солнечной активности (2007–2009 гг.). Разумеется, индекс до 1996 г. только условно называется СМЕ-индексом, но, за неимением лучшего, его можно использовать для изучения долгопериодных вариаций. Можно надеяться, что регулярные наблюдения СМЕ будут продолжаться и доля полноценного, надежно определенного СМЕ-индекса будет со временем возрастать.

Для более полного отражения в модуляции КЛ изменений структур солнечного ветра, наблюдаемых в ходе цикла солнечной активности (СА) и обусловленных изменениями относительного вклада магнитных полей Солнца разных масштабов (глобального и локального) по мере развития цикла, описание долговременных вариаций проведено с помощью комбинации индексов, перечисленных в предыдущем разделе. Отличие моделирования КЛ для 1957–2015 гг. состоит в использовании упрощенного представления полярного

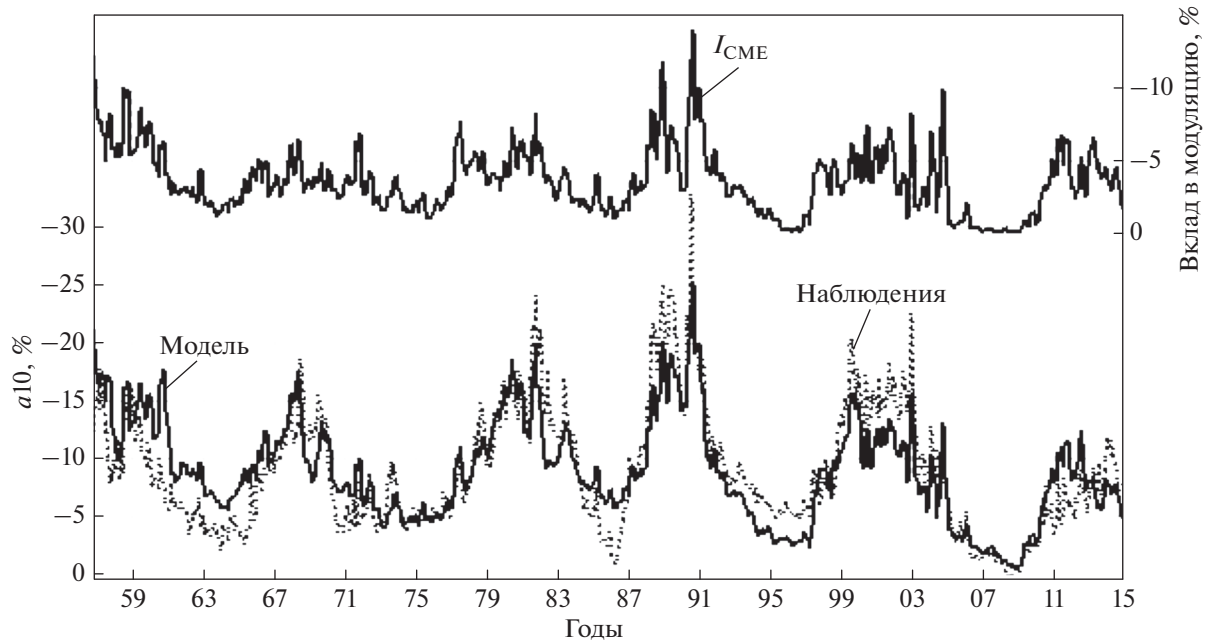


Рис. 4. Левая шкала –  $a_{10}$ , % долговременные вариации КЛ в 1957–2015 гг. (модель – сплошная кривая; точки – наблюдаемые вариации); правая шкала – вклад в модель модуляции КЛ от воздействия  $I_{\text{СМЕ}}$  – спорадической СА.

поля в зависимости от направления глобального магнитного поля Солнца ( $H_{\text{pol}} = 1, 0, -1$ ) с учетом периода реперолюсовки. Это сделано из-за отсутствия данных наблюдений солнечного магнитного поля для такого длительного периода.

Результат моделирования долговременных вариаций КЛ для пяти последних циклов СА (1957–2015 гг.) дан на рис. 4 с применением полученного расширенного СМЕ-индекса совместно с другими характеристиками СА –  $hcst$ ,  $B_{ss}$  и  $A_l$ . Обратим внимание на то, что величины вкладов в создаваемую модуляцию от воздействия каждого из них сильно различаются в разные эпохи солнечных циклов, несмотря на 11-летнюю периодичность, присущую вкладам от всех использованных характеристик СА. Причем отличия носят специфический для каждого индекса характер, в частности, они наглядно проявляются в несовпадении фаз максимумов.

В период 09.1957–12.2015 гг. коэффициент корреляции для 4-параметрической ( $B_{ss}$ , расширенный СМЕ-индекс,  $hcst$  и  $H_{\text{pol}}$ ) модели модуляции  $\rho = 0.84$ ,  $\sigma = 2.88\%$  с временами запаздывания 5, 2, 5 и 11 мес. соответственно для указанных характеристик. Ранее (до введения СМЕ-индекса) для отражения в модели модуляции КЛ короткопериодических явлений мы использовали  $N_{SSC}$  – число магнитных бурь с внезапным началом, при этом статистические характеристики были такие:  $\rho = 0.81$ ,  $\sigma = 3.10\%$ . Как видим, многопараметрическая модель модуляции КЛ с учетом СМЕ-ин-

декса улучшает описание наблюдаемых долговременных вариаций КЛ.

В работе отдельное внимание уделено влиянию корональных выбросов вещества, участвующих в образовании неоднородностей солнечного ветра, на модуляцию КЛ. Это вызвано необходимостью более точного (с использованием имеющихся современных данных наблюдений) учета таких проявлений СА при построении модели модуляции КЛ.

## 7. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Из всех спорадических солнечных явлений на состояние и структуру гелиомагнитосферы сильнее всего влияют выбросы солнечного вещества (СМЕ), и именно их наблюдения должны быть основой для создания индекса спорадических солнечных явлений, предназначенного для долговременных исследований влияния солнечной активности, в частности, для изучения долгопериодной модуляции КЛ.

Накопленные за последние 20 лет наблюдения Soho/LASCO позволяют создать такой индекс и проверить его полезность.

Нами подтверждено, что СМЕ-индекс должен основываться на количестве и скорости СМЕ, и предложена новая его форма.

Показано, что новый СМЕ-индекс хорошо коррелирует с количеством и величиной Форбуш-эффектов, наблюдаемых наземными нейтронными мониторами.

Включение нового СМЕ-индекса в модель долгопериодных вариаций космических лучей существенно увеличило согласие между расчетными и наблюдаемыми вариациями. Вклад воздействия СМЕ в модель модуляции КЛ достигает иногда 14%.

Статистическая связь СМЕ-индекса с Форбуш-эффектами и внезапными началами геомагнитных бурь позволила расширить этот индекс на длительный период (с 1953 г.), что дает возможность использования нового индекса для всех лет с надежными данными нейтронных мониторов.

Работа выполнена при частичной поддержке Президиума РАН (Программы ФИ N23 и N7), РФФИ (грант N17-02-00508). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ N85 "Российская национальная сеть станций космических лучей" (Сеть СКЛ). Мы также признательны всем сотрудникам сети станций космических лучей <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Гущина Р.Т., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Янке В.Г. Связь долговременной модуляции космических лучей с характеристиками глобального магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 6. С. 727–735. 2002.
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Экстремумы долговременной модуляции интенсивности космических лучей в пяти последних солнечных циклах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 4. С. 463–469. 2012.
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Обридко В.Н., Паорис Е., Шельтинг Б.Д. Модуляция космических лучей на фазе роста солнечной активности 24-го цикла // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 4. С. 470–476. 2014.
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Тлатов А.Г., Янке В.Г. Корональные дыры в долговременной модуляции космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 3. С. 275–282. 2016.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Мамрукова В.П., Нейтральный слой и дрейф частиц в долгопериодических вариациях космических лучей // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 65. № 3. С. 353–356. 2001.
- Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А., Свиржевская А.К., Квашинин А.Н., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Клочкова Т.И. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007) // Препр. М.: Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН. 55 с. 2007.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 1. С. 51–67. 2011.
- Atac T. Time variation of the flare index during the 21st solar cycle // Astrophys. Space Sci. V. 135. № 1. P. 201–205. 1987.
- Balabin Yu.V., Belov A.V., Gushchina R. T. Annual variations of cosmic rays in the 24th solar cycle // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. V. 79. № 5. P. 623–627. 2015. doi 10.3103/S1062873815050093
- Belov A.V., Gushchina R.T., Siroтина I.V. The spectrum of cosmic rays variations during 19–22 solar cycles // Proc. 23-rd ICRC. Calgary. V. 3. P. 605–609. 1993.
- Belov A.V., Gushchina R.T., Obridko V.N., Shel'ting B.D., Yanke V.G. Simulation of the modulation of galactic cosmic rays during solar activity cycles 21–23 // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. V. 71. № 7. P. 974–976. 2007.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Universal Heliophysical Processes: Proc. Intern. Astronomical Union IAU Symp. Ed. N. Gopalswamy and D. Webb. V. 257. P. 439–450. 2009.
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H., Gopalswamy N., Yashiro S. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases // Solar Phys. V. 289. P. 3949–3960. 2014.
- Cane H., Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. P. 55–77. 2000.
- Cliver E.W., Richardson I.G., Ling A.G. Solar drivers of 11-yr and long-term cosmic ray modulation // Space Sci. Rev. V. Issue 1. P. 3–19. 2013.
- Forbush S.E. Worldwide cosmic ray variations, 1937–52 // J. Geophys. Res. V. 59. P. 525–542. 1954.
- Hoeksema J.T., Scherrer P.H. The solar magnetic field-1976-through1985 // UAG Report. 94. WDC-A for Solar Terrestrial Physics. 1986.
- Howard Timothy A., Harrison Richard A. Stealth coronal mass ejections: A Perspective // Solar Phys. V. 285. Issue 1–2. P. 269–280. 2012.
- <http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com/ssc.dat>.
- [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).
- Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic ray variations // Space Sci. Revs. V. 12. P. 658–715. 1971.
- Mavromichalaki H., Paouris E. Long-term cosmic ray variability and the CME-index // Advances in Astronomy. V. 2012, id.607172. 2012.
- Michalek G., Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S. Properties and geoeffectiveness of halo coronal mass ejections // Space Weather. V. 4. № 10. 2006.
- Paouris E., Mavromichalaki H., Belov A., Gushchina R., Yanke V. Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum // Solar Phys. V. 280. № 1. P. 255–271. 2012.
- Paouris E. Ineffectiveness of narrow CMEs for cosmic ray modulation // Solar Phys. V. 284. Issue 2. P. 589–597. 2013.
- Paouris E., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Gushchina R. The solar polar field in the cosmic-ray intensity modulation // J. Phys. Conf. Ser. V. 632. 2015.
- Richardson Ian G., Cane Hilary V. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // J. Space Weather and Space Climate (SWSC). V. 2. 2012.
- Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G., St Cyr OC, Plunkett S.P., Rich N.B., Howard R.A. A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft // J. Geophys. Res. V. 109. A07105. 2004. doi 10.1029/2003JA010282