

УДК 524.1-352

СВЯЗЬ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

© 2002 г. А. В. Белов, Р. Т. Гущина, В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг, В. Г. Янке

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Троицк (Московская обл.)
rgus@izmiran.troitsk.ru

Поступила в редакцию 10.12.2001 г.
После доработки 12.02.2002 г.

Рассматривается связь долговременных вариаций галактических космических лучей (КЛ) с характеристиками глобального магнитного поля Солнца и параметрами солнечного ветра. Работа является продолжением наших исследований долговременных вариаций КЛ, в которых солнечно-гелиосферные параметры используются для описания наблюдаемой модуляции КЛ в различных циклах солнечной активности. Особенностью этой работы является то, что она основана на характеристиках глобального магнитного поля Солнца, определяемых на поверхности источника солнечного ветра. Набор таких характеристик включает наклон гелиосферного токового слоя, среднюю напряженность магнитного поля Солнца и его полярность. Учитывается как прямое воздействие полярности глобального магнитного поля Солнца на КЛ, так и влияние полярности на модуляцию КЛ, связанную с изменением наклона токового слоя. В период, когда прямые наблюдения магнитного поля Солнца отсутствовали, характеристики глобального поля Солнца были восстановлены из наблюдений волокон в линии Н-альфа. Таким образом удалось расширить временной интервал модельного представления КЛ вплоть до 1953 г. В результате построена полуэмпирическая модель модуляции, которая достаточно адекватно описывает поведение КЛ с жесткостью 10 ГВ в течение длительного, охватывающего три цикла солнечной активности, периода.

1. ВВЕДЕНИЕ

Долговременные вариации галактических КЛ многократно сопоставлялись с поведением различных индексов солнечной активности и гелиосферными параметрами. Особое место в этом ряду занимают характеристики магнитного поля Солнца, рассчитанные для поверхности источника солнечного ветра [1]. Магнитное поле на поверхности источника определяет структуру и свойства гелиомагнитосферы. Поэтому оно должно быть более близко связано с модуляцией КЛ, чем другие солнечные характеристики (такие как числа солнечных пятен или интенсивность коронального излучения). Амплитуды сферических гармоник магнитного поля на поверхности источника были с успехом использованы Михайлуца [2] и Нагашима и др. [3] для моделирования долгопериодной модуляции КЛ. Именно на поверхности источника определяется наклон гелиосферного токового слоя. Тесная связь этого параметра с поведением КЛ в последние два десятилетия обоснована теоретически [4] и многократно подтверждена экспериментальными данными, например, [5-10].

Сейчас становится все очевиднее, что объяснение особенностей модуляции КЛ невозможно

без использования наклона гелиосферного токового слоя и других характеристик магнитного поля на поверхности источника. Этот подход был бы еще успешнее, если бы не временные ограничения. Характеристики магнитного поля на поверхности источника рассчитываются только с 1976 г. и все вышеперечисленные работы ограничены достаточно узкими временными рамками и относятся к последним циклам солнечной активности. В последние годы появилась надежда на то, что эти ограничения удастся преодолеть. В [11] разработана методика, позволяющая восстанавливать поле на поверхности источника по оптическим наблюдениям солнечных волокон в линии H_{β} и характеристики магнитного поля на поверхности источника определены за длительное время, полностью перекрывающее период наблюдений КЛ. Ранее в исследованиях модуляции КЛ использовалась альтернативная методика восстановления наклона гелиосферного токового слоя по данным геомагнитных наблюдений [12], но она неприменима в периоды высокой солнечной активности.

Цель данной работы - использовать для моделирования долгопериодных вариаций КЛ характеристики магнитного поля на поверхности источника, в том числе характеристики, полученные из косвенных оптических данных.

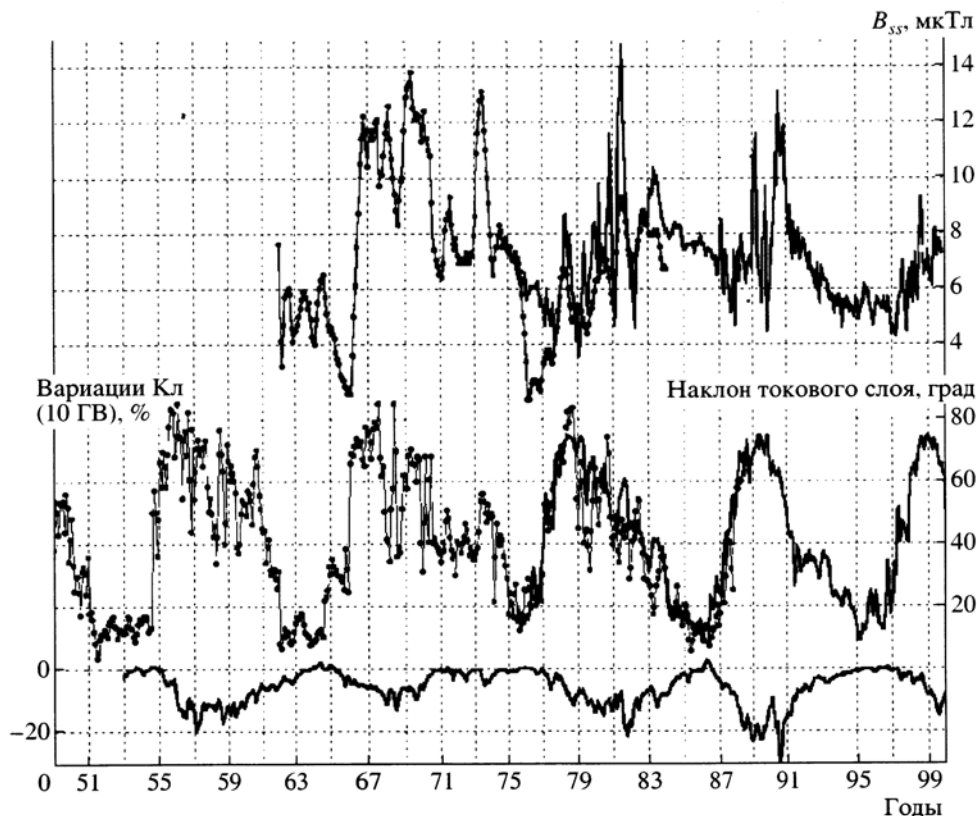


Рис. 1. Долговременные вариации средней напряженности магнитного поля Солнца на поверхности источника B_{ss} , полученные из данных магнитных измерений в Стэнфорде [15] - сплошная кривая; точки на верхней кривой - расчет [11], проведенный по данным наблюдений на Кит Пик и Маунт Вильсон. Наклон гелиосферного токового слоя η_m , определенный из магнитных измерений [15] - сплошная кривая - и наклон $\eta_{H\alpha}$ из оптических $H\alpha$ наблюдений [11]- точки - на средней кривой. Амплитуда вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ - нижняя кривая.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа связи долговременных вариаций КЛ с вариациями характеристик солнечного магнетизма нами использовалась δ амплитуда вариаций плотности частиц с жесткостью 10 ГВ (нижняя кривая рис. 1). Жесткостной спектр вариаций КЛ за каждый месяц получен по данным нейтронных мониторов всей мировой сети станций КЛ, данным ионизационных камер, данным стратосферного зондирования и результатам наблюдений КЛ с энергией более 106 МэВ на ИСЗ "IMP-8" по методике, предложенной в [13 и ссылки к ней]. Ниже мы последовательно рассмотрим три модели модуляции (две вспомогательных и основную). Во всех трех моделях использован наклон гелиосферного токового слоя - η . В первой (простейшей) модели наклон гелиосферного токового слоя - это единственный параметр. Во второй (двухпараметрической) модели он объединен с напряженностью B_{ss} радиальной составляющей магнитного поля, усредненной по всей поверхности источника. В третьей, основной модели (кроме изменений η и B_{ss}) дополнительно ис-

пользуются изменения полярности глобального магнитного поля Солнца - p и гелиосферной характеристики BV - произведения напряженности межпланетного магнитного поля (ММП) и скорости солнечного ветра (СВ). Обоснование использования этих параметров при моделировании долговременных вариаций КЛ и результаты применения такого подхода при описании вариаций в 1977-1999 гг. даны в [14]. Характеристики магнитного поля Солнца получены по методике, разработанной в [11] и специально усовершенствованной для данной задачи. Они рассчитаны на поверхности источника с использованием магнитных и оптических наблюдений. Временные границы инверсии глобального поля на Солнце получены из различных данных на фотосфере и на поверхности источника солнечного ветра.

3. МОДУЛЯЦИЯ КЛ И НАКЛОН ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

На рис. 1 показано поведение наклона гелиосферного токового слоя η_m , полученного по дан-

Параметры регрессионной связи δ и η

Период	$a, \%$	$b, \%$	$\tau_u, \text{мес.}$	ρ	$\sigma, \%$
07.1953-06.1959	2.7 ± 0.2	-0.24 ± 0.01	26	0.93	2.26
02.1961-01.1970	2.2 ± 0.1	-0.16 ± 0.01	23	0.92	1.32
05.1973-05.1980	4.3 ± 0.2	-0.15 ± 0.02	4	0.88	1.51
09.1981-09.1991	4.6 ± 0.2	-0.33 ± 0.01	5	0.95	2.23
03.1992-12.1999	4.0 ± 0.1	-0.20 ± 0.01	25	0.93	1.04

ным магнитных наблюдений [15]. Здесь же дан наклон гелиосферного токового слоя $\eta_{H\alpha}$, рассчитанный по оптическим данным [11]. Хорошо видно близкое сходство изменений η_m и $\eta_{H\alpha}$ в 1976-1989 гг., где эти два временных ряда перекрываются (коэффициент корреляции 0.89). Ранее [7] была обнаружена достаточно тесная связь между наклоном гелиосферного токового слоя и долговременным поведением КЛ в периоды одинаковой полярности глобального магнитного поля Солнца. Чтобы проверить, существует ли такая связь в более широких временных границах, мы использовали комбинированный ряд данных η , составленный из $\eta_{H\alpha}$ (с 1950 г. вплоть до апреля 1976 г.) и из η_m начиная с мая 1976 г. С помощью линейного регрессионного анализа были найдены периоды, приблизительно совпадающие с периодами одинаковой гелиомагнитосферной полярности, когда вариации КЛ достаточно хорошо согласовались с выражением:

$$\delta(t) = a + \frac{b}{\tau_u + 1} \sum_{\tau=0}^{\tau_u} \eta(t - \tau), \quad (1)$$

где τ - запаздывание между изменениями на Солнце и в КЛ. Здесь мы учли, что модуляция КЛ определяется событиями на Солнце и в текущем месяце ($\tau = 0$) и в ближайшем прошлом, начиная с момента $t - \tau_u$. Для каждого периода методом наименьших квадратов были определены три параметра: a , b и максимальное запаздывание τ_u . Они приведены в таблице вместе с коэффициентами корреляции ρ и стандартными среднеквадратичными отклонениями σ . В двух последних периодах использовались исключительно величины η_m , в двух первых - только $\eta_{H\alpha}$, тогда как в третьем периоде (1973-1980 гг.) данные были смешанными. В настоящее время анализ связи вариаций КЛ с изменениями наклона гелиосферного токового слоя удалось распространить на пять полупериодов солнечного магнитного цикла, охватывающих в общей сложности 47 лет. Мы видим хорошее согласие поведения токового слоя и КЛ почти все это время, за исключением относительно коротких перерывов во время и сразу после пере-

полюсовок. Во всех выделенных периодах коэффициент корреляции оказался в диапазоне 0.88-0.95, а среднеквадратическое отклонение было менее 2.3%. Учитывая упрощенный характер примененной модели (1), использующей только один солнечно-гелиосферный параметр, такое согласие следует признать вполне удовлетворительным.

Связь модуляции КЛ с наклоном гелиосферного токового слоя в последнее время стала общепризнанной. Настал момент, когда связь изменений конфигурации гелиосферного токового слоя и долгосрочного поведения КЛ уже не требует доказательств, но она все еще нуждается в убедительных объяснениях [16]. Механизм этой связи еще не вполне понятен и он, скорее всего, сложнее, чем его описания, данные в первых теоретических работах [4, 17]. Здесь следует учитывать несколько обстоятельств. То, что нейтральный токовый слой способствует переносу КЛ в радиальном, а при значительном наклоне и в широтном направлении, это только одно из этих обстоятельств и не обязательно самое главное из них.

Сейчас, после измерений характеристик СВ в широком диапазоне гелиоширот, уже никто не сомневается, что большая часть солнечного цикла СВ разделена на три различные зоны: низкоширотную, где скорость СВ 300-450 км/с и северную и южную высокоширотные зоны, где скорость СВ 700-800 км/с. Размер низкоширотной области СВ с меньшей средней скоростью ветра и более эффективным взаимодействием потоков с разными скоростями, по-видимому, связан с наклоном гелиосферного токового слоя. Можно предполагать (см. например, [18]), что эта низкоширотная часть солнечного ветра, имеет большую модуляционную способность по отношению к КЛ.

Еще более важные для модуляции КЛ явления происходят на границах зон. Эта граница ясно выражена и на ней наблюдается все, что положено наблюдать при набегании быстрого потока на медленный (пара ударных волн, увеличение плотности среды и напряженности межпланетного магнитного поля и т.п.). Две таких зоны взаимодействия (в северном и южном полушарии) простираются от гелиорасстояния 1-2 а.е. до границ солнечной системы и являются основными струк-

турными особенностями гелиосферы. В последнее время появились указания, например, [19] на то, что форма этих границ меняется вместе с формой гелиосферного токового слоя. Это значит, что в минимуме солнечной активности, когда гелиосферный токовый слой почти плоский, быстрый и медленный СВ взаимодействуют слабо. Чем больше наклон гелиосферного токового слоя, тем интенсивнее это взаимодействие, тем протяженнее, шире и мощнее области взаимодействия потоков, тем больше их модулирующая способность. На последнее обстоятельство обратили внимание Крымский и др. [10]. По их расчетам усиленные магнитные поля областей взаимодействия могут создать всю реально наблюдаемую модуляцию КЛ, а изменения этих областей, связанные с изменениями конфигурации гелиосферного токового слоя, способны объяснить основную часть долгопериодных вариаций КЛ и их связь с циклами солнечной активности.

Наконец, говоря о роли наклона в создании наблюдаемого долговременного хода интенсивности КЛ, следует сказать и о том, что корональные выбросы масс предпочтительно происходят вблизи токового слоя.

Обратим внимание (см. таблицу) на величину полученного запаздывания τ_m , оно для некоторых периодов превышает два года. Можно предположить, что переходя через граничную ударную волну солнечный ветер, которому требуется около года, чтобы ее достичь, не теряет способность модулировать КЛ. Область модуляции КЛ может иметь большие размеры, а запаздывание для них может, в принципе, значительно превышать 12 месяцев [20, 21]. Приведенные в таблице значения запаздывания - это описание полученных регрессионных связей. Их нельзя рекомендовать для оценки размеров гелиосферы или области модуляции. В этой части работы мы не пытаемся представить завершённую модель модуляции КЛ. Здесь показано, что корреляция между наклоном гелиосферного токового слоя и поведением КЛ существует не только в последние десятилетия, и ее можно выявить, используя не только прямые магнитные наблюдения, но и косвенные оптические данные. Таким образом, наклон гелиосферного токового слоя, полученный по косвенным оптическим данным, может заменять обычно используемый наклон, полученный из магнитных измерений. Насколько полноценна такая замена? В последних периодах результаты выглядят более убедительно и это, скорее всего, не случайно. Мы отдельно, но таким же образом, проанализировали период 04.1981-12.1989, когда данные о наклоне гелиосферного токового слоя, полученные различными способами, перекрывались. Коэффициент корреляции с вариациями КЛ для η_m оказался $\rho = 0.93$ при $\sigma = 2.37$, тогда как для $\eta_{H\alpha}$ были

получены следующие величины $\rho = 0.89$ и $\sigma = 2.93$. Разница, определенно, в пользу η_m , хотя и при использовании оптических наблюдений получаются удовлетворительные результаты. На основе полученных свидетельств можно утверждать, что оптические наблюдения способны дать достаточно удачную и оправданную замену данным о наклоне гелиосферного токового слоя и их можно рекомендовать в те периоды, когда нет прямых магнитных наблюдений.

Полученные результаты подтверждают, что достаточно тесная корреляция долговременных вариаций КЛ наблюдается как при отрицательной (60-е и 80-е гг.), так и при положительной полярности глобального магнитного поля Солнца [7]. Начиная с 20-го цикла солнечной активности мы видим ясное чередование больших (при отрицательной полярности) и малых коэффициентов регрессии. При переходе к отрицательной полярности величина коэффициента b увеличивается более чем вдвое. Период 50-х годов был не полным и использованные данные в это время были наименее достоверны. В 50-е годы не было спутниковых и стратосферных наблюдений КЛ и до 1957 г. работало только несколько нейтронных мониторов. Из-за этого точность определения характеристик жесткого спектра вариаций КЛ не могла быть в эти первые годы достаточно высокой. Качество оптических солнечных данных в пятидесятые и шестидесятые годы было ниже, чем для последующих годов. Этот период, по-видимому, нуждается в дополнительном анализе, основанном на пересмотре экспериментальных данных.

4. МОДЕЛЬ С ДВУМЯ ИНДЕКСАМИ И МОДУЛЯЦИЯ КЛ ПРИ ВЫСОКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Полученное нами описание наблюдаемых вариаций КЛ является довольно грубым и приближительным. Иначе и не могло быть. Модуляция КЛ - это сложное явление, происходящее во всей гелиосфере и зависящее от многих факторов. Никакой, даже самый лучший, солнечный индекс в одиночку не в состоянии объяснить вариации КЛ. В работе [9] предложено многопараметрическое описание долгопериодных вариаций КЛ и показано, что для такого описания очень эффективно использовать вместе с наклоном гелиосферного токового слоя изменения напряженности межпланетного магнитного поля. Влияние напряженности ММП на модуляцию КЛ еще легче обосновать теоретически, чем влияние наклона гелиосферного токового слоя и эти два параметра действительно удачно дополняют друг друга. Может быть, дело еще и в том, что наклон гелиосферного токового слоя говорит об устройстве гелиомагнитосферы, а напряженность ММП ко-



Рис. 2. Периоды изменения полярности, полученные из различных данных на фотосфере и поверхности источника солнечного ветра [25]. B_r и B_l компоненты магнитного поля (радиальная и по лучу зрения).

личественно характеризует ее способность воздействовать на КЛ. Однако при использовании данных ММП всегда существует по меньшей мере одно сомнение: могут ли доступные нам сейчас измерения ММП у Земли достаточно хорошо характеризовать изменения магнитных полей во всей гелиосфере, где происходит модуляция КЛ. Поэтому появляется желание найти другой параметр, который также хорошо дополняет наклон гелиосферного токового слоя, но, в отличие от напряженности ММП, является более глобальным. Таким солнечным индексом могло бы быть магнитное поле Солнца как звезды, но, возможно, более последовательно искать этот параметр на поверхности источника, там же, где определяется наклон гелиосферного токового слоя. В качестве такой характеристики мы рассмотрели в [13] напряженность радиальной составляющей B_r магнитного поля, усредненную по всей поверхности источника: $B_{ss} = \sqrt{B_r^2}$. Выбор этой величины связан с результатами, полученными при исследовании солнечного магнетизма в последние годы. Поскольку магнитное поле на поверхности источника, в первую очередь, определяется дипольной составляющей магнитного поля Солнца, эта величина ведет себя сходным образом с дипольным моментом в разложении магнитного поля на поверхности источника (см. рис. 5 в [22]). Для объяснения аномальных вариаций КЛ в 1982 г. в [3 и 23] привлекалось дипольное поле Солнца. Исходя из выводов работы [22], можно предположить, что необычные вариации КЛ в 1991 г. объясняются аналогично. С другой стороны, изменения B_{ss} должны быть похожи на изменения магнитного потока, важность учета которых - основное заключение работы [24]. На рис. 1 приведены долговременные вариации B_{ss} , определенные из магнитных измерений, для 1963-2000 гг. Данные получены из наблюдений магнитного поля Солнца на обсерваториях Маунт Вильсон, Кит Пик и

Стэнфорд и обработаны с помощью методики, аналогичной [1]. Метод расчета описан в [11 и ссылки к ней], для этой работы он был несколько усовершенствован по сравнению с расчетами B_{ss} , представленными в [14]. Теперь мы должны изменить выражение (1) следующим образом:

$$\delta(t) = a + \frac{b_\eta}{\tau_{\eta\eta} + 1} \sum_{\tau=0}^{t_{\eta\eta}} \eta(t - \tau) + \frac{b_B}{\tau_{BB} + 1} \sum_{\tau=0}^{t_{BB}} B_{ss}(t - \tau). \quad (2)$$

Для периода 10.1981-08.1990, приблизительно совпадающего с периодом отрицательной полярности глобального магнитного поля Солнца, методом наименьших квадратов получены следующие параметры: $a = 8.1 \pm 1.4$, $b_\eta = -0.33 \pm 0.01\%/^\circ$, $b_B = -1.1 \pm 0.2\%/мкТл$, $\tau_{\eta\eta} = 4$ месяца, $\tau_{BB} = 8$ мес. При этих параметрах достигается очень хорошее согласие наблюдаемых и рассчитанных вариаций КЛ (коэффициент корреляции 0.96). Такое согласие уже нельзя назвать грубым. В этом случае модель достаточно хорошо описывает не только общий ход вариаций КЛ, но и многие детали. Согласие удивительное для такой заведомо упрощенной модели. Она описывает вариации КЛ в такой сложный период лучше, чем модели со значительно большим числом параметров, предложенные в [3,9]. Необходимо отметить, что вариации B_{ss} , взятые сами по себе, очень плохо коррелируют с вариациями КЛ. Однако объединение этого индекса с наклоном гелиосферного токового слоя парадоксальным образом меняет его возможности. В сочетании с изменениями η изменения B_{ss} не только участвуют в контроле вариаций КЛ, но и играют в этом процессе (по крайней мере в 80-х годах) ведущую роль. Применение модели (2) к другим периодам также дало хорошие результаты, в том числе и в годы вблизи максимумов солнечной активности, самые трудные периоды для моделирования модуляции КЛ. Предложенная модель описывает их лучше, чем другие модели, но и она пока далека от совершенства.

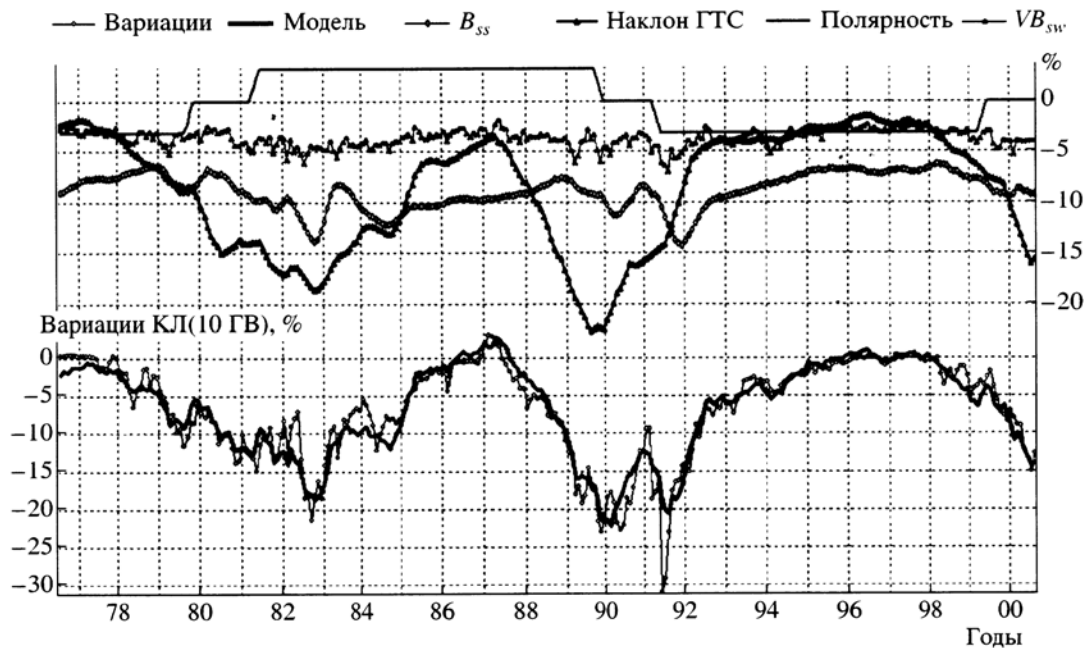


Рис. 3. Наблюдаемые и рассчитанные по модели среднемесячные вариации КЛ в 1976—2000 гг. (нижняя часть). На верхней части - вклады в рассчитанную вариацию от изменений B_{SS} , η , ρ и параметра $|B_{МП}| V_{sw}$.



Рис. 4. Долгопериодные изменения среднего магнитного поля на поверхности источника, полученные из магнитных измерений (B_{SSM}) (жирная кривая) и оптических наблюдений в линии H_{α} ($B_{SS}H_{\alpha}$) (тонкая кривая). В верхней части - изменения среднемесячной напряженности межпланетного магнитного поля $B_{МП}$, измеренного около Земли (OMNI Data).

5. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДУЛЯЦИИ КЛ

В двух предыдущих разделах обсуждалось моделирование модуляции КЛ с помощью одного или двух индексов солнечной активности. Такие модели пригодны для отдельных временных интервалов с одним и тем же знаком глобального магнитного поля Солнца. Полная модель, подходящая для более широких временных интервалов

(желательно, для любого произвольного периода) должна включать в себя большее число параметров и обязательно информацию об изменениях полярности глобального поля на Солнце. Далее мы рассмотрим модуляцию КЛ за весь период 07.1976-08.2000, в который имеется однородный ряд характеристик магнитного поля на поверхности источника, полученных из магнитных и оптических наблюдений. Указанный период содержит

в себе три переполосовки. Влияние гелиомагнитной полярности на КЛ учитывалось с помощью вспомогательной функции $p_S(\tau)$, принимающей значения ± 1 для положительной и отрицательной полярности и 0 в периоды переполосовки. Кроме того, с помощью другой функции $p_F(\tau)$, полученной из фотосферных наблюдений, учитывалось влияние изменения наклона гелиосферного токового слоя на КЛ в зависимости от полярности крупномасштабного поля Солнца. Одна из особенностей определения этих вспомогательных функций в том, что периоды инверсии в настоящее время определяются из различных солнечных наблюдений и они существенно отличаются друг от друга. Для того, чтобы понять, как отключаются КЛ на инверсии поля на Солнце, нам пришлось проводить моделирование для разных временных границ этих периодов, полученных из разных экспериментальных наблюдений (рис. 2). Были использованы оптические и магнитные данные определения полярности на фотосфере и на поверхности источника, данные наблюдений полярного поля по лучу зрения и поля, определенного в радиальном направлении. Расчеты, проведенные в [25] показали, что магнитное поле на поверхности источника изменяет знак раньше, чем на фотосфере. Оказалось, что поведение КЛ лучше коррелирует с изменением полярности магнитных полей на поверхности источника, а не на фотосфере. Наилучшие результаты получены при использовании полярности магнитных полей, полученной из H_α наблюдений на поверхности источника – $P_{H\alpha ss}$ именно для следующих границ инверсий: 09.1979-03.1981, 10.1989-03.1991 и 04.1999.

Долговременные вариации СВ в предлагаемой модели описаны с помощью параметра $|B_{ММП}| V_{св}$ - произведения модуля напряженности ММП на скорость СВ. Дополненная в соответствии с вышеизложенным модель вариации выглядит так:

$$\delta(t) = a + \frac{b_\eta}{\tau_{\eta 1} + 1} \sum_{\tau=0}^{\tau_{\eta n}} (1 + b_{\eta p} p_F(t - \tau)) \eta(t - \tau) + \frac{b_B}{\tau_{uB} + 1} \sum_{\tau=0}^{\tau_{uB}} B_{ss}(t - \tau) + \frac{b_p}{\tau_{up} + 1} \sum_{\tau=0}^{\tau_{up}} p_S(t - \tau) + \frac{b_{BV}}{\tau_{uBV} + 1} \sum_{\tau=0}^{\tau_{uBV}} (BV)(t - \tau). \quad (3)$$

Это описание отличается от модели, предложенной ранее в [9] тем, что место модуля ММП занимает здесь B_{ss} . Рис. 3 демонстрирует хорошее согласие (коэффициент корреляции 0.95) наблюдаемых и рассчитанных вариаций, как в целом, так и во многих деталях. Эти расчеты соответству-

ют следующим значениям параметров: $a = 14.9 \pm 0.1$, $b_\eta = -0.224 \pm 0.009\%/^\circ$, $b_{\eta p} = -0.49 \pm 0.05$, $b_B = -1.27 \pm 0.15\%/мкТл$, $b_p = -3.2 \pm 0.6\%$, $b_{BV} = -2.6 \pm 0.8\%$, $\tau_{\eta n} = \tau_{uB} = 7$ мес, $\tau_{up} = 2$ мес, $\tau_{uBV} = 0$. Характеристики магнитного поля на поверхности источника (структурная - наклон гелиосферного токового слоя и количественная - среднее поле B_{ss}) дополняют друг друга в описании вариаций КЛ: изменения наклона гелиосферного токового слоя контролируют долгопериодную часть вариаций, тогда как с поведением B_{ss} связаны короткопериодические вариации. Соответственно, наклон гелиосферного токового слоя играет главную роль в периоды низкой и умеренной солнечной активности и уступает место B_{ss} вблизи максимумов солнечных циклов. Характеристики СВ, определенные у Земли (BV-параметр) дают вклад в самую короткопериодическую часть модуляции КЛ при нулевом запаздывании модуляции ($\tau_{uBV} = 0$). Влияние локальных параметров СВ в нашей модели носит второстепенный характер. Влияние полярности, напротив, очень важно. В периоды отрицательной полярности ($qA < 0$) плотность КЛ увеличивается на $\sim 3\%$, а при ($qA > 0$) уменьшается на ту же величину. Этот эффект по знаку согласуется с дрейфовой моделью и по величине соответствует разнице потенциала между низкоширотной частью гелиомагнитосферы и ее полярной частью [26].

Сопоставление полученных результатов с более ранними из работы [27] показывает, что замена модуля ММП на B_{ss} не только возможна, но даже улучшает качество модели в периоды высокой солнечной активности. Из общих соображений понятно, что межпланетное магнитное поле должно быть связано с полем на поверхности источника. Однако на деле связь между B_{ss} и модулем ММП, измеряемым у Земли (рис. 4), не такая уж тесная (коэффициент корреляции 0.52 для периода 05.1976-10.1999). Поэтому выявленную взаимозаменяемость $B_{ММП}$ и B_{ss} в моделях модуляции не следует считать тривиальным фактом.

Сейчас принято думать, что в периоды высокой солнечной активности определяющее значение для модуляции КЛ имеют расширяющиеся в солнечном ветре магнитные оболочки [18, 28]. Мы не склонны считать, что выявленная тесная корреляция между магнитным полем на поверхности источника и модуляцией КЛ вступает в противоречие с общепринятой концепцией. Ясно, что связь солнечных полей с межпланетными полями, вообще, и с крупными возмущениями солнечного ветра, в частности, все еще недостаточно изучена, и именно на поверхности источника следует искать важнейшее звено этой связи. Мы сделали попытку распространить тот же подход на более ранний период, используя $(B_{ss})_{H\alpha}$, усредненное по поверхности источника магнитное по-

ле, рассчитанное по косвенным оптическим данным. Однако явной связи между поведением этой величины и модуляцией КЛ выявить не удалось. Дело в том, что $(B_{ss})_m$ и $(B_{ss})_{H\alpha}$ (рис. 4) существенно отличаются физически. В $(B_{ss})_m$ значительный вклад вносят локальные составляющие магнитного поля Солнца и его секториальная структура, в то время как $(B_{ss})_{H\alpha}$ определяет почти исключительно глобальное поле и его зональные компоненты [11]. Рис. 4 показывает, что при совпадении некоторых черт (например в 1982 г.) долгопериодное поведение $(B_{ss})_m$ и $(B_{ss})_{H\alpha}$ существенно различается. Нам представляется, что полученный отрицательный результат позволяет сделать важный вывод. Локальные солнечные магнитные поля не только выходят на поверхность источника, но и играют важную роль в формировании гелиомагнитосферы и в глобальной модуляции космических лучей.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наклон гелиосферного токового слоя, определенный по оптическим данным, можно использовать в исследованиях модуляции КЛ. Хорошая связь долгопериодных вариаций КЛ с изменениями наклона гелиосферного токового слоя существует во все периоды одинаковой гелиомагнитосферной полярности, начиная с 1953 г. (т.е. во все время наземных наблюдений КЛ нейтронными мониторами).

При моделировании долговременной модуляции КЛ необходимо учитывать как прямое воздействие полярности глобального магнитного поля Солнца на КЛ, так и косвенное влияние полярности на модуляцию КЛ, связанную с изменением наклона токового слоя. Показано, что поведение КЛ лучше коррелирует с изменением полярности магнитных полей, полученным из $H\alpha$ наблюдений на поверхности источника, чем с инверсией поля на фотосфере.

Локальные составляющие магнитного поля Солнца и его секториальная структура участвуют в формировании гелиомагнитосферы и играют важную роль в модуляции КЛ.

Объединение характеристик глобального магнитного поля Солнца, определенных для поверхности источника, позволяет создать модель модуляции, хорошо описывающую долгопериодные вариации КЛ в последние 25 лет.

Работа выполнена при поддержке федеральной программы "Астрономия" и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16992, 02-02-16199, 01-02-17580).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hoeksema J.T., Sherrer P.H.* The solar magnetic field - 1976-through 1985. Report UAG-94. WDC-A for Solar Terrestrial Physics. 1986.
2. *Мухайлуца В.П.* О характере влияния долгопериодной и широтной компонент магнитного поля Солнца на поток галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30. № 6. С. 893-897.
3. *Nagashima K., Fujimoto K., Tatsuoka R.* Nature of solar-cycle and heliomagnetic-polarity dependence of cosmic rays, inferred from their correlation with heliomagnetic spherical surface harmonics in the period 1976—1985 // Planet Space Sci. 1991. V. 39. № 12. P. 1617-1635.
4. *Jokipii J.R., Thomas B.T.* Effects of drift on the transport of cosmic rays. Modulation by a wavy interplanetary current sheet // Astrophys. J. 1981. № 243. P. 1115-1122.
5. *Smith E.J., Thomas B.T.* Latitudinal extent of the heliospheric current sheet and modulation of galactic cosmic rays // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № A3. P. 2933-2942.
6. *Webber W.R., Potgieter M.S., Burger R.A.* A comparison of prediction of a wave neutral sheet drift model with cosmic ray data over a whole modulation cycle: 1976-1987 // Astrophys. J. 1990. V. 349. № 2. P. 634-640.
7. *Belov A.V., Gushchina R.T., Sirotina V.* Long term cosmic ray variations and their relation with solar activity parameters // Proc. 24-th ICRC. Roma. 1995. V. 4. P. 542-546.
8. *Bazilevskaya G.A., Svirzhevskaya A.K.* On the stratospheric measurements of the cosmic rays // Space Sci. Rev. 1998. V. 85. P. 431-521.
9. *Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G.* On connection of cosmic ray long term variations with solar — heliospheric parameters // Proc. 26-th ICRC. 1999. V. 7. P. 175-179.
10. *Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.Б., Герасимова С.К. и др.* Модуляция космических лучей гелиосферным нейтральным слоем // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001. Т. 41. № 4. С. 444-449.
11. *Obridko V.N., She I ting B.D.* Structure of the heliospheric current sheet as considered over a long time interval (1915-1996) // Solar Physics. 1999. V. 184. P. 187-200.
12. *Ванярха Н.Я.* Восстановление конфигурации гелиосферного токового слоя по геомагнитным данным с 1926 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1995. Т. 35. № 1. С. 133-138.
13. *Belov A.V., Gushchina R.T., Sirotina V.* The spectrum of cosmic rays variations during 19-22 solar cycles. 1993 // Proc. 23-rd ICRC. Calgary. V. 3. P. 605-609.
14. *Белое А.В., Гущина Р.Т., Обридко В.Н., Харушладзе А.Ф., Шельтинг Б.Д., Янке В.Т.* О связи долгопериодной модуляции космических лучей со скоростью солнечного ветра и характеристиками магнитного поля Солнца // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 3. С. 360-364.
15. *Hoeksema J.T.* <http://quake.stanford.edu/~wso> (courtesy of J.T. Hoeksema). 2000.

16. Белов А.В. Модуляция космических лучей в гелиосфере // Тр. конф. по космич. лучам. 2000. Дубна. С. 65-84.
17. Kota /., Jokipii J.R. Effects of drift on the transport of cosmic rays. A three-dimensional model including diffusion // *Astrophys. J.* 1983. V. 265. P. 573-581.
18. Свиржевская А.К., Свиржевский З.С., Стожков Ю.М. Скачкообразные изменения интенсивности ГКЛ в 11-летнем цикле солнечной активности и их связь с полярностью гелиосферного магнитного поля // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2001. Т. 65. № 3. С. 356-359.
19. Richardson J.D., Paularena K.I., Wang C. The solar wind in the outer heliosphere // *Solar Wind Nine*. 1999. P. 183-188.
20. Kalinin M.S., Krainev M.B. On the GCR intensity during minima of solar activity // *Proc. 21-st ICRC*. 1990. V. 6. P. 25-28.
21. McCracken K.G., McDonald F.B. The long term modulation of the galactic cosmic radiation // *Proc. 27-th ICRC*. 2001. V. 9. P. 3753-3756.
22. Wang Y.-M., Lean J., Sheeley N.R. Jr. The long-term variation of the Sun's open magnetic flux // *Geophys. Res. Letters*. 2000. V. 27. № 4. P. 505-508.
23. Bazilevskaya G.A., Svirzhevsky N.S., Stozhkov Yu.L., Gorchakov E.V., Okhlopkov V.J., Okhlopkova L.S. Modulation features of galactic cosmic rays in 1982 // *Proc. 21-st ICRC*. 1990. V. 6. P. 29-32.
24. Cane H.V., Wibberenz G., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T. Cosmic ray modulation and the solar magnetic field // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 565-569.
25. Obridko V.N., Shelting B.D. Sign reversal during a solar cycle as inferred from the global magnetic field data // Тр. Международной конф. "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля". ГАО РАН. Пулково. С.-Петербург. 2001. P. 391-398.
26. Jokipii J.R., Levy E. Electric field effects on galactic cosmic rays at the heliosphere boundary // *Proc. 16-th ICRC*. 1979. V. 3. P. 52-56.
27. Белов А.В., Веселовский И.С., Гущина Р.Т., Дмитриев А.В., Панасенко О.А., Суворова А.В., Янке В.Т. Связь долгопериодных вариаций космических лучей с магнитным полем на Солнце и в солнечном ветре // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1999. Т. 63. № 8. С. 1606-1610.
28. Burlaga L.F., McDonald F.B., Ness R. Cosmic ray modulation and the distant heliomagnetic field: Voyager 1 and 2 observations from 1986 to 1989 // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 1-11.