

УДК 524.1-352

ЭКСТРЕМУМЫ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЯТИ ПОСЛЕДНИХ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2012 г. Р. Т. Гущина, А. В. Белов, В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг

ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, РАН г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: rgus@izmiran.ru

Поступила в редакцию 29.09.2010 г.

После доработки 27.07.2011 г.

На основе наблюдений долговременных вариаций галактических космических лучей на Земле и в околоземном пространстве определена их модуляция в 19–23-м циклах солнечной активности. Проведен анализ экстремальных значений долговременных вариаций космических лучей, полученных из данных непрерывного наземного и околоземного мониторинга космического излучения в пяти последних циклах солнечной активности. Результаты сравниваются с экстремумами в характеристиках магнитных полей Солнца и чисел солнечных пятен в этих циклах. Обсуждаются сходства и отличия модуляции космических лучей в различных циклах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Более полувека назад Форбуш [Forbush, 1954] установил связь наблюдаемого потока космических лучей (КЛ) с солнечной активностью (СА). Сегодня этот факт подтвержден результатами многолетних наблюдений Солнца, различных гелиосферных характеристик, в числе которых и наблюдения КЛ на Земле и в космосе. Условия для наблюдений галактических КЛ и исследования их долговременных вариаций особенно благоприятны на Земле: наблюдения КЛ проводятся на одном и том же расстоянии от Солнца, в одном и том же диапазоне гелиоширот и проводятся они уже в течение 60-ти лет фактически одними и теми же приборами – нейтронными мониторами (НМ). Мировая сеть станций, оснащенных НМ, ведет регистрацию КЛ при особо стабильных условиях, недоступных для других видов наблюдений КЛ. Основная особенность длинных однородных рядов данных КЛ очевидна: циклы СА хорошо видны во временном ходе КЛ и, если бы не было наблюдений Солнца, о солнечной цикличности и ее главных периодах было бы известно из наблюдений вариаций КЛ. В настоящее время эти ряды включают пять полных 11-летних циклов СА и три солнечных 22-летних магнитных цикла, которые являются главной особенностью долговременных вариаций КЛ.

Долговременные вариации КЛ являются интегральной характеристикой электромагнитных условий в межпланетном пространстве. Одним из способов, предназначенных для понимания процесса модуляции КЛ электромагнитными полями гелиосферы, является его моделирование. С этой же целью используются и другие методы, в частности, изучаются изменения энергетического

спектра вариаций КЛ от года к году внутри цикла и от цикла к циклу, позволяющие судить о временных процессах, происходящих в межпланетном пространстве, решаются уравнения модуляции и т.д. Но моделирование (другими словами, эмпирическое описание модуляции КЛ с помощью различных солнечно-гелиосферных индексов) применяется, пожалуй, наиболее широко. На этом подходе к изучению долговременных вариаций КЛ основана и предлагаемая работа.

Целью работы является исследование долговременной модуляции КЛ в пяти последних циклах СА (19–23-й) с помощью средних и экстремальных значений вариаций, полученных из непрерывного наземного и околоземного мониторинга космического излучения. Полученные изменения экстремумов КЛ и экстремальных величин модуляционных характеристик, определенных из данных наблюдений различных проявлений СА, позволяют достаточно наглядно сравнить циклы, рассмотреть особенности вариаций КЛ в минимумах и максимумах СА, отметить похожесть циклов и попытаться установить причину их отличий между собой.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

Спектр долговременных вариаций КЛ рассчитан по предложенной нами модели жесткостной зависимости вариаций [Belov et al., 1993] для 1953–2009 гг. на основе всей имеющейся в настоящее время информации об интенсивности космического излучения, полученной при его регистрации наземной сетью НМ и при зондировании стратосферы [Стожков и др., 2007]. Сначала вычисляются среднемесячные вариации КЛ (к 1976 г.) и выбираются наибольшее (наименьшее) значения

вариации в каждом цикле. Для анализа использованы полученные при вычислениях экстремальные значения среднемесячных и годовых вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ (A_{10}) (вариации в % относительно 1976 г.). В данном исследовании, которое продолжает ряд наших работ (например, [Белов и др., 2002; Гущина и др., 2008; Belov et al., 2001; 2005]), используются результаты описания модуляции КЛ с помощью многопараметрической модели, в которой характеристики СА линейно связаны с амплитудой вариаций КЛ. В настоящее время хорошо известно, что 11-летние циклы, являясь основными для всех процессов солнечной деятельности, отличаются по фазе и локализации на поверхности Солнца. По характерным масштабам условно эти процессы и явления можно разделить на локальные и глобальные. К первым из них можно отнести солнечные пятна, активные области и происходящие в них вспышки. Ко вторым — полярные и крупномасштабные магнитные поля, корональные дыры и корональные выбросы массы [Плазменная ..., 2008]. Поскольку наблюдаемые у Земли вариации КЛ есть интегральный результат многочисленных солнечных явлений, то достоверная модель долговременных вариаций КЛ должна объединять по меньшей мере несколько солнечных индексов. В проводимом анализе в качестве одной из характеристик локальных явлений на Солнце использован классический индекс СА — число солнечных пятен W , на основе которого в солнечной физике принято деление на циклы. В качестве показателей глобальных процессов на Солнце выбраны характеристики крупномасштабных и полярных магнитных полей Солнца, среднегодовые и среднемесячные значения которых рассчитаны на поверхности источника солнечного ветра. Выбор параметров солнечного магнитного поля для эмпирического описания циклов в КЛ обоснован в работах [Белов и др., 2002; Гущина и др., 2008; Belov et al., 2005]. В них с этой целью предложены структурная характеристика глобального поля — наклон гелиосферного токового слоя (α) и количественные характеристики — интегральный энергетический индекс (B_{ss}) совместно с величиной и направлением полярных полей на Солнце (H_{pol}). Характеристики поля рассчитываются из результатов прямых наблюдений в солнечных обсерваториях с 1976 г., поэтому применение таких данных ограничено довольно узкими временными рамками (последние три цикла СА). Эти ограничения удается частично преодолеть с помощью методики [Obidko and Shelting, 1999], позволяющей восстанавливать поле и наклон гелиосферного слоя на поверхности источника по оптическим наблюдениям солнечных волокон в линии $H\alpha$ и определять характеристики поля за длительное время, перекрывающее исследуемый период наблюдений КЛ

(1953–2009 гг.). Кроме того, мы при изучении модуляции КЛ использовали альтернативную методику восстановления наклона гелиосферного токового слоя по данным геомагнитных наблюдений [Ванярха, 1995]. Нами показано [Belov et al., 2001], что для описания модуляции КЛ за длительный период использование комбинированного ряда данных (прямых и косвенных наблюдений солнечных крупномасштабных полей) правомерно. Изменения всех солнечных индексов, полученных с использованием данных об эволюции солнечных магнитных полей и данных о КЛ, отличаются между циклами значительно больше, чем различаются между циклами числа пятен. Причем отличия носят специфический для каждого индекса характер. Так, в частности, в изменениях наклона четко видны особенности 23-го цикла, в изменениях поля H_{pol} — его уменьшение от цикла к циклу, а в вариациях напряженности поля B_{ss} отражены кратковременные увеличения значений в периоды повышенной СА. Это может говорить о том, что числа пятен при описании модуляции КЛ не являются достаточно полной характеристикой СА и должны быть дополнены другими солнечными индексами.

3. ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КЛ И ХАРАКТЕРИСТИК СА

На рисунке 1 приведены временные изменения экстремальных значений среднемесячных вариаций интенсивности КЛ с жесткостью 10 ГВ (A_{10}) в 1953–2009 гг. (a — не сглаженные, b — сглаженные с периодом 12 месяцев) и средние значения вариаций за каждый цикл $A_{10,m}$; c — аналогичный рисунок для сглаженных чисел солнечных пятен W . Изменения величины $A_{10,m}$, которую можно считать характеристикой мощности цикла КЛ, показывают, что каждый цикл индивидуален. Самая глубокая модуляция наблюдается в 22-ом цикле (–7.3%), интенсивность КЛ менее всего подверглась модуляции в 20-ом цикле (–3.1%), а в трех остальных нечетных циклах модуляция последовательно убывает (19-й — –7.0%, 21-й — –6.3% и 23-й — –4.6%). Если сравнить с соответствующими циклами солнечных пятен, то там картина совсем другая. Известно, что самый мощный цикл — в классическом определении цикла по величине W — 19-й. Отметим, что не совпадают по времени и экстремумы этих характеристик, например максимумы циклов. Величина A_{10} максимальна в 1982, 1990 и 2003 гг., а W — в 1979, 1989 и 2000 гг., т.е. запаздывание максимума модуляции КЛ от максимума пятен может быть и 1, и 3 года. Какие солнечные явления в последних пяти циклах СА связаны с подобным поведением средней интенсивности КЛ и ее экстремумов, есть ли в них закономерность? Конечный ответ на

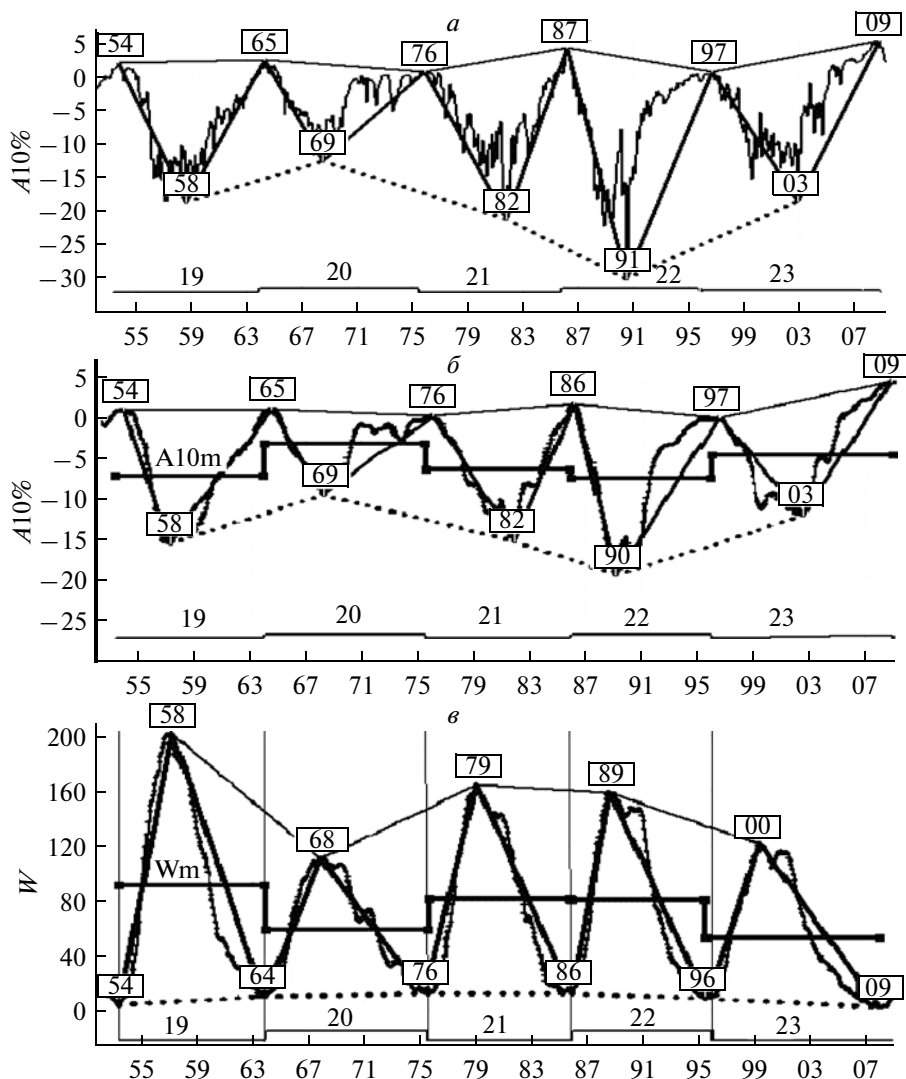


Рис. 1. *a* – среднемесячные вариации КЛ A_{10} (не усредненные), экстремумы минимальных (тонкая сплошная кривая) и максимальных – (пунктирная кривая) величин A_{10} , жирные сплошные кривые – ход A_{10} между экстремумами (схема); *b* – A_{10} -скользящие средние за 12 мес., среднее за циклы A_{10_m} (жирная сплошная с черными прямоугольниками), внизу – длительность 19–23-го циклов; *v* – аналогичные кривые (и обозначения) для W .

этот вопрос сейчас затруднителен. Требуется дополнительный анализ эволюции глобальных циклических процессов в магнитных полях Солнца с учетом таких явлений, как например, циклические изменения корональных дыр. Кроме того, необходим анализ особенностей выхода и распространения солнечного ветра в гелиосфере, т.е. всего того, что воздействует на интегральную характеристику межпланетной среды – среднюю интенсивность космического излучения и ее экстремальные значения.

3.1. ЭКСТРЕМУМЫ КЛ В МИНИМУМАХ ЦИКЛОВ

Из результатов, приведенных на рис. 1, видно, что в поведении экстремумов A_{10} в минимумах

СА проявляется 22-летняя волна, особенно в среднемесячных данных. В среднегодовых данных она также присутствует, но с меньшей амплитудой. В минимумах амплитуда 22-летней волны (остаточная модуляция) КЛ увеличивается от цикла к циклу, возрастая от ~1% в 1954–1976 гг. до ~5% в первой половине 22-летнего цикла, начавшегося в 1997 г. Последний отмеченный период (спад СА в 23-ем цикле) обращает на себя особое внимание. В этом цикле величина восстановленной плотности космического излучения превышает значения всех предыдущих величин, наблюдавшихся в минимумах.

Выявить возможные причины особенностей вариаций КЛ A_{10} в минимумах и максимумах СА попытаемся с помощью анализа временного хода экстремумов солнечных характеристик W (рис. 1*в*), α ,

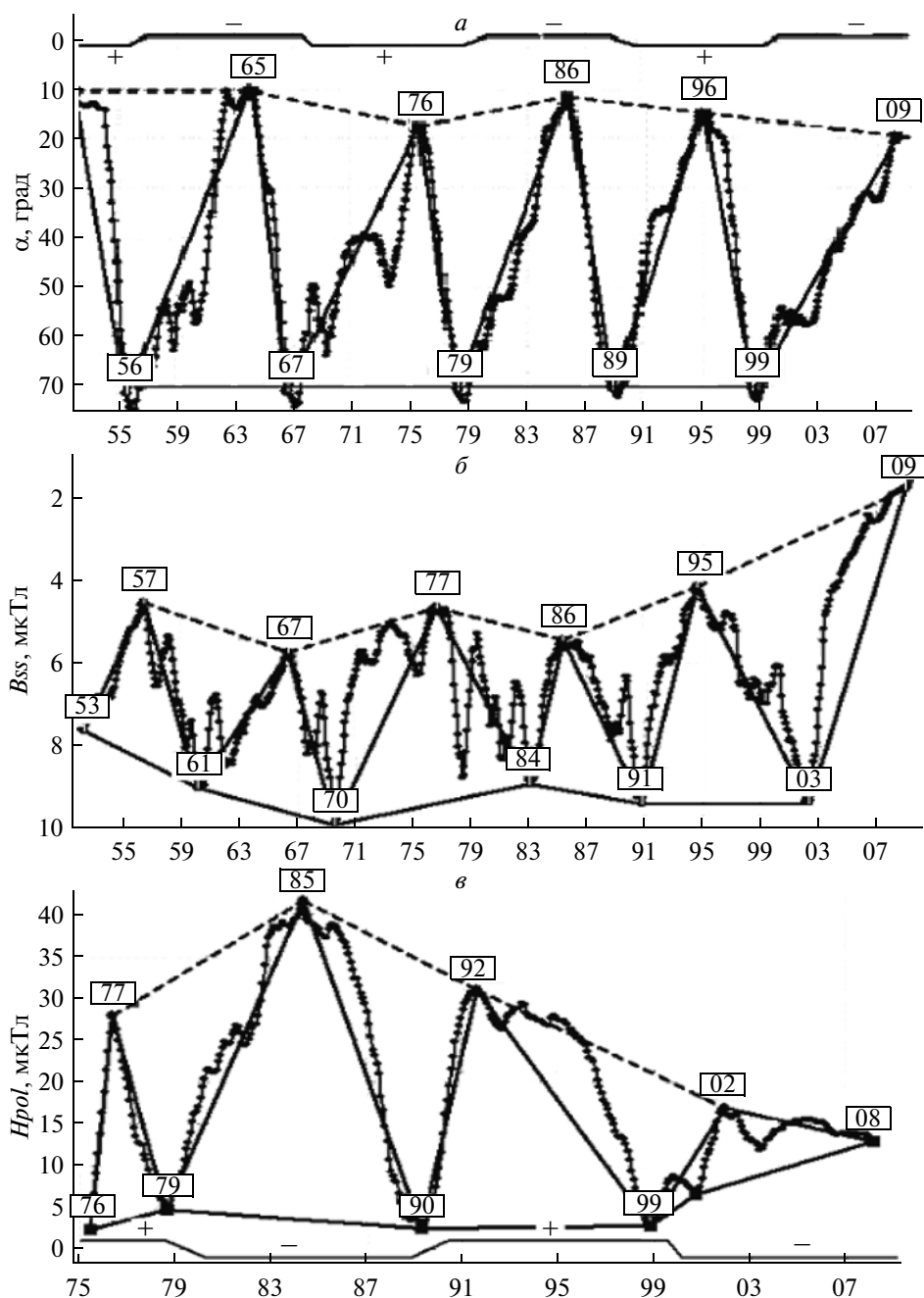


Рис. 2. Временные изменения a – угла наклона α , определенные для периода 1.1953 г.–4.1976 г. по оптическим наблюдениям волокон и рассчитанные с помощью методики [Obridko, Shelting, 1999], для 5.1976 г.–12.2009 г. по прямым наблюдениям магнитного поля, выполненным в обс. Вилкоккс (<http://quake.stanford.edu/~wso>); b – напряженности поля B_{ss} (по данным обсерваторий Вилкоккс и Кит-Пик); $в$ – полярного поля H_{pol} . Обозначения кривых – аналогичны обозначениям рис. 1. На рис. 2а, в – отмечены периоды с положительным (+1), отрицательным (–1) знаком глобального поля на Солнце, между которыми – периоды его инверсии (0).

B_{ss} и H_{pol} (рис. 2а, б, в), т.е. характеристик, с помощью которых ранее нами выполнено модельное описание долговременных вариаций КЛ [Belov et al., 2001; Белов и др., 2002].

При сравнительном анализе изменений минимальных значений КЛ и выбранных солнечных характеристик от цикла к циклу весьма трудно

сделать однозначный вывод, что приводит к 22-летней волне в интенсивности КЛ. Поэтому рассмотрим детально характер связи КЛ с каждым из выбранных индексов СА.

При сопоставлении поведения в минимумах СА амплитуды A_{10} и W можно сказать определен-

но, что за 22-летнюю периодичность КЛ отвечают не числа солнечных пятен (рис. 1б, в).

При установлении связи экстремумов интенсивности КЛ с углом наклона нейтрального токового слоя α (рис. 2а) необходимо помнить, что для 19–20-го циклов определение α выполнено косвенными методами [Obridko and Shelting, 1999; Ванярха, 1995]. Наш анализ был проведен для двух рядов данных о наклоне α . Качество солнечных данных по оптическим наблюдениям волокон в линии $H\alpha$, использованных в работе [Obridko and Shelting, 1999] для этого периода (1953–1976 гг.), было хуже, чем для последующих, и поэтому требуется дополнительное уточнение экспериментальных данных. Тем не менее, для наклона α , полученного по оптическим наблюдениям, можно заключить, что в минимумах экстремумы α изменяются с 22-летней периодичностью в противофазе с КЛ. Методика восстановления наклона по данным геомагнитных наблюдений [Ванярха, 1995] вообще не применима в периоды высокой СА, а достоверность экстремальных минимальных значений α для 1953–1975 гг., полученных с использованием этой методики, вызывает большие сомнения. Рассчитав величину вклада в наблюдаемую модуляцию КЛ от циклических изменений индексов СА, мы обнаружили [Гушина и др., 2010], что вклад в модуляцию (т.е. понижение) КЛ от изменений α в минимумах последних циклов имеет 22-летнюю цикличность. Вклад в модуляцию КЛ в 19, 21, 23-ем циклах (отрицательное направление глобального магнитного поля Солнца, $qA < 0$, и более острая форма вариаций КЛ в минимумах СА) превышает аналогичный вклад в минимумах, имеющих “плоскую” форму (20 и 22-ой циклы, $qA > 0$). Это еще раз на обширном временном интервале подтверждает основы дрейфовой теории и помогает объяснить 22-летнюю модуляцию в минимумах КЛ. Начиная с 2000 г., поле на Солнце $qA < 0$, в эти периоды частицы КЛ дрейфуют с экваториальных районов гелиосферы в полярные, и наклон токового слоя при отрицательном направлении глобального магнитного поля Солнца, $qA < 0$, играет главную роль в модуляции [Крымский и др., 2001]. Однако в 23-ем цикле величина наклона α и вклад от его изменений в общую модуляцию КЛ остается аномально большим до конца 2009 г., что не свойственно для эпохи глубокого минимума СА, в которой мы находились, если определять эпоху по классическому индексу – числу солнечных пятен. Указанное явление – отличительная особенность периода спада активности в 23-ем цикле, отраженная в величине экстремума α в 23-ем цикле.

Средняя напряженность магнитного поля Солнца B_{ss} – интегральный энергетический индекс СА, определенный путем усреднения квадрата радиальной компоненты магнитного поля по сфере фиксированного радиуса, дает информа-

цию обо всем магнитном потоке, проходящем через поверхность источника солнечного ветра. Из работ гелиофизиков [Плазменная ..., 2008] известно, что в цикле СА максимум чисел Вольфа не соответствует максимуму в интегральном энергетическом индексе глобального магнитного поля B_{ss} . Кривая интегрального индекса вблизи фазы максимума имеет характерную двухвершинную форму, при этом локальный провал наблюдается вблизи календарной даты максимума W . Максимум индекса B_{ss} не совпадает ни с максимумом, ни с минимумом локальных полей, поскольку отражает вариации крупномасштабных полей на всех солнечных широтах. В изменениях экстремумов индекса B_{ss} (рис. 2б) в периоды, близкие к минимумам пяти последних циклов СА, можно обнаружить 22-летнюю периодичность, которая совпадает с фазой подобной волны в КЛ (рис. 1б, сплошная тонкая кривая). Когда мы говорим о 22-летней периодичности в изменениях экстремумов индекса B_{ss} , то имеем в виду периоды 1957–1977 гг., 1977–1995 гг. и аномально большое понижение этого индекса в 1995–2009 гг. (первой половине следующего цикла). Особенно сильно временного хода B_{ss} является сильное падение величины этого индекса на спаде 23-го цикла и минимуме 24-го. В этот период вклад в модуляцию КЛ от изменений B_{ss} ниже, чем в соответствующих периодах предыдущих циклов, и можно малую величину остаточной модуляции КЛ в минимуме 24-го цикла частично связать с этим фактом.

Рассматривая связь экстремумов КЛ с экстремальными значениями модуля полярного поля Солнца H_{pol} (рис. 2в) от цикла к циклу, нетрудно увидеть тенденцию к понижению его величины, начиная с 1985 г., и особенно она заметна в 23-ем цикле. Период 1977–1985 гг. (рост H_{pol}) соответствует падению модуляции КЛ в 1976–1987 гг. Факт циклических (с периодом ~22 года) изменений магнитного поля в полярных широтах Солнца известен, начиная с работ Бэбкока [Babcock, 1961]. Напряженность H_{pol} максимальна в эпохи минимума СА, ослабевает к моменту максимума, когда происходит инверсия полярности. В эпохи минимума активности именно полярные области определяют параметры межпланетного магнитного поля вплоть до плоскости эклиптики [Демидов и Григорьев, 2004]. Разумеется, подобное обстоятельство будет влиять на исследуемый в работе интегральный индекс межпланетной среды – плотность КЛ и отражаться величиной вклада (уменьшенного) в модуляцию от изменений H_{pol} в 23-ем цикле. Это следует из совместного анализа временного поведения H_{pol} и A_{10} и подтверждено результатами модельных расчетов в предложенном ранее описании долговременных вариаций КЛ [Belov et al., 2005]. Таким образом, эта солнечная характеристика так же, как и выше

рассмотренные угол наклона токового слоя α и средняя напряженность солнечного магнитного поля B_{SS} может участвовать в создании в 22-летней волны экстремумов КЛ минимумах СА.

Отвечая на вопрос, в каких характеристиках СА видно аномальное поведение в 23-ем цикле, приводящее к необычайно большой плотности КЛ, можно сказать, что это характеристики, связанные со средней величиной поля на Солнце, его структурой, величиной и знаком полярного поля, совместное действие которых приводит к такому результату – большой плотности КЛ.

3.2. ЭКСТРЕМУМЫ КЛ В МАКСИМУМАХ ЦИКЛОВ

В поведении экстремальных значений интенсивности КЛ A_{10} в максимумах СА выявить какую-то закономерность на имеющемся экспериментальном материале (пять циклов) в настоящее время сложно. Это обусловлено изменчивостью активности Солнца от цикла к циклу. Гелиофизики в настоящее время часто говорят о неспособности современных теорий объяснять сильные вариации высоты циклов для одной и той же звезды.

Относительно КЛ можно сказать, что высота циклов во временных изменениях интенсивности КЛ – параметр специфический, характеризующий особенности циклов. При описании долговременных вариаций получено, что в чередовании форм четных (плоские) и нечетных (острые) циклов в минимумах проявляется их схожесть, и это достаточно убедительно отражается в полученной зависимости от направления глобального поля Солнца. Отличия временных изменений на ветвях спада и роста КЛ в циклах вызваны особенностями модуляции в периоды с $qA < 0$ и $qA > 0$ (на рис. 1б это хорошо видно по сглаженным кривым) и объясняется изменением вклада циклических вариаций локальных и крупномасштабных полей в вариации КЛ.

Ранее нами был сделан вывод о том, что изменения наклона токового слоя α в значительной степени контролируют долгопериодную часть вариаций (11-летние циклы и их основные особенности), тогда как с поведением средней напряженности магнитного поля Солнца B_{SS} больше связаны короткопериодические вариации [Белов и др., 2002]. Соответственно, наклон играет главную роль в периоды низкой и умеренной солнечной активности и уступает место B_{SS} вблизи максимумов солнечных циклов. Выявленная нами тесная корреляция между магнитным полем на поверхности источника (B_{SS}) и модуляцией КЛ не вступает в противоречие с существующей концепцией о том, что в периоды высокой СА определяющее значение для модуляции КЛ имеют расширяющиеся в солнечном ветре магнитные

оболочки – ГМИР (GMIRs) [Burlaga et al., 1993; Свирижевская и др., 2001]. Связь солнечных полей с межпланетными полями и с крупными возмущениями солнечного ветра все еще не достаточно изучена, и именно на поверхности источника следует искать важнейшее звено этой связи. Долгопериодные временные изменения магнитного поля на поверхности источника, полученные из магнитных наблюдений (B_{SS-M}) и из оптических наблюдений в линии $H\alpha$ ($B_{SS-H\alpha}$) существенно отличаются. Причина этого различия носит физический характер: в B_{SS-M} значительный вклад вносят локальные составляющие магнитного поля Солнца и его секторная структура, в то время как $B_{SS-H\alpha}$ определяет почти исключительно глобальное поле и его зональные компоненты. Поведение КЛ более тесно связано с переменной знака магнитного поля на поверхности источника солнечного ветра, чем с инверсией на фотосфере. Однако локальные составляющие и секторная структура магнитного поля Солнца (наблюдаемая на фотосфере) участвуют в формировании гелиомагнитосферы и играют важную роль в модуляции КЛ.

Наиболее сложные периоды для описания поведения долговременных вариаций КЛ с помощью индексов СА – это периоды максимальной активности Солнца. Во всех предложенных нами моделях модуляции самое большое расхождение наблюдаемых долговременных вариаций КЛ с ожидаемыми получено в 1991, 1982, 2003, 1959 и 1969 гг., причем такой результат получен для всех вариантов многопараметрического описания вариаций. Эти годы – это периоды экстремальных значений амплитуды A_{10} и одновременно периоды мощных спорадических явлений на Солнце (вспышек и выбросов вещества).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование долговременного поведения КЛ с жесткостью 10 ГВ в последних пяти циклах СА (19–23-й) с помощью средних A_{10_m} и экстремальных A_{10} значений интенсивности КЛ показало следующее.

1. Величины A_{10_m} , будучи характеристикой мощности цикла КЛ, существенно различаются в рассмотренных циклах СА, они могут быть полезным индексом СА. A_{10_m} не совпадают с изменениями средних значений такой характеристики локальных солнечных полей, как числа солнечных пятен в циклах.

2. В минимумах СА в интенсивности КЛ наблюдается 22-летняя волна, амплитуда которой растет от цикла к циклу, достигая наибольшего значения в 23-ем цикле. На основе анализа поведения экстремальных значений модуляционных параметров в циклах и их связи с соответствующими

щими экстремальными значениями вариаций КЛ получено, что в создание 22-летней периодичности в минимумах КЛ вносят свой вклад изменения структурной характеристики крупномасштабного солнечного поля (определяемой через угол наклона токового слоя α) и вариации количественных характеристик (определенных через величину средней напряженности поля – интегральный индекс B_{ss} , а также через изменения величины и знака магнитного поля полярных областей H_{pol}).

3. В поведении экстремальных значений интенсивности КЛ А10 в максимумах существует сложная связь с изменениями в эти периоды соответствующих значений рассмотренных в работе характеристик солнечной циклической деятельности.

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты № 09-02-11145 и 08-02-00070) и Президиуму РАН (Программа ФИ “Нейтринная физика”, N9B) за поддержку этой работы.

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 аэрономия. Т. 42. № 6. С. 727–735. 2002.
- Ванярха Н.Я. Восстановление конфигурации гелиосферного токового слоя по геомагнитным данным // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 1. С. 133–138. 1995.
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Проявления циклических вариаций магнитного поля Солнца в долговременной модуляции космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 5. С. 1–8. 2008.
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Долговременная модуляция галактических космических лучей в минимумах солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т.50. № 4. С. 459–465. 2010.
- Демидов М.Л., Григорьев В.М. Крупномасштабные магнитные поля на Солнце // Солнечно-земная физика. Вып. 6. С. 10–19. 2004.
- Плазменная гелиогеофизика. Ред. Зеленый Л. М. и Веселовский И. С. М.: Физматлит. Т.1. 670 с. 2008.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Мамрукова В.П. Нейтральный слой и дрейф частиц в долгопериодных вариациях космических лучей // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 65. № 3. С. 353–356. 2001.
- Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И. Скачкообразные изменения интенсивности ГКЛ в 11-летнем цикле солнечной активности и их связь с полярностью гелиосферного магнитного поля // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 65. № 3. С. 356–359. 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. Поток 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.
- Babcock H.W. The topology of the Sun’s magnetic field and the 22-year cycle // Ap. J. V. 133. P. 572–587. 1961.
- Belov A.V., Gushchina R.T., Sirofina 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., Shelting B.D., Gushchina R.T., Obriadko V.N. Global magnetic field of the sun and long-term variations of galactic cosmic rays // J. Atmos. Terr. Phys. V. 63. № 18. P. 1923–1929. 2001.
- Belov A.V., Shelting B.D., Gushchina R.T., Obriadko V.N. The relation of the global magnetic solar field indices and the solar wind characteristics with the long-term variations of galactic cosmic rays // Proc. 29th ICRC. V. 2. P. 235–239. 2005.
- 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. V. 98. P. 1–11. 1993.
- Forbush S.E. Worldwide cosmic ray variations, 1937–52 // J. Geophys. Res. V. 59. P. 525–542. 1954.
- Obriadko V.N., Shelting B.D. Structure of the heliospheric current sheet as considered over a long time interval (1915–1996) // Solar Phys. V. 184. № 1. P. 187–200. 1999.