

УДК 524.1-352

НОВЫЙ ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ – ИНДЕКС МЕРЦАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2008 г. В. И. Козлов, В. В. Козлов

Институт космических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск

e-mail: cosmoprognoz@mail.ru

Поступила в редакцию 02.07.2007 г.

После доработки 22.11.2007 г.

Работа посвящена верификации введенного ранее индекса мерцаний космических лучей. Эта операция проходила, в том числе, в рамках многолетнего натурального эксперимента по мониторингу галактических космических лучей (ГКЛ) в режиме реального времени. Использовались пятиминутные данные мировой сети высокоширотных нейтронных мониторов станций Тикси (Апатиты) и Оулу (Финляндия) за четыре последних цикла (20–23), т.е. за весь период их регистрации с высоким пятиминутным разрешением. Установлена связь амплитудно-частотно-временной структуры предвестника в индексе мерцаний ГКЛ с солитоноподобной структурой гелиосферного токового слоя в возмущенный период. Это указывает на когерентную природу предвестника. Только наличие когерентного процесса – квазинедельной вариации – обуславливает принципиальную возможность прогноза гелиосферных бурь. В итоге, по результатам многолетнего мониторинга космических лучей в 23-м цикле получена оценка оправдаваемости оперативного прогноза гелиосферных бурь, которая составляет величину ~80%.

PACS: 94.20.wq

1. ВВЕДЕНИЕ

В основу способа ранней диагностики крупномасштабных магнитных “пробок” в межпланетном магнитном поле положен эффект, обнаруженный в работе [Kozlov et al., 1973]. Суть явления заключается в том, что за сутки до регистрации на Земле крупномасштабного возмущения солнечного ветра высокоширотные нейтронные мониторы регистрируют мерцания небесной сферы в космических лучах – своеобразное “гало” или свечение источника возмущения в “свете” космических лучей.

Посредством обобщения знакопеременного (для шумоподобного процесса) показателя частотного спектра флуктуаций, автором был введен спектрально-временной индекс мерцаний [Козлов и др., 1984]. В результате трехмерный динамический спектр $P(f, t)$ сведен к обычной числовой последовательности: индексу мерцаний ГКЛ в данном случае. Это позволяет применить к индексу мерцаний все известные количественные методы анализа временных рядов [Туголуков и Козлов, 1991, Козлов и Туголуков, 1992; Козлов, 1999].

В отличие от традиционного подхода, значение показателя частотного спектра или количественную оценку линейного тренда мы определяем через суммарное число инверсий (“аномальных” отклонений) амплитуд спектра относительно натурального ряда чисел, точнее, обращенного натурального ряда [Козлов и др., 1984]. Для обра-

щенного натурального ряда чисел (моделирующего распределение амплитуд в спектре принятого за норму) суммарная инверсия равна нулю. Напротив, для обычного натурального ряда суммарная инверсия достигает максимально возможного значения, зависящего от длины ряда (числа гармоник в нашем случае). Значимые изменения показателя спектра флуктуаций – индекса мерцаний ГКЛ, в данном случае, и являются тем искомым полезным сигналом, количественно описывающим характерную динамику флуктуаций интенсивности ГКЛ перед фронтом крупномасштабной “магнитной пробки” до ее регистрации на орбите Земли.

2. МЕТОД

Созданная для раннего обнаружения крупномасштабных “магнитных пробок” в межпланетной среде прогностическая экспертная система “FORSHOCK” состоит из Базы данных “RECORD” [Turpanov et al., 2001] и Базы знаний “КОД” – Корпускулярной Оперативной Диагностики [Козлов и Крымский, 1993; Козлов, 2002]. По пятиминутным данным мировой сети полярных станций космических лучей с шагом 5 мин рассчитывается индекс мерцаний ГКЛ, на основе которого в режиме реального времени и определяется предвестник приближающегося к орбите Земли фронта крупномасштабного возмущения. Результаты мониторинга и оперативного прогноза ежедневно выставляются Арктическим центром космофизиче-

ского прогноза ИКФИА в глобальную сеть Internet <http://ikfia.ysn.ru/fluctuations/index.php> (см. также сайт ИКИ РАН – <http://spaceweather.ru/datasets/>).

База знаний прошла предварительное тестирование на различных контрольных сигналах. Показатель спектра с распределением амплитуд гармоник, моделируемых обращенным натуральным рядом, также как и показатель спектра “белого шума”, по определению, равен нулю. Следовательно, идеальной моделью для калибровки “нуля” индекса мерцаний является спектр дельта-функции (спектр “белого шума”). Таким образом, показатель частотного спектра или индекс мерцаний для спектра дельта-функции равен нулю. Максимальное значение индекс мерцаний (+1) принимает в двух случаях: для идеального сигнала с монотонно растущими амплитудами гармоник спектра (“выстроенных по обратному ранжиру”, по аналогии с натуральным рядом чисел) и для высокочастотного сигнала с минимально возможным периодом – частоты Найквиста. Минимально возможное значение (–1) индекс мерцаний принимает для спектра обычной константы (идеальный сигнал “нулевой” частоты). В итоге традиционный двумерный спектр $P(f)$ сворачивается в единственное значение индекса, а динамический спектр $P(f, t)$ сводится к обычному числовому ряду – индексу мерцаний в интервале $[-1, 1]$.

Альтернативным способом формализации динамики флуктуаций является параметризация гистограмм флуктуаций интенсивности ГКЛ [Козлов и Крымский, 1993]. Как известно, в вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности обобщенная функция распределения Вейбулла описывает выход системы на предельный, критический режим [Айвазян и др., 1983]. Действительно, при больших значениях параметра формы ($\alpha > 1$) критический режим достигается при меньших значениях аргумента (для $\alpha = 1$ распределение Вейбулла переходит в обычное распределение Гаусса). С увеличением параметра формы α коэффициент вариации уменьшается, т.е. интервал времени между отказами системы уменьшается, а сами отказы по мере выхода на критический режим становятся все более и более регулярными [Barsukov et al., 1993].

Параметр формы экспериментальных гистограмм рассчитывался по 7776 точкам пятиминутных значений интенсивности ГКЛ, т.е. за каждый оборот Солнца 23-го цикла. Затем по аналогии с индексом мерцаний ГКЛ параметр формы был усреднен за три солнечных оборота. Сравнение индекса мерцаний и параметра формы показало подобие анализируемых временных рядов с коэффициентом корреляции $R \approx 0.6$ на высоком 99% уровне значимости. В таком случае, достаточно сложную и трудоемкую процедуру расчета параметра формы гистограмм интенсивности

ГКЛ целесообразно заменить простой и настолько же эффективной процедурой расчета индекса мерцаний ГКЛ с не менее простым алгоритмом оценки его уровня значимости.

Полученные значения индекса мерцаний ГКЛ заведомо не являются случайными, причем, на высоком 99%-м уровне значимости. На это указывают результаты аппроксимации экспериментальных гистограмм индекса мерцаний ГКЛ для ст. Оулу за четыре последних 11-летних циклов функцией нормального распределения, т.е. проверки нулевой гипотезы о нормальности распределения индекса мерцаний (рис. 1а,б). Установлено, что на значимом 90%-м уровне принимается гипотеза обобщенного распределения Вейбулла (рис. 1в,г).

3. РАННЕЕ ОБНАРУЖЕНИЕ АКТИВНЫХ ФАЗ 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

На рис. 2 представлены результаты мониторинга галактических космических лучей в текущем 23-м цикле в период 2000–2007 гг. по пятиминутным данным ст. Оулу. Положительные значения индекса мерцаний соответствуют регистрации предвестника активной фазы 11-летнего цикла. Отрицательные значения соответствуют последующей диагностике активного периода. Полученные нами ранее предварительные результаты за 21–22 циклы по пятиминутным данным ст. Тикси показали, что предвестник предшествует регистрации активной фазы, в среднем, на три оборота Солнца. Как следует из представленных результатов, эта зависимость сохраняется и для текущего 23-го цикла. Регистрация предвестников дважды в год соответствует полугодовой вариации. Выявленная нами полугодовая (и годовая) волна связана, скорее всего, с процессом реполюсовки общего магнитного поля Солнца [Kozlov et al., 2003; Markov et al., 2003]. Средний интервал заблаговременности в три оборота Солнца указывает на среднее время выхода активных областей на критический режим (своеобразный “латентный” период). Исходя из этого, усиления солнечной активности ожидалось нами весной и осенью 2001 г., осенью 2003 г., в начале второго полугодия 2004 г., а также во втором полугодии 2005 и 2006 гг., что в дальнейшем и подтвердилось.

Это следует из регистрации глубоких отрицательных, т.е. диагностических значений индекса мерцаний ГКЛ в указанные периоды (рис. 2). Периодичность регистрации диагностических значений индекса мерцаний ГКЛ на ветви спада и в минимуме текущего (23-го) 11-летнего цикла соответствует годовой вариации, что и должно наблюдаться в окрестности минимума солнечного цикла с отрицательной полярностью общего магнитного поля Солнца [Козлов и Марков, 2007]. Это следует также и из теоретической модели 11-

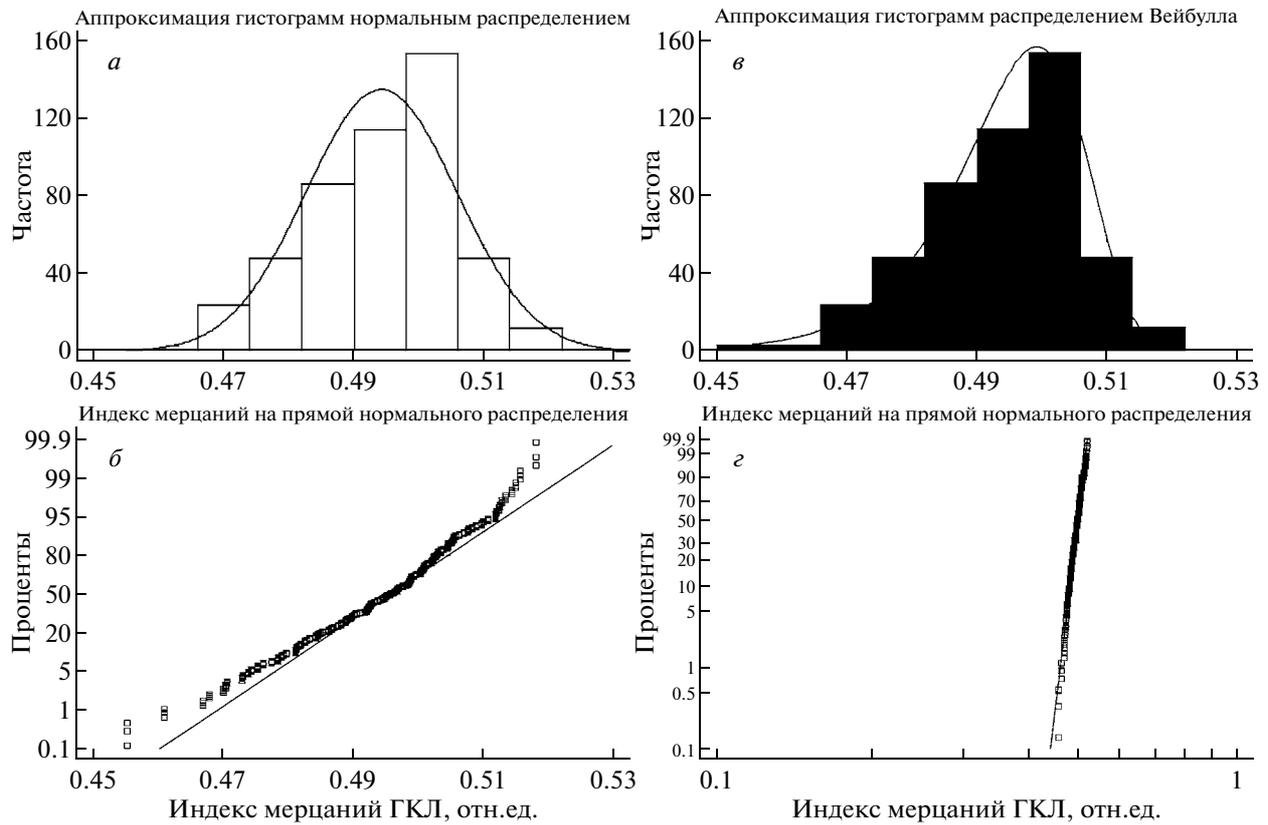


Рис. 1. Результаты проверки нулевой гипотезы о нормальности распределения индекса мерцаний ГКЛ (а, б) и гипотезы о вейбулловском распределении индекса мерцаний (в, г). По оси ординат гистограмм – частота регистрируемых значений индекса мерцаний. По оси абсцисс – 27-дневные значения индекса мерцаний ГКЛ за четыре последних 11-летних циклов (20–23) по данным ст. Оулу.

летнего цикла, развиваемой Г.Ф. Крымским в работе [Крымский и др., 2001].

Моменты регистрации отрицательных значений индекса мерцаний приходятся на периоды регистрации максимальных значений параметров солнечного ветра. Это подтверждается расчетами взаимных корреляционных функций индекса мерцаний ГКЛ и параметров межпланетной среды: дисперсии межпланетного магнитного поля и потока низкоэнергичных протонов (рис. 3). Изменчивость магнитного поля и потоки низкоэнергичных протонов являются наиболее важными параметрами космической погоды с точки зрения их воздействия на системы жизнеобеспечения и человека. В данных предварительно исключен низкочастотный тренд, обусловленный 11-летним циклом. Коэффициент антикорреляции индекса мерцаний ГКЛ и дисперсии межпланетного магнитного поля равен $R(\tau) = -0.79$. Для индекса мерцаний ГКЛ и потока низкоэнергичных протонов с энергией ~ 1 МэВ коэффициент антикорреляции достигает величины $R(\tau) = -0.78$, причем, в обоих случаях на уровне значимости 99%.

Высокие значения коэффициентов антикорреляции на высоком уровне значимости дают ос-

нования считать глубокие и отрицательные значения индекса мерцаний ГКЛ диагностическими. Сама же временная структура взаимных корреляционных функций указывает на достоверность обнаруженных ранее полугодовых (и годовых) вариаций в индексе мерцаний ГКЛ и параметрах солнечного ветра. Наиболее наглядно наличие значимых полугодовых и годовых вариаций видно из результатов вейвлет-анализа взаимных корреляционных функций $R(\tau)$ и их кроссспектров (рис. 4).

4. ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ГЕЛИОСФЕРНЫХ БУРЬ

Результаты оперативного прогноза гелиосферных бурь на примере событий в марте–апреле 2001 г. приведены на рис. 5. Как по амплитуде, так и по частоте событий, исследуемый период относится ко времени экстремальной активности Солнца. Это значительно усложняет задачу прогноза. Тем не менее, индекс мерцаний ГКЛ и в этом случае оказался достаточно эффективным. Так, из 12 зарегистрированных эффектов Форбуша, предикторы были зарегистрированы в 9 событиях, включая наиболее мощные. Только на при-

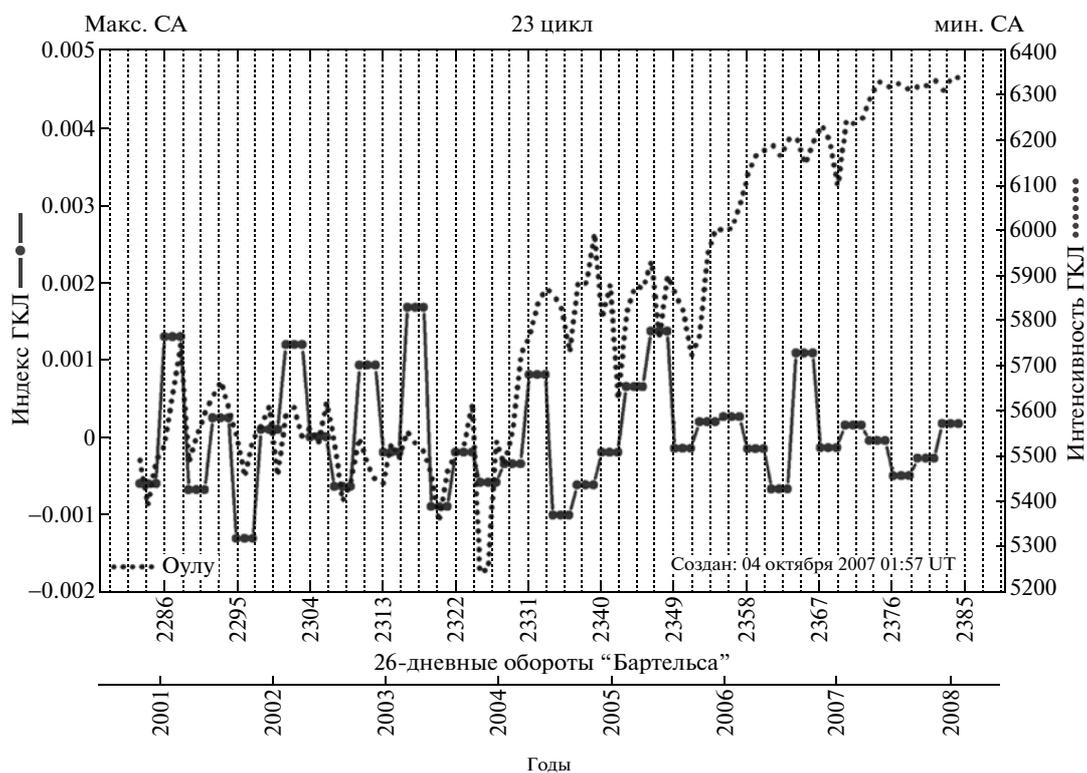


Рис. 2. Усредненные за три солнечных оборота 27-дневные значения индекса мерцаний космических лучей (сплошная кривая – кружки, шкала слева) и интенсивности ГКЛ (штриховая кривая, шкала справа) по пятиминутным данным ст. Оулу за период 2000–2007 гг. По оси абсцисс время: номера солнечных оборотов (по Бартельсу) и годы.

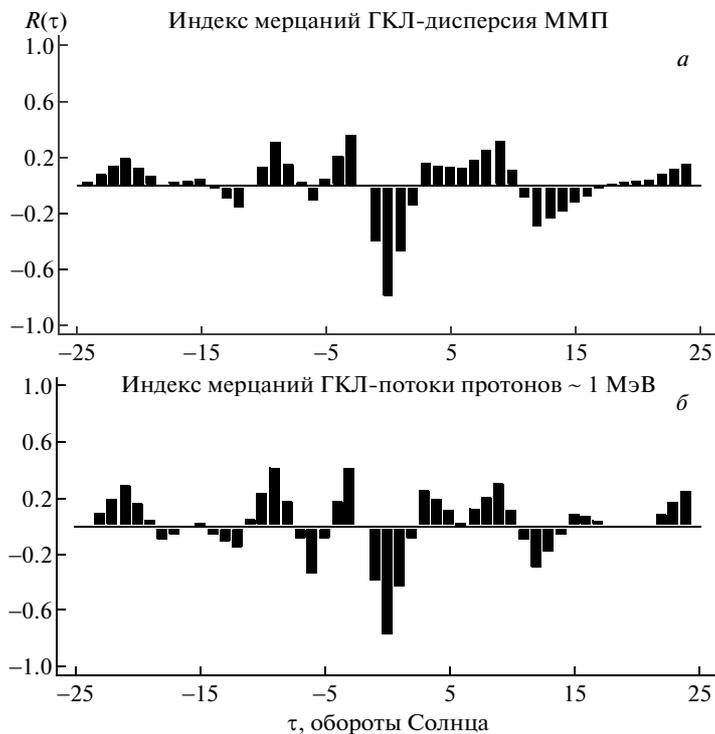


Рис. 3. Результаты расчета взаимных корреляционных функций $R(\tau)$ между 27-дневными значениями индекса мерцаний ГКЛ и дисперсией ММП (а); индексом мерцаний ГКЛ и потоком протонов (б). Предварительно исключен низкочастотный тренд (обусловленный 11-летней вариацией). По оси абсцисс – величина относительного сдвига τ в солнечных оборотах.

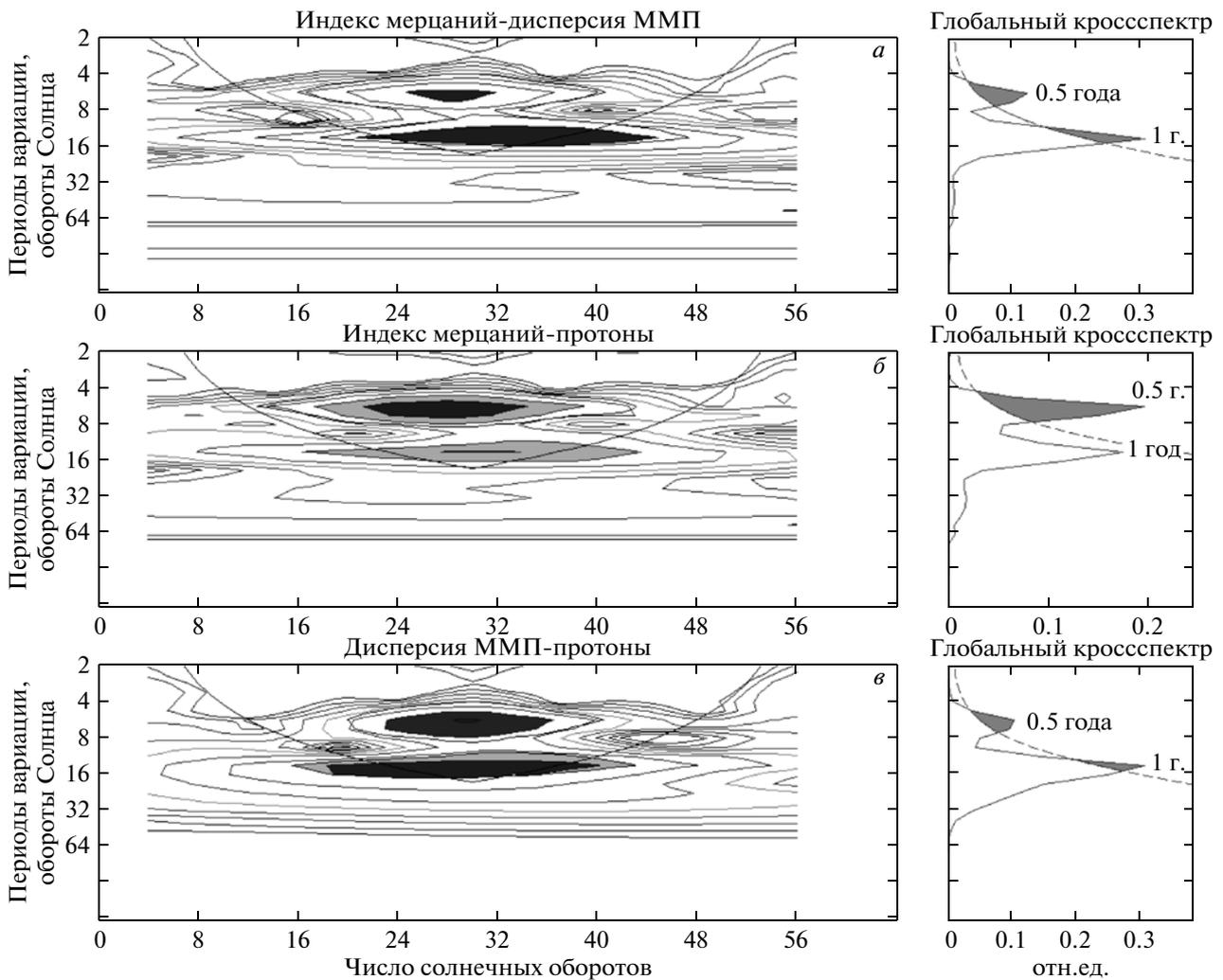


Рис. 4. Вейвлет-диаграммы взаимных корреляционных функций $R(\tau)$ и соответствующие кроссспектры по $R(\tau)$ между индексом мерцаний ГКЛ и дисперсией ММП (а); индексом мерцаний ГКЛ и потоком протонов низкоэнергичных протонов с энергией ~1 МэВ (б); между дисперсией ММП и потоком протонов (с). По оси ординат – периоды вариаций в оборотах Солнца. В правой части рисунка – соответствующие свернутые или глобальные кроссспектры. По оси абсцисс вейвлет-диаграмм – число солнечных оборотов.

мере подобных экстремальных периодов можно получить представление о статистике прогнозов, пропуске “целей” (эффектов Форбуша) и ложных “тревог”.

Для установления природы предвестника необходимо исследовать его амплитудно-частотно-временную структуру. В этой связи важно отметить, что чередование серийных событий в марте-апреле 2001 г. не является случайным, а представляет собой монохроматичный волновой пакет с доминирующей осцилляцией ~3 сут (рис. 6б). Известно, что монохроматичность, является одним из основных свойств группового солитона. Вторым важным проявлением инвариантных свойств солитона является обратная зависимость между его амплитудой и шириной (или периодом солитона). Подобное увеличение амплитуды огибаю-

щей одновременно с уменьшением ее ширины (рис. 6г), отражает эволюцию структуры гелиосферного токового слоя (ГТС): от второй гармоники 27-дневной вариации с известным периодом 13–14 сут, обусловленной очевидно квадрупольной компонентой гелиосферного поля, к квазинедельной вариации – “солитону огибающей”, отражающей мультипольный характер структуры гелиосферного токового слоя в возмущенный период. Это подтверждается результатами вейвлет-анализа. Предшествующая квазинедельной вариации вторая гармоника с периодом 13–14 сут проявилась на вейвлет-диаграмме в виде значимого максимума на рис. 6б.

На рис. 7 приведены результаты оперативного прогноза гелиосферных бурь в наиболее экстремальный период за всю историю современных



Рис. 5. Результаты мониторинга и прогноза в марте–апреле 2001 г. В верхней части приведены усредненные за 12 часов значения индекса мерцаний ГКЛ, рассчитанные по пятиминутным данным высокоширотных станций Апатиты и Оулу. Значимые положительные значения индекса мерцаний ГКЛ – предвестники отмечены сплошными стрелками на 95%-и (тонкими) и 99%-и (жирными) уровнях значимости. Отрицательные значения индекса соответствуют диагностике событий в интенсивности ГКЛ – эффекты Форбуша (приведены в нижней части рисунка). Штриховая стрелка означает пропуск “цели”, точечная – ложную “тревогу”.

наблюдений: с 6 сентября–25 ноября 2003 г. Сдвоенные, т.е. длительные предвестники от 18–20 и 26–27 октября регистрируются нами за сутки до начала мощных эффектов Форбуша 21–22 и 28–29 октября. Предвестник, зарегистрированный 24 октября, не достиг значимого 95%-го уровня. Формально, это и означает пропуск “цели”, т.е. эффекта Форбуша от 25 октября (отмечен вертикальной штриховой стрелкой на рис. 7). Аналогичная ситуация с предвестником наблюдается и 5 ноября. Предвестники на 99%-м уровне значимости зарегистрированы в первой половине суток 2 и 4 ноября 2003 г. Слабая геоэффективность известных событий в начале ноября 2003 г. связана со смещением активной области на западный край лимба. Предвестник на 95%-м уровне значимости наблюдался и перед одной из самых мощных магнитных бурь 20 ноября 2003 г. Регистрация предвестника от 24 ноября связана с вторичным прохождением центрального меридиана Солнца той же активной областью.

Как и в случае возмущения в апреле–мае 2001 г., обращает на себя внимание выраженная монохроматичность вариации индекса мерцаний с октября на ноябрь 2003 г. Это и послужило основанием определить ее как квазинедельную вариацию

(рис. 8б). Второй значимый максимум на вейвлет-диаграмме (и в глобальном спектре – рис. 8в) в конце анализируемого периода соответствует моменту вторичного прохождения этой же активной области по видимой части солнечного диска. Как и в апрельских событиях 2001 г., для квазинедельной вариации с периодом ≈ 7 сут также наблюдается высокая корреляция между индексом мерцаний ГКЛ и параметрами солнечного ветра [Козлов и Марков, 2007]. Огибающая квазинедельной вариации дает наглядное представление о солитоне огибающей или групповом солитоне (заштрихованная область на рис. 8з).

Следует сказать, что солитоноподобный образ (в конфигурационном пространстве амплитуда-время-частота) гелиосферной бури выявлен нами в большинстве экстремальных событий, причем, не только в текущем цикле солнечной активности. Наблюдается лишь некоторый дрейф периода доминирующей гармоники τ по шкале частот или периодов вариаций ($\tau = 5 \pm \Delta 2$ сут). Заметим, что расшифровка не совсем ясного обычно используемого термина – “мультипольной компоненты” структуры ГТС – как квазинедельной вариации или солитона огибающей, оказалась возможной благодаря индексу мерцаний космических лучей.

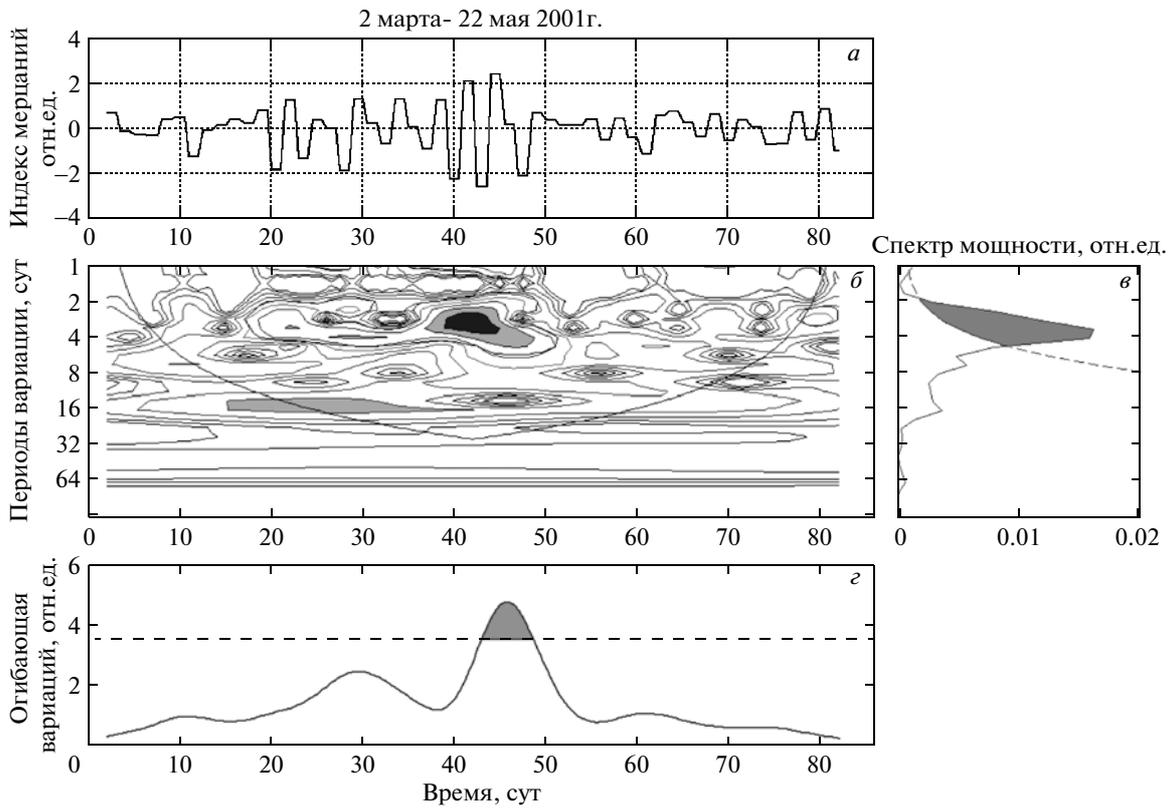


Рис. 6. Усредненные по трем точкам 12-часовые значения вариаций индекса мерцаний космических лучей с 2 марта по 22 мая 2001 г. (а). Ниже – результаты вейвлет-анализа вариаций индекса мерцаний (б). Доминирует осцилляция с периодом ≈ 3 сут. Этой осцилляции предшествует вариация с периодом 13–14 сут. Свернутый или глобальный спектр вариаций в целом за анализируемый период (в). Огибающая вариаций индекса мерцаний (г). По оси абсцисс – число суток.

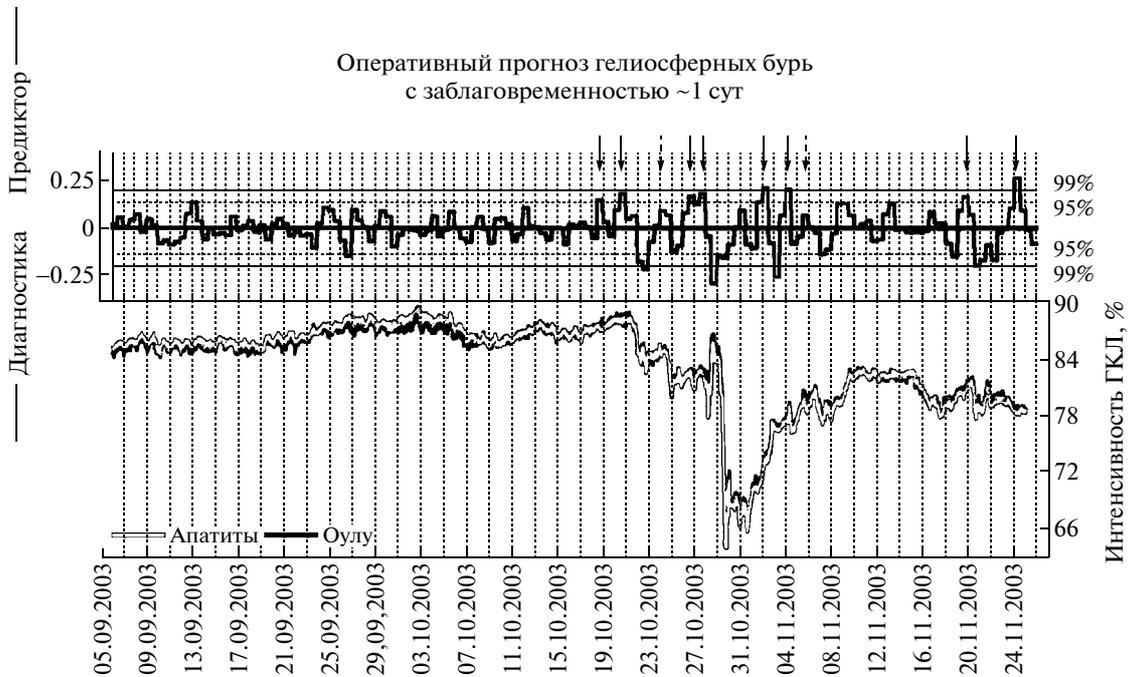


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но для событий в октябре–ноябре 2003 г.

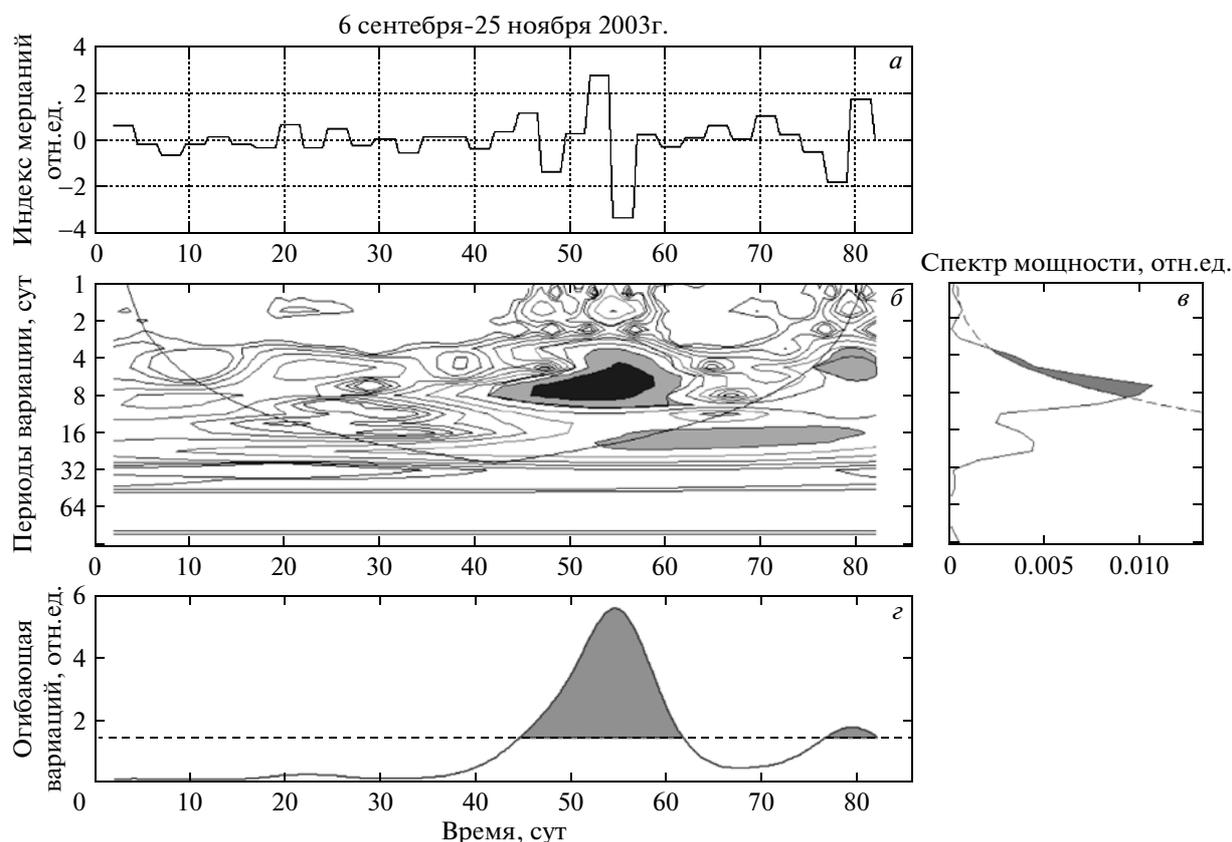


Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но для событий в октябре–ноябре 2003 г.

Установленная связь амплитудно-частотно-временной структуры предвестника в индексе мерцаний ГКЛ с солитоноподобной структурой гелиосферного токового слоя в возмущенный период указывает на когерентную природу предвестника. Только наличие когерентного процесса – квазинеделной вариации – обуславливает принципиальную возможность прогноза гелиосферных бурь. В итоге, по результатам многолетнего мониторинга космических лучей в 23-м цикле получена оценка оправдываемости оперативного прогноза гелиосферных бурь, которая составляет величину $\approx 80\%$.

Доминирование годовой вариации в минимуме текущего 23-го цикла дает нам основание ожидать усиления солнечной активности в ноябре-декабре 2007 г. Уточнение же даты прогноза будет возможно лишь по новому индексу солнечной активности – индексу мерцаний космических лучей, т.е. по результатам мониторинга космических лучей в режиме реального времени.

5. ВЫВОДЫ

Установлена связь амплитудно-частотно-временной структуры предвестника в индексе мерцаний ГКЛ с солитоноподобной структурой гелио-

сферного токового слоя в возмущенный период. Это указывает на когерентную природу предвестника. Только наличие когерентного процесса – квазинеделной вариации – обуславливает принципиальную возможность прогноза гелиосферных бурь. В итоге, по результатам многолетнего мониторинга космических лучей в 23-м цикле получена оценка оправдываемости оперативного прогноза гелиосферных бурь, которая составляет величину $\sim 80\%$.

Автор благодарит университет г. Оулу, геофизическую обсерваторию Соданкила (Финляндия, <http://cosmicrays oulu.fi/>) и Полярный геофизический институт г. Апатиты (<http://pgi.kolasc.net.ru/>) за любезно предоставленные 5-минутные данные измерений нейтронных мониторов. Работа поддержана грантом ведущей научной школы академика РАН Г.Ф. Крымского НШ-422.2003.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных // М.: Финансы и статистика. 313 с. 1983.
- Козлов В.И., Борисов Д.З., Туголуков Н.Н. Метод диагностики межпланетных возмущений по иссле-

- дованию флуктуаций космических лучей и его реализация в системе автоматизации научных исследований ПГО Тикси // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 48. № 11. С. 2228–2230. 1984.
- *Козлов В.И., Туголуков Н.Н.* Мерцания интенсивности космических лучей // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 32. № 3. С. 153–159. 1992.
 - *Козлов В.И., Крымский П.Ф.* Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений // Якутск: ЯНЦ СО РАН. 163 с. 1993.
 - *Козлов В.И.* Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 95–99. 1999.
 - *Козлов В.И.* Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 100–104. 1999.
 - *Козлов В.И.* Прогноз космической погоды в реальном времени по данным наземных станций космических лучей // Солнечно-земная физика. Иркутск: ИСЗФ СО РАН. Вып. 2. № 115. С. 96–98. 2002.
 - *Козлов В.И., Марков В.В.* Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20–23 циклах // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 47–55. 2007.
 - *Козлов В.И., Марков В.В.* Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 56–65. 2007.
 - *Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Мамрукова В.П.* Модуляция космических лучей гелиосферным нейтральным слоем // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 41. № 4. С. 444–449. 2001.
 - *Марков В.В., Козлов В.И.* Волна переполюсовки магнитного поля Солнца во флуктуациях космических лучей // Тр. V Сессии молодых ученых “Волновые процессы в проблеме космической погоды” БШФФ-2003. Иркутск: ИСЗФ СО РАН. С. 157–158. 2003.
 - *Марков В.В., Козлов В.В., Козлов В.И., Яковлев Д.В.* Экспертная система адаптивного прогноза космической погоды на базе наземного мониторинга космических лучей // Труды V Сессии молодых ученых. БШФФ-2004. Иркутск: ИСЗФ СО РАН. С. 186–188. 2004.
 - *Туголуков Н.Н., Козлов В.И.* Связь мерцаний интенсивности космических лучей с параметрами солнечного ветра // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 31. № 4. С. 715–716. 1991.
 - *Barsukov V.L., Belyaev A.A.* On the development of the geochemical method of earthquake prediction // J. Earthquake Prediction Res. V. 2. P. 125–134. 1993.
 - *Kozlov V.I., Kuzmin A.I., Krymsky G.F., Filippov A.T., Chirkov N.P.* Cosmic ray variations with periods less than 12 hours // Proc. 13 ICRC. Denver: USA. V. 2. P. 939–942. 1973
 - *Kozlov V.I., Kozlov V.V., Markov V.V.* Effect of polarity reversal of solar magnetic field in cosmic ray fluctuations // Proc. on ISCS Symposium “Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment”. Tatranska Lomnica. Slovakia. P. 117–120. 2003.
 - *Turpanov A.A., Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., Kozlov V.I., Nikolaev V.S., Prikhodko A.N.* The automatized system for the collection, treatment and analysis of neutron monitor data in real time // Proc. 27-th ICRC. Hamburg: OG–1.6. V. 6. P. 2325–2328. 2001.