

УДК 524.1-352

ПАРАМЕТР ФЛУКТУАЦИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ – ИНДИКАТОР СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2011 г. В. И. Козлов, В. В. Козлов

*Институт космических исследований и аэронауки имени Ю.Г. Шафера, СО РАН, г. Якутск
e-mail: cosmoprognoz@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.09.2009 г.

После доработки 21.04.2010 г.

С целью количественного описания динамики флуктуаций интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) на геоэффективных фазах 11-летнего цикла введен параметр флуктуаций космических лучей, являющийся индикатором степени неоднородности межпланетного магнитного поля. Для расчетов использованы 5-минутные данные высокоширотного нейтронного монитора ст. Оулу (Финляндия) за 20–23 циклы. Неслучайный, негауссовый характер параметра флуктуаций ГКЛ обусловлен нестационарной полугодовой вариацией, отражающей переходный нестационарный колебательный процесс смены знака общего магнитного поля Солнца. Этот переходный колебательный процесс определяет максимальную геоэффективность и длительность фазы переполновки, проявляющейся в резком и глубоком минимуме интенсивности ГКЛ на завершающей стадии смены знака поля. На новой базе подтвержден инвариант 11-летнего цикла “амплитуда-длительность”: обнаружен низкочастотный дрейф периода “низких” циклов, что проявилось, в ожидаемом нами, увеличении длительности 23-го цикла.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ранее, в работе [Козлов и Марков, 2007] по исследованию флуктуаций интенсивности ГКЛ, был обнаружен нестационарный переходный колебательный процесс смены знака общего магнитного поля Солнца. Учитывая важность такого вывода и его следствий, мы провели верификацию полученных ранее результатов. Это и является целью данной работы. Для решения задачи количественного описания динамики флуктуаций ГКЛ на геоэффективных фазах 11-летнего цикла введен новый параметр флуктуаций космических лучей, представляющий собой индикатор степени неоднородности магнитного поля. Использовались данные высокоширотного нейтронного монитора ст. Оулу (Финляндия), практически, за всю историю их регистрации с высоким, 5-минутным разрешением. Предполагалось подтвердить (либо опровергнуть) наш вывод об обнаружении по исследованию флуктуаций космических лучей, нестационарного переходного колебательного процесса смены знака общего магнитного поля Солнца.

Можно ожидать, что на геоэффективной фазе солнечного цикла эффекты Форбуша, распределены не случайно, а в виде групп или серий. После процедуры усреднения 5-минутных данных интенсивности ГКЛ за каждый солнечный оборот, серия форбуш-понижений проявится как резкий и глубокий минимум в интенсивности ГКЛ, подобно тому, что наблюдается в начале ветви спада 11-летнего цикла. При аналогичном

усреднении индекса мерцаний космических лучей характерная динамика флуктуаций ГКЛ является и на этом, большем масштабе [Козлов и Козлов, 2008], что указывает на ее скейлинговый, самоподобный или фрактальный характер. Это подтверждается низкой, и конечной ($d \sim 2.5$) величиной корреляционной размерности процесса [Козлов, 1999]. Низкая и конечная величина корреляционной размерности означает, в принципе, неслучайный, негауссовый характер флуктуаций ГКЛ на геоэффективных фазах солнечного цикла.

Принято считать, что временная последовательность по единичной переменной дает довольно ограниченную информацию. Тем не менее, временная последовательность обладает содержательной информацией: она носит следы всех других переменных, участвующих в описании динамики системы. Слабым, но необходимым звеном спектрально-временного подхода в анализе временных рядов, является процедура приведения исходного нестационарного (в смысле средних значений) ряда к стационарному виду посредством исключения тренда в данных. Но удаленный тренд может содержать и полезную информацию, “накопленную” на латентной, скрытой фазе формирования источника активности. Отсюда следует, что наиболее полная информация содержится в обычной гистограмме (частотной или интегральной) исходных данных. Остается лишь выделить из шумоподобного сигнала потенциально возможный регулярный сигнал.

Во второй, методической, части работы кратко излагается обоснование необходимости применения метода положенного в основу нового подхода выделения потенциально возможного регулярного сигнала из шумоподобного процесса, каковым собственно и является временной ряд 5-минутных значений интенсивности космических лучей. В третьей части приведены результаты расчетов (по предложенному алгоритму) годовых, 27-дневных и суточных значений параметра флуктуаций космических лучей, к которым применяются различные, уже известные методы анализа временных рядов: линейной регрессии, вейвлет-преобразования, метод “наложения эпох” и взаимного корреляционного анализа. Обсуждение полученных результатов проводится в четвертой части работы. В результате установлено, что введенный параметр флуктуаций ГКЛ является обратным по отношению к степени регулярности магнитного поля. Другими словами, это означает, что параметр флуктуаций является индикатором степени неоднородности магнитного поля, как в окрестности межпланетных ударных волн, так и на геоэффективных фазах 11-летнего цикла.

2. МЕТОД

Естественно, что потенциально возможный полезный сигнал может содержаться во втором и последующих моментах функции распределения интенсивности ГКЛ. На это указывает оценка коэффициента асимметрии. При этом, желательно отделить изменения формы гистограммы от изменений масштаба. В таком случае вместо коэффициента асимметрии лучше воспользоваться двухпараметрической функцией распределения Вейбулла [Айвазян и др., 1983]. Это подтверждается проверкой статистических гипотез. Гипотеза о нормальном распределении интенсивности галактических космических лучей отвергается на уровне значимости 99%. Гипотеза о вейбулловском характере распределения указывает на возможность ее принятия на уровне значимости 90%. Обобщенная функция распределения Вейбулла описывает, как известно из вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности, выход системы на предельный критический режим. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим выхода на геоэффективную фазу 11-летнего цикла.

На языке вероятностной теории разрушения сплошных сред (и теории надежности) задача изучения переходного режима сводится к задаче определения функции интенсивности отказов системы, выработавшей свои ресурсы. Максимум функции интенсивности отказов, или максимум функции риска, есть по сути вероятность достижения критического значения анализируемой переменной, в данном случае — интенсивности кос-

мических лучей. Эта вероятность и определяется нами как параметр флуктуаций космических лучей [Козлов, 2008]. Для расчета функции риска потребуются оценка параметра формы эмпирического распределения Вейбулла, который определяет степень отклонения формы аппроксимирующей функции от нормального распределения. Аппроксимирующую функцию эмпирической (интегральной) гистограммы интенсивности находим методом наименьших квадратов. Средние значения интенсивности за каждый интервал-бин эмпирической функции распределения интегральной гистограммы будут группироваться в окрестности подогнанной прямой, но уже в новой координатной сетке (после процедуры двойного логарифмирования и замены переменных). В этом случае тангенс угла наклона прямой, подобранной методом наименьших квадратов, и свободный член дают соотношения, необходимые для оценки искомого параметра формы и масштаба.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет годовых значений параметра флуктуаций за четыре последних 11-летних цикла солнечной активности 20–23 приведен на рис. 1 (сплошная кривая, шкала справа). Были использованы 5-минутные данные высокоширотного нейтронного монитора ст. Оулу (Финляндия) за каждый год, начиная с 1969 по 2009 гг., т.е. фактически, за всю историю регистрации космических лучей с высоким, 5-минутным разрешением. Значения интенсивности космических лучей в процентах представлены на том же графике штриховой кривой (шкала слева). В целом, соответствие среднегодовых значений рассчитанного параметра и интенсивности ГКЛ достаточно заметно: 11-летняя вариация проявляется в обоих случаях. Количественная оценка, с использованием модели линейной регрессии, указывает на хорошую ($R = 0.71$) корреляционную связь среднегодовых значений сравниваемых рядов. Очевидно, что найденная корреляционная связь обусловлена 11-летней вариацией. Это подтверждается результатами вейвлет-анализа: 11-летняя вариация в параметре флуктуаций галактических космических лучей выявляется довольно отчетливо (рис. 2). Обращает на себя внимание низкочастотный дрейф периода 11-летней вариации в область низких частот, т.е. в сторону периодов больших, чем период 11-летнего цикла.

Оставшуюся, после исключения 11-летней вариации, высокочастотную компоненту 27-дневных значений рассчитанного параметра (рис. 3) мы и определяем, собственно, как параметр флуктуаций ГКЛ (данные сглажены по 3-м точкам). Огибающая вариаций 27-дневных значений параметра флуктуаций космических лучей во всех 4-х циклах 20–23, достигает максимума на стадии

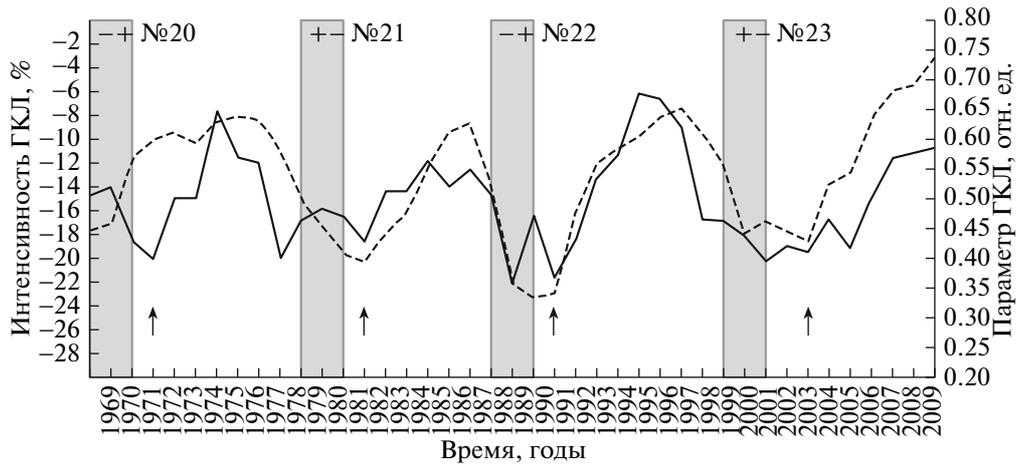


Рис. 1. Результаты расчета годовых значений параметра флуктуаций ГКЛ в относительных единицах за 4 цикла солнечной активности №№ 20–23 (сплошная кривая, шкала справа). Интенсивность ГКЛ ст. Оулу (Финляндия) в процентах (штриховая кривая, шкала слева). Показаны номера циклов и, условно – периоды смены знака поля.

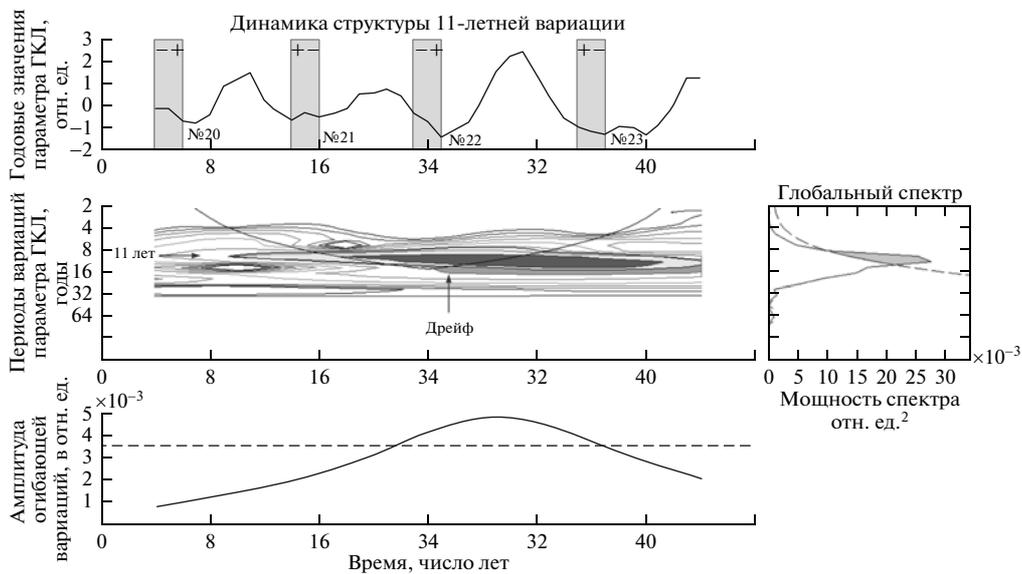


Рис. 2. Динамика структуры 11-летнего цикла по результатам вейвлет-анализа. Вверху – временной ход среднегодовых значений параметра флуктуаций ГКЛ. Условно показаны периоды смены знака поля. Ниже, на диаграмме – изменение периода 11-летней вариации во времени. Местоположение 11-летней вариации отмечено горизонтальной стрелкой слева. Область низкочастотного дрейфа показана вертикальной стрелкой. В правой части рисунка – усредненный, или глобальный, спектр в целом за анализируемый период.

завершения переполюсовки общего магнитного поля Солнца, т. е. в начале ветви спада цикла солнечной активности. Ниже, проведен анализ тонкой структуры параметра флуктуаций за 3 полных 11-летних цикла 21–23 с использованием вейвлет-анализа. Как следует из представленных результатов (рис. 4 и 6), в минимуме нечетных циклов 21 и 23, при отрицательном знаке общего магнитного поля Солнца, явно выражена годовая вариация, что согласуется с моделью 11-летнего цикла развиваемой в работе [Крымский и др., 2001].

Нестационарная полугодовая вариация доминирует на фазе переполюсовки: в максимуме и в начале ветви спада 11-летнего цикла солнечной активности (рис. 4–6). Завершение фазы переполюсовки определяется по наличию резкого и глубокого понижения в интенсивности ГКЛ в 1972, 1982, 1991 и 2003 гг. (эти годы отмечены стрелкой на рис. 1). Чем выше (в максимуме) цикл, тем короче фаза переполюсовки, после завершения которой, начинается восстановление интенсивности ГКЛ – собственно, ветвь спада цикла активности Солнца. И, наоборот, чем ниже цикл, тем

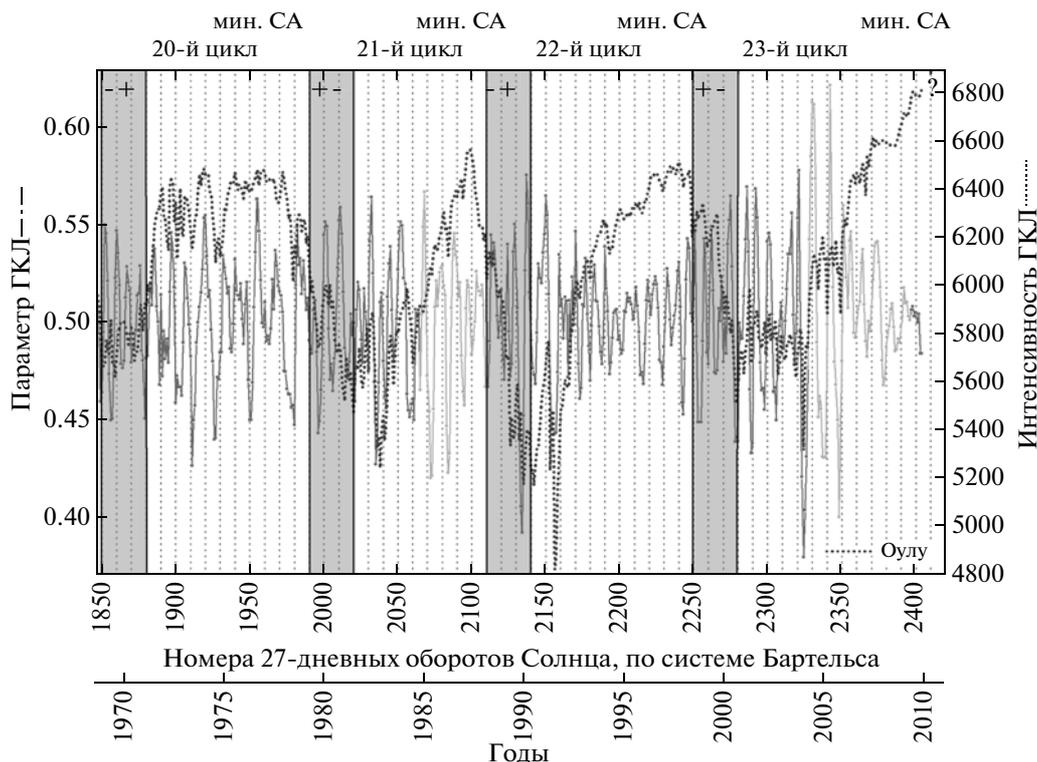


Рис. 3. Высоочастотная компонента параметра флуктуаций ГКЛ (сплошная кривая, шкала слева) за 4 цикла 20–23, полученная исключением 11-летней вариации из расчетных 27-дневных значений. Интенсивность ГКЛ в импульсах (точечная кривая, шкала справа). По оси абсцисс – время: номера оборотов Бартельса и годы. Показаны номера циклов и, условно – периоды смены знака поля.

продолжительнее фаза переполюсовки, что мы и наблюдали в 20-ом и 23-ем циклах. Действительно, восстановление интенсивности в 23-ем цикле началось лишь в конце 2003 г., после завершения переполюсовки, длившейся более 3-х лет. Таким образом, обнаруженная по флуктуациям космических лучей нестационарная полугодовая вариация, по сути, представляет собой переходный нестационарный колебательный процесс смены знака общего магнитного поля Солнца [Kozlov et al., 2003]. Этот переходный колебательный процесс, скорее всего, и определяет максимальную геоэффективность и длительность фазы переполюсовки. Длительность переполюсовки для “низких” циклов 20 и 23, фактически, вдвое превышает такую для более высоких циклов 21 и 22.

Выше было показано хорошее соответствие между параметром флуктуаций и интенсивностью на больших масштабах, т.е. на масштабе 11-летней вариации при годовом усреднении. Не менее важно знать, как соотносятся между собой временные изменения параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ на меньших масштабах, в частности, при 27-дневном усреднении. В этой связи обращает на себя внимание наличие максимума параметра флуктуаций ГКЛ, который регистрируется за 1–2 оборота до начала резкого и

глубокого минимума в интенсивности ГКЛ: в 1972, 1982, 1991, 2000, 2001 и 2003 гг. (см. рис. 3). Для проверки этого эффекта был применен метод наложения эпох. К “нулевому” событию были отнесены большинство (10) периодов резких и глубоких минимумов в интенсивности ГКЛ, зарегистрированных в текущем 23-ем цикле.

Во-первых, получено хорошее соответствие параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ. Величина коэффициента их линейной регрессионной связи $R = 0.9$. Во-вторых, подтверждается наличие значимого максимума параметра флуктуаций, в среднем, за 1–2 оборота Солнца до начала глубокого минимума в интенсивности ГКЛ (рис. 7). Это указывает на прогностические возможности параметра флуктуаций. Правда, для решения проблемы среднесрочного прогноза, за время порядка одного оборота Солнца, потребуются еще и количественный критерий принятия решения о прогнозе геоэффективного периода. Поскольку в методе наложения эпох мы имеем дело с условным, средним “событием”, то и количественный критерий у нас является усредненным. Исходя из вероятностной трактовки параметра флуктуаций, уровень вероятности $P \geq 0.5$ можно выбрать в качестве предельного, выше которого вероятность наступления геоэффективной фазы солнечного

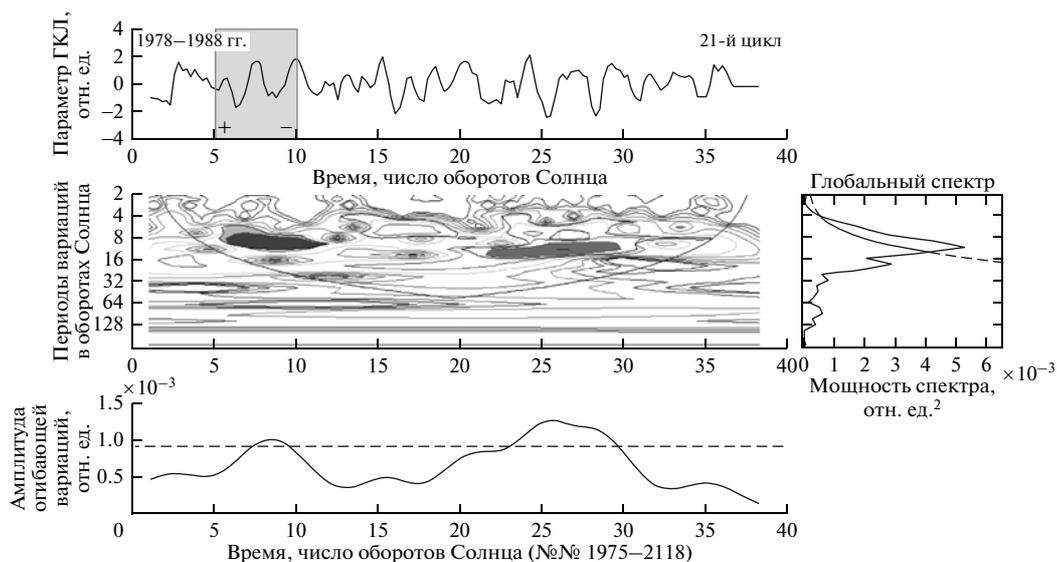


Рис. 4. Вверху — временной ход параметра флуктуаций ГКЛ в 21-ом цикле. Ниже и слева на диаграмме — нестационарная полугодовая вариация, регистрируемая в период смены знака поля. Справа показана годовая вариация, присущая нечетным циклам с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца. В правой части рисунка — усредненный, или глобальный, спектр в целом за анализируемый период. На нижней панели — амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс — время (число оборотов Бартелеса).

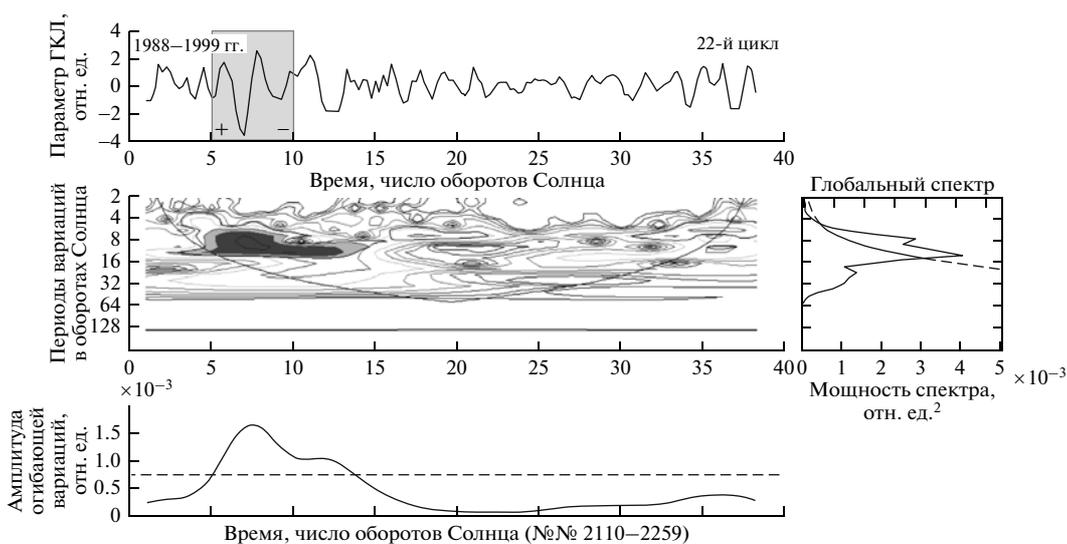


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для 22-го цикла.

цикла можно считать значимой (см. сайт: <http://www.forshock.ru>).

Тестовый расчет оценки вероятности наступления геоэффективной фазы цикла в период, предшествующий известным событиям в октябре–ноябре 2003 г. (обороты №№ 2323–2324), показал эффективность предложенного метода (рис. 8а). Величина заблаговременности τ регистрации предвестника, равная одному обороту Солнца, подтверждается и количественной оценкой, полученной по расчету взаимной корреля-

ционной функции $R(\tau)$ между 27-дневными значениями параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ (рис. 8б). То, что параметр флуктуаций, в среднем, систематически опережает интенсивность ГКЛ на один солнечный оборот, следует из результатов расчета их взаимной корреляционной функции, рассчитанной по данным за все четыре 11-летних цикла 20–23 (рис. 9). Это означает, что, кроме значимой корреляционной связи между введенным параметром и интенсивностью, параметр флуктуаций ГКЛ содержит в себе

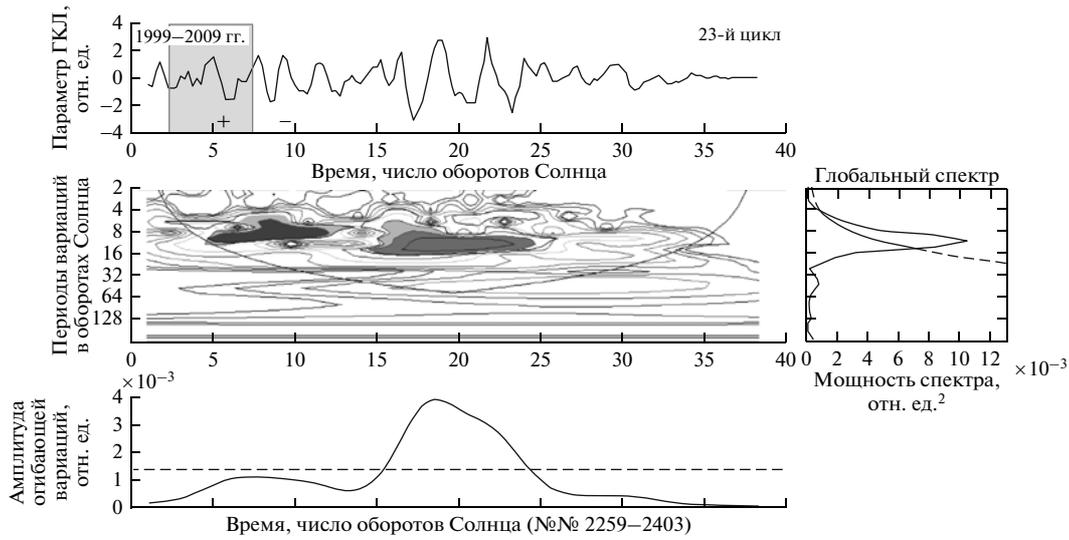


Рис. 6. То же, что и на рис. 4–5, для 23-го цикла.

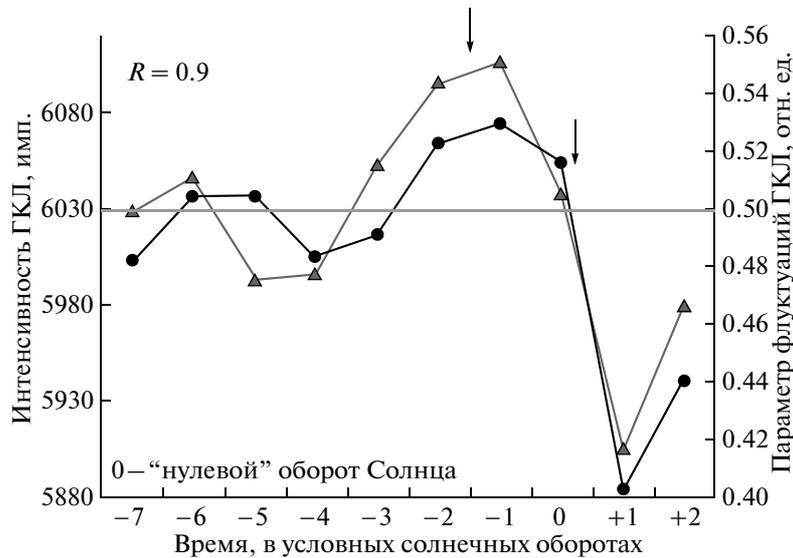


Рис. 7. Средние значения интенсивности ГКЛ в импульсах (шкала слева) и параметра флуктуаций в относительных единицах (шкала справа) полученные методом “наложения эпох” для 10-ти случаев резких и глубоких минимумов в интенсивности ГКЛ 23-го цикла. В левом, верхнем углу приведен коэффициент взаимной корреляции рядов $R = 0.9$. По оси абсцисс отложены номера оборотов относительно условного “нулевого” оборота. Уровень $P \geq 0.5$ – уровень принятия решения о наступлении геоэффективного периода.

прогностическую информацию. Это очень важно для среднесрочного прогноза геоэффективных периодов 11-летнего цикла с заблаговременностью ~ одного оборота Солнца.

Не менее важным является то, что введенный параметр достаточно эффективно работает и на меньших масштабах усреднения. На рис. 10 приведена иллюстрация возможности оперативного прогноза на примере известных экстремальных событий в октябре–ноябре 2003 г. Возможности среднесрочного прогноза геоэффективного пери-

ода 2003 г. были показаны выше (см. рис. 8). Видно, что геоэффективным оборотам №№ 2323–2324 предшествует значимый максимум с $P \geq 0.5$, регистрируемый на оборотах №№ 2320–2321. Для варианта оперативного прогноза, расчет параметра флуктуаций проведен за каждые сутки оборотов №№ 2323–2324, начиная с 05 сентября и вплоть до 10 ноября 2003 г. Интенсивность ГКЛ приведена в процентах, шкала слева. Расчетный параметр флуктуаций разделен двухуровневой полосой “уровней значимости” в интервале значений $P = 0.55 \pm 0.01$ (эмпирически определен-

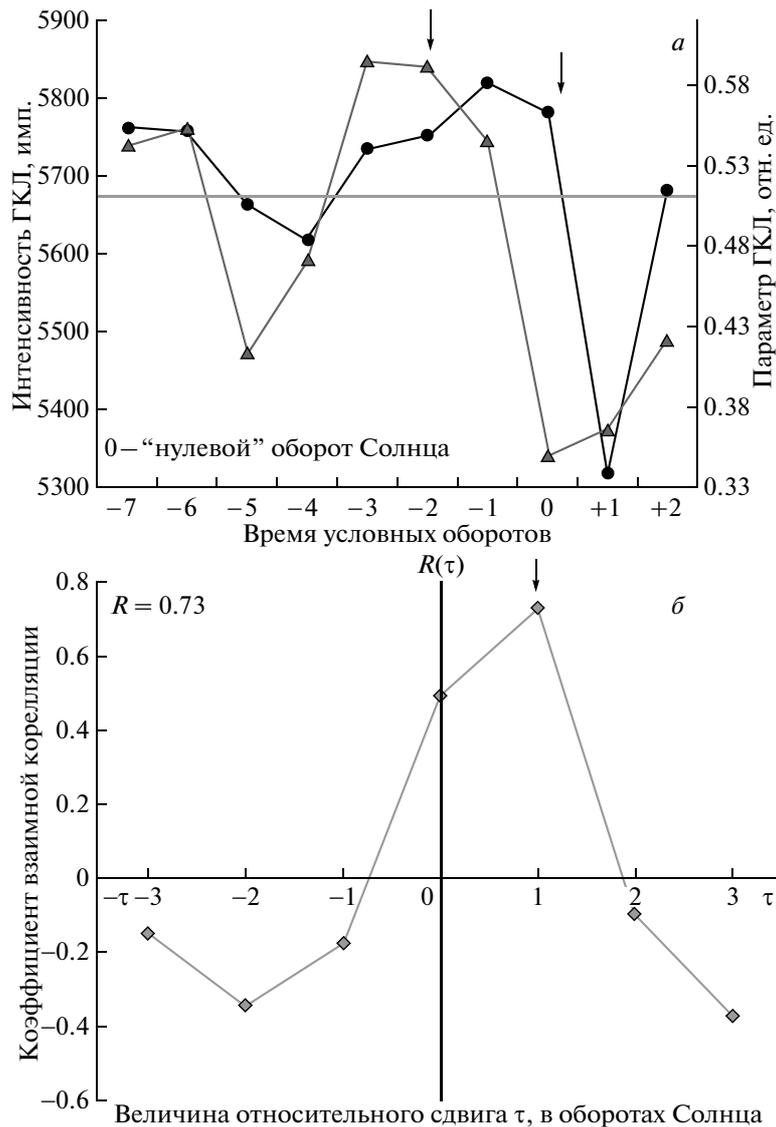


Рис. 8. *a* – интенсивность ГКЛ в импульсах (шкала слева) и параметр флуктуаций в относительных единицах (шкала справа) для геоэффективного периода в октябре–ноябре 2003 г. По оси абсцисс отложены номера оборотов относительно условного “нулевого” оборота № 2323. Уровень $P \geq 0.5$ – уровень принятия решения о наступлении геоэффективного периода. *б* – взаимный корреляционный анализ 27-дневных значений интенсивности ГКЛ и параметра флуктуаций в течение оборотов №№ 2316–2325. В левом, верхнем углу приведен коэффициент взаимной корреляции рядов $R = 0.73$. Стрелкой показан относительный сдвиг на 1 оборот Солнца. По оси абсцисс – величина относительного сдвига τ анализируемых рядов в единицах солнечных оборотов.

ные уровни принятия решений о прогнозе с величиной вероятности $P \geq 0.5$). Верхний уровень соответствует периоду минимума 11-летнего цикла, где мы сейчас и находимся (см. сайт: <http://www.forshock.ru>). В остальное время действует нижний уровень принятия решений. Значимые среднесуточные значения параметра флуктуаций регистрируются 23 и 27 октября 2003 г., т.е. за 1 сут до начала понижений в интенсивности ГКЛ (24–25 и 28–30 октября 2003 г.). Значимый предвестник зафиксирован также 3 ноября 2003 г. Известно, что 4 ноября была зарегистрирована мощней-

шая рентгеновская вспышка, и лишь местоположение вспышки на западном крае солнечного диска не позволило ей проявиться на орбите Земли в должной мере.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Относительно связи введенного параметра с традиционными индексами солнечной и геомагнитной активности следует сказать следующее. При среднегодовом усреднении получена хорошая корреляция с числами Вольфа ($R \geq 0.74$) и

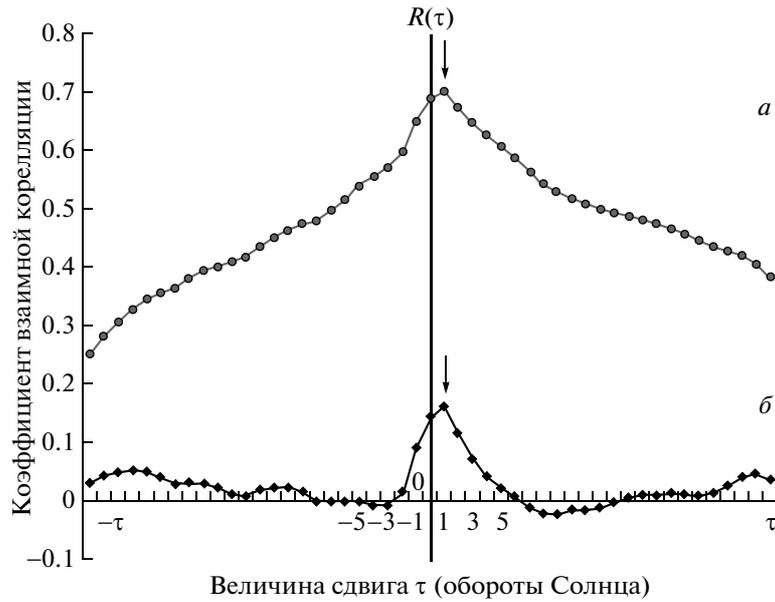


Рис. 9. *a* – взаимный корреляционный анализ 27-дневных значений интенсивности ГКЛ и параметра флуктуаций в течение циклов 20–23. По оси абсцисс – величина относительного сдвига τ анализируемых рядов в единицах солнечных оборотов. Стрелками отмечен относительный сдвиг на 1 оборот Солнца. *б* – то же, что на рис. *a*, при исключенной 11-летней вариации.



Рис. 10. Иллюстрация возможности оперативного прогноза на примере известных экстремальных событий в октябре–ноябре 2003 г. Расчет параметра флуктуаций проведен за каждые сутки, начиная с 05 сентября и вплоть до 10 ноября 2003 г. Интенсивность ГКЛ дана в процентах, шкала слева. Значения параметра флуктуаций ГКЛ (шкала справа) разделены двухуровневой полосой уровней значимости в интервале $P = 0.55 \pm 0.01$ (эмпирически определенные уровни принятия решений о прогнозе с вероятностью $P > 0.5$). Верхний уровень значимости соответствует периоду минимума 11-летнего цикла.

числом больших, с $Dst < -150$ нТл, геомагнитных бурь ($R \geq 0.65$). Важно сравнить параметр флуктуаций ГКЛ с ключевым параметром модуляции $k = \omega\tau$, введенным в работе [Крымский и др., 2007] для характеристики степени регулярности поля. Здесь ω – гирочастота частиц в регулярном маг-

нитном поле, τ – среднее время между актами рассеяния частиц. Параметр модуляции предполагается постоянным для всей гелиосферы и не зависящим от энергии частиц, хотя и будет меняться с циклом солнечной активности. Предположено, что величина параметра модуляции отра-

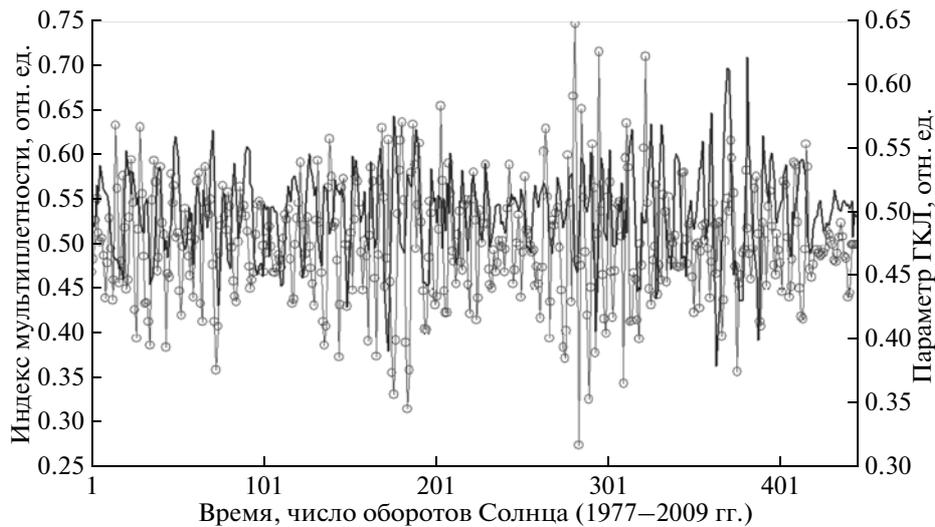


Рис. 11. Результаты сопоставления высокочастотной компоненты (исключены вариации с периодом более 1-го года) индекса мультиплетности глобального магнитного поля Солнца в относительных единицах (открытые кружки, шкала слева) и параметра флуктуаций ГКЛ (сплошная кривая, шкала справа) за 4 последних 11-летних цикла 20–23 (1977–2009 гг.). По оси абсцисс – время, число оборотов Солнца с 1977–2009 гг.

жает отношение между напряженностью регулярного и турбулентного поля. Регулярное поле в период максимума много меньше турбулентного. Напротив, напряженность турбулентного поля достигает максимума в период завершения смены знака поля. Сначала она линейно растет со временем, достигая максимума во время переполусовки и, затем, линейно уменьшается.

Являясь индикатором степени неоднородности межпланетного магнитного поля, параметр флуктуаций ГКЛ в указанном смысле является обратным по отношению к степени регулярности магнитного поля k – ключевому параметру модуляции в модели 11-летнего цикла. На это указывает поведение огибающей вариаций параметра флуктуаций в каждом 11-летнем цикле: подобно турбулентной компоненте межпланетного магнитного поля, огибающая вариаций параметра флуктуаций ГКЛ достигает максимума на стадии завершения переполусовки общего магнитного поля Солнца (см. рис. 3). Связь параметра флуктуаций ГКЛ с турбулентностью магнитного поля следует также из результатов сопоставления параметра ГКЛ с “показателем эффективности солнечного мультиполя” (рис. 11). Этот показатель был введен в работах [Иванов и др., 1997; Ivanov and Obridko, 2001].

Установленная связь параметра флуктуаций ГКЛ со степенью неоднородности магнитного поля является решающей в расшифровке динамики флуктуаций ГКЛ. Неслучайный, негауссовый характер параметра флуктуаций ГКЛ обусловлен нестационарной полугодовой вариацией, отражающей переходный нестационарный колебательный процесс смены знака общего маг-

нитного поля Солнца. Этот переходный колебательный процесс и определяет максимальную геоэффективность и длительность фазы переполусовки, проявляющейся в резком и глубоком минимуме интенсивности ГКЛ на завершающей стадии смены знака поля. Важной, для понимания всего явления в целом является следующая закономерность обнаруженной динамики: установлена обратная зависимость длительности процесса переполусовки от амплитуды 11-летнего цикла в его максимуме. Чем меньше амплитуда цикла, тем дольше длится переходный колебательный процесс смены знака поля, и наоборот, что и послужило основанием для выдвижения гипотезы о существовании инварианта 11-летнего цикла “амплитуда-длительность”. Наличие подобного инварианта означает неизменность площади, “заметаемой” под кривой 11-летнего цикла [Козлов и Марков, 2007].

В физике, как известно, подобный инвариант имеет место для солитона: ширина огибающей группового солитона обратно пропорциональна корню квадратному из его амплитуды в максимуме. Похожая зависимость между шириной и амплитудой 11-летнего цикла была получена относительно недавно в работе [Кононович, 2005]: “время достижения максимума 11-летнего цикла обратно пропорционально корню квадратному из его амплитуды”. В нашем случае, огибающая вариаций параметра флуктуаций, достигающая максимума на стадии завершения переполусовки (см. рис. 3 и рис. 11), идентифицируется с огибающей группового солитона. Известно также, что солитонный механизм является наиболее эффективным, по сравнению с другими конвективны-

ми механизмами “сравливания” избыточной энергии. Причем, “сравливания” “дискретными” порциями, что присуще автоколебательным режимам регуляции энергии. Это указывает на природу 11-летней цикличности: 11-летняя цикличность – есть наиболее эффективный, т.е. солитонный механизм регуляции, обуславливающий постоянство температуры Солнца. С этой точки зрения, сбой 11-летней цикличности – соответствует режиму... хаотических автоколебаний!

Из наличия инварианта “амплитуда–длительность” естественно следует увеличение длительности низких, по амплитуде в максимуме, циклов. Действительно, вейвлет-анализ данных за 1969–2005 гг. указал на появление с конца предыдущего 22-го цикла низкочастотного дрейфа в сторону периодов, больших, чем период 11-летней вариации [Козлов и Марков, 2007]. Сейчас, по прошествии 4-х лет, вывод о низкочастотном дрейфе подтвердился, причем на новой базе, с использованием параметра флуктуаций ГКЛ. Существенно, что сам факт обнаружения низкочастотного дрейфа является независимым аргументом в пользу существования инварианта 11-летнего цикла, его проверяемым следствием.

Почему так важен факт обнаружения подобного дрейфа? Дело в том, что появление низкочастотной “подложки” (низкочастотного дрейфа, по нашей терминологии), может предшествовать длительному сбою 11-летней цикличности [Фрик, 2003]. Рекордно высокое значение интенсивности ГКЛ в настоящее время, возможно, связано с ослаблением глобального дипольного поля Солнца. И такие данные уже появились. Как показано в недавней работе [Обридко и Шельтинг, 2009], магнитный момент солнечного диполя в 2008 г. снизился до значений, характерных для начала XX века. Причем, в настоящее время аномально низки и локальные поля [Белов и Гайдаш, 2009]. Такой длительный период с полным исчезновением солнечных пятен наблюдался лишь в начале прошлого века.

Сейчас уже можно говорить, что мы, как минимум, находимся на стадии неординарного спада солнечной активности и, как максимум, – в начальной фазе длительного сбоя 11-летней цикличности Солнца, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Прежде всего, имеется в виду аномально высокий уровень радиационного фона – интенсивности ГКЛ (рис. 3). Увеличение же интенсивности ГКЛ способствует, как известно, усилению процесса облакообразования и, как следствие, к понижению температуры в планетарном масштабе. В этом состоит альтернатива процессу глобального потепления [Козлов и Марков, 2007]. Очевидно, все это будет иметь существенное значение лишь в случае затяжного сбоя 11-летней цикличности: срыва режима регу-

лярной конвекции (автоколебаний) в конвективной зоне Солнца и переход в режим хаотических автоколебаний (режим странного аттрактора). Реализация затяжного сбоя 11-летнего цикла в ближайшие 10 лет могла бы означать реальность нелинейных режимов эволюции общего магнитного поля Солнца. Предложенный нами сценарий сбоя 11-летней цикличности, отличается от общепринятого в настоящее время, сценария “линейной суперпозиции” периодических волн (11 лет, 200 лет и т.д.). В соответствии с принципом “линейной суперпозиции”, наступление затяжного сбоя 11-летней цикличности ожидается в середине XXI века.

5. ВЫВОДЫ

1. Введен параметр флуктуаций космических лучей, являющийся индикатором степени неоднородности магнитного поля в окрестности ударных волн и на геоэффективных фазах 11-летнего цикла.

2. Неслучайный, негауссовый характер параметра флуктуаций ГКЛ обусловлен нестационарной полугодовой вариацией, отражающей переходный нестационарный колебательный процесс смены знака общего магнитного поля Солнца. Этот переходный колебательный процесс определяет максимальную геоэффективность и длительность фазы реперолюсовки, проявляющейся в резком и глубоком минимуме интенсивности ГКЛ на завершающей стадии смены знака поля.

3. На новой базе подтвержден инвариант 11-летнего цикла “амплитуда–длительность”: обнаружен низкочастотный дрейф периода “низких”, по амплитуде в максимуме, циклов, что проявилось, в ожидаемом нами увеличении длительности 23-го цикла.

4. В настоящее время мы находимся, как минимум, на стадии неординарного спада солнечной активности, и как максимум, – в начальной фазе затяжного сбоя 11-летней цикличности.

5. Введенный параметр флуктуаций космических лучей является в принципе прогностическим, что очень важно для среднесрочного прогноза геоэффективных периодов 11-летнего цикла с заблаговременностью ~1 оборота Солнца и оперативного прогноза ударных волн с заблаговременностью ~1 сут.

6. 11-летняя цикличность есть наиболее эффективный, т.е. солитонный, механизм “дискретного” “сравливания” избыточной энергии, обуславливающий регуляцию постоянства температуры Солнца.

Авторы выражают искреннюю благодарность Рецензенту за его, несомненно, большой труд и столь неравнодушное отношение при работе над статьей.

Авторы благодарят университет г. Оулу, геофизическую обс. Соданкюля (Финляндия, <http://cosmicrays oulu.fi/>) за любезно предоставленные 5-минутные данные измерений нейтронного монитора. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущей научной школы НШ-3526.2010.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика. 313 с. 1983.
- Белов А.В., Гайдаш С.П. Аномально низкая солнечная и геомагнитная активность в 2007 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 5. С. 595–602. 2009.
- Иванов Е.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Крупномасштабная структура солнечных магнитных полей и корональные выбросы массы // Письма в Астрон. журн. Т. 74. № 2. С. 273–277. 1997.
- Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 100–104. 1999.
- Козлов В.И., Марков В.В. Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20–23 циклах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 47–55. 2007.
- Козлов В.И., Козлов В.В. Новый индекс солнечной активности – индекс мерцаний космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 4. С. 1–9. 2008.
- Козлов В.И. “Аномальная” активность Солнца в “слабых” циклах 20 и 23 как проявление инварианта 11-летнего цикла // Солнечно-земная физика. Иркутск.: ИСЗФ. Вып. 12. Т. 1. С. 32–33. 2008.
- Кононович Э.В. Аналитические представления средних вариаций солнечной активности в течение цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 3. С. 316–323. 2005.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Мамрукова В.П. Модуляция космических лучей гелиосферным нейтральным слоем // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 4. С. 444–449. 2001.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.Г., Герасимова В.П. Гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей высоких энергий. 1. Базовая модель модуляции космических лучей с циклом солнечной активности // ЖЭТФ. Т. 131. Вып. 2. С. 214–221. 2007.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в Астрон. журн. Т. 35. № 4. С. 279–285. 2009.
- Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели // Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003.
- Ivanov E.V., Obridko V.N. The Cyclic Variations of the CME Velocity // Solar Phys. V. 198. P. 179–196. 2001.
- Kozlov V.I., Kozlov V.V., Markov V.V. Effect of Polarity Reversal of Solar Magnetic Field in Cosmic Ray Fluctuations // Proc. ISCS-2003 Symposium “Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment”. Tatranska Lomnica. Slovakia. P. 117–120. 2003.