

УДК 523.165;523.74

ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ПО ФЛУКТУАЦИЯМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2022 г. В. И. Козлов*

Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

**cosmoprognoz@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.02.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

В экстремальных событиях Космической погоды образуются и наибольшие по величине потоки “штормовых” частиц, предвещающих приход ударной волны на орбиту Земли. Именно они представляют наибольшую опасность для систем жизнеобеспечения в верхней атмосфере, в Космосе и на Земле. Проведена проверка результатов прогноза “штормовых” частиц ускоренных ударными волнами по вариациям космических лучей высоких энергий данными измерений на космическом аппарате *ACE*, США. Оценка достоверности прогноза $P \geq 80\%$.

DOI: 10.31857/S002342062201006X

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является изучение переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра – ударной волны по исследованию особенностей флуктуаций космических лучей, обусловленных групповым или коррелированным поведением галактических космических лучей (ГКЛ). Выделение коррелированных флуктуаций или “пучков” частиц космических лучей из Гауссова “шума” позволило бы использовать их в качестве предвестников крупномасштабного возмущения солнечного ветра. Коррелированные флуктуации целесообразно искать в ситуациях, когда возникают “окрашенные” группы частиц, за эволюцией которых легко проследить. Известно, что наибольшие контрасты в космических лучах создают ударные волны, порождающие резкие понижения интенсивности ГКЛ, называемые эффектами Форбуша [1].

Другие возможные источники “форбуш-понижений” (например, рекуррентные возмущения солнечного ветра) вызывают понижения интенсивности космических лучей значительно меньшей амплитуды. В отсутствие спорадической (вспышечной) активности рекуррентные возмущения солнечного ветра также могут иметь предвестники в космических лучах, но это происходит лишь при достижении достаточных градиентов в параметрах солнечного ветра на фронтах разномасштабных потоков. В общем случае, возможно “a priori” отличить предвестник в окрестности фронта вспышечной ударной волны от предвестника ударной волны, сформировавшейся на границе разномасштабного потока солнеч-

ного ветра: важен сам факт наличия ударной волны, независимо от условий ее образования.

В еще одном типе возмущений солнечного ветра, в поршневых волнах, относительное сжатие вещества и поля между фронтами превышает те значения, которые она достигает в теле взрывных волн. Как показывают расчеты [2–4], в области между передним и задним ударными фронтами таких волн магнитное поле может претерпевать дополнительное усиление значительной величины. Поэтому можно говорить о магнитной “пробке” в окрестности фронта ударной волны, распространяющейся вместе с ней по невозмущенному солнечному ветру. Наличие подобной магнитной пробки в теле ударной волны порождает сепарацию траекторий частиц на “разрешенные” и “запрещенные”. Первые связывают области перед ударным фронтом и позади него, а вторые – изолируют эти области одну от другой [5–7].

В итоге, в окрестности магнитных пробок будет происходить разного рода деформация фазового объема: возникнет чередование областей разной плотности – появится “перемежаемость”. В угловом распределении, которое представляет собой двумерную проекцию функции распределения, следует ожидать появления кластеров, размеры и контраст которых должны уменьшаться с удалением от источника. В этом случае, наблюдения за угловым распределением должны показывать “мерцания” небесной сферы в космических лучах, свойства которых находятся в зависимости от источника: от характеристик магнитного поля и от расстояния до точки наблюдения. Можно ожидать, что параметры мерцаний

космических лучей будут обладать фрактальными свойствами [6].

О ПРИНЦИПАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Известно, что фрактальные свойства процесса определяются по оценке фрактальной или корреляционной размерности процесса. Конечная размерность d означает, что данный сигнал в принципе можно воссоздать с помощью динамической системы порядка не выше чем $2d + 1$ [8]. Более того, можно утверждать, что размерность процесса коррелирует с числом структур (или мод) взаимодействующих друг с другом. И, наоборот, при конечной и низкой величине корреляционной размерности конечно и число мод, что соответствует более детерминированной структуре процесса [9].

Исследование статистического распределения числа форбуш-понижений с амплитудами $A \geq 1.5\%$ в цикле солнечной активности по данным нейтронного монитора ст. Алерт проведенное авторами работы [10] показало, что максимум распределения числа эфф. Форбуша приходится на начало ветви спада солнечной активности. Этим, скорее всего, и обусловлены достаточно резкие понижения в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ в начале ветви спада 11-летнего цикла. Известно, что корональные выбросы массы (СМЕ), являются источником ударных волн и магнитных облаков. Их число увеличивается также в начале ветви спада 11-летнего цикла [11].

В этой связи, следует заметить, что “выход на плато” обычно монотонной $d(n) \sim n$ зависимости корреляционной размерности от размерности фазового пространства n , происходит при достижении корреляционной размерности величины $d = 2.5-3$ [12, 13]. Применительно к задаче прогноза солнечной активности сам факт обнаружения низкоразмерного, т.е. частично детерминированного процесса на активной фазе 11-летнего солнечного цикла служит своеобразной “теоремой существования”, т.е. указанием на принципиальную возможность прогноза геоэффективной фазы начала ветви спада солнечного цикла, где велика вероятность серийных событий.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА К УДАРНОЙ ВОЛНЕ

Выбор методологии изучения переходного режима к геоэффективной фазе солнечного цикла, когда велика вероятность серийных событий, определился нижеследующими результатами. По часовым значениям интенсивности ГКЛ ст. Оулу (Финляндия) за 45 лет с 1968–2012 гг. определялось число событий (понижений интенсивности ГКЛ) фиксированной амплитуды. Так, был выяв-

лен степенной характер распределения числа событий в зависимости от их амплитуды с показателем степени $\tau \approx -1.56$ [14]. Это согласуется с результатом, полученным ранее в [15], что подтверждается близостью степенных показателей τ : “-1.60” для рентгеновских вспышек и “-1.56” в космических лучах. Обратная степенная зависимость указывает обычно на отсутствие выделенного или “характерного” масштаба явления, т.е. имеет место иерархия масштабов, что указывает на самоподобный или фрактальный характер процесса в целом. Это согласуется с конечным и низким ($d = 2.5-3$) значением корреляционной (фрактальной) размерности процесса на активной фазе солнечного цикла [13]. Действительно, правдоподобность полученной оценки степенного показателя τ с очевидностью следует из аналитического выражения его связи с фрактальной размерностью: $d = \tau + 1$. Отсутствие “характерного” масштаба явления означает, что число любых, произвольно взятых событий на Солнце будет всегда больше числа более мощных, по сравнению с ними, событий. События в рентгене отражают активность в источнике на Солнце, а события в космических лучах отражают проявление той же самой активности в верхней короне Солнца и далее в межпланетной среде. При этом, величина показателя степенной зависимости “-1.56” (в космических лучах) указывает на наличие в межпланетной среде развитой “колмогоровской” турбулентности (с показателем частотного спектра $\omega \approx 5/3$), что согласуется с данными наблюдений [16].

Сам факт существования обратной степенной зависимости с показателем степени $\tau < 2$ указывает на то, что динамическая система находится в нетривиальном состоянии “самоорганизованной критичности”, когда весьма нерегулярно, т.е. катастрофически (что существенно усложняет прогноз) “страивается” избыток запасенной в системе энергии. При $\tau \leq 3$ степенное распределение обладает бесконечной дисперсией, т.е. не имеет смысла пытаться характеризовать отклонение значений случайной величины от ее математического ожидания, а при $\tau \leq 2$ бесконечным становится и само математическое ожидание. В данном случае, сумма значений случайной величины в некоторой выборке оказывается сравнима с наибольшим из них. В результате обе характеристики быстро и неограниченно увеличиваются по мере роста объема выборки, что дает характерный пример анти-интуитивного поведения масштаб-но-инвариантных (фрактальных) систем [17–19].

Это указывает на то, что характер процесса явно не Гауссов, допускающий корреляции на сколь угодно больших пространственно-временных масштабах. Как отмечается в [16], “Дальнейшие корреляционные эффекты проявляются в “странном” (негауссовом) поведении

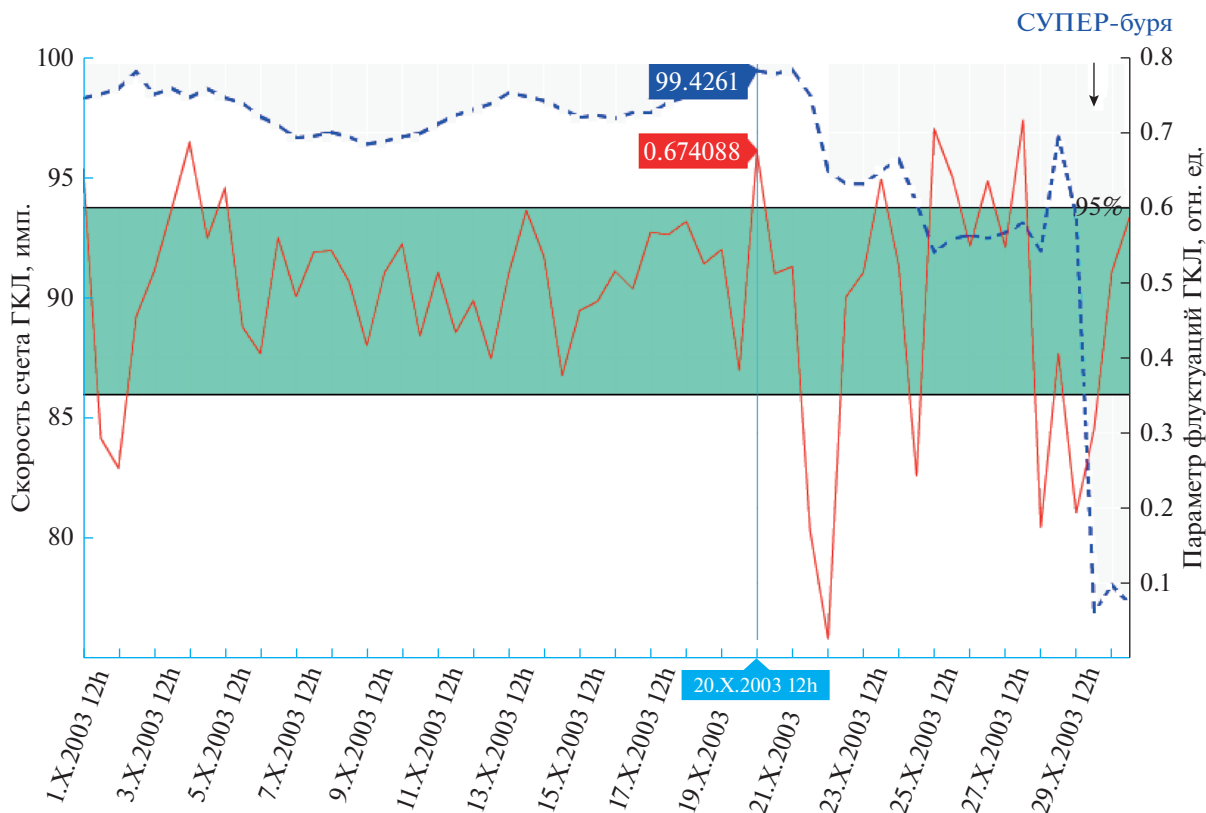


Рис. 1. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ с 1–30.X.2003 по 5-мин данным мировой сети высокоширотных станций космических лучей. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения параметра флуктуаций ГКЛ; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 мин (усредненная за 12 ч) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: $0.35 < P < 0.60$ – область “Космического шума”.

кинетических процессов...” и, далее: “Можно сказать, что странность и фрактальность являются взаимно согласованными характеристиками одного и того же явления – самоорганизации системы к неравновесному турбулентному состоянию, динамика которого целиком подчиняется многомасштабным корреляционным взаимодействиям”. Следовательно, анализ “хвостов”, т.е. высших моментов функции распределения может оказаться достаточно информативным в задаче обнаружения переходного режима в окрестности фронта ударной волны.

С другой стороны, из вероятностной теории разрушения сплошных сред (и теории надежности) известно, что обобщенная функция распределения Вейбулла–Гнеденко описывает выход системы на предельный критический режим [20]. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим в окрестности фронта межпланетной ударной волны, причем, независимо от условий ее формирования в солнечном ветре. Максимум функции интенсивности отказов, или максимум функции Риска, есть, по сути – вероятность достижения критического значения анализи-

руемой переменной, в данном случае, интенсивности космических лучей. Отношение плотности функции распределения Вейбулла–Гнеденко к “функции надежности” (которая является дополнением к интегральной функции распределения) и есть искомая вероятность (функция Риска) или параметр флуктуаций космических лучей [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА К УДАРНОЙ ВОЛНЕ ПО ПАРАМЕТРУ ФЛУКТУАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Результаты применения способа вероятностной идентификации переходного режима в окрестности крупномасштабного возмущения солнечного ветра, на примере известного экстремального события в октябре 2003 г., представлены на рис. 1. Кроме экстремального понижения интенсивности ГКЛ 28–31.X.2003 в анализируемый период зарегистрировано также 2 события средней величины: 21–22.X и 24–25.X.2003. Всем трем событиям, в параметре флуктуаций предшествуют значимые (на уровне 95%) значения пара-

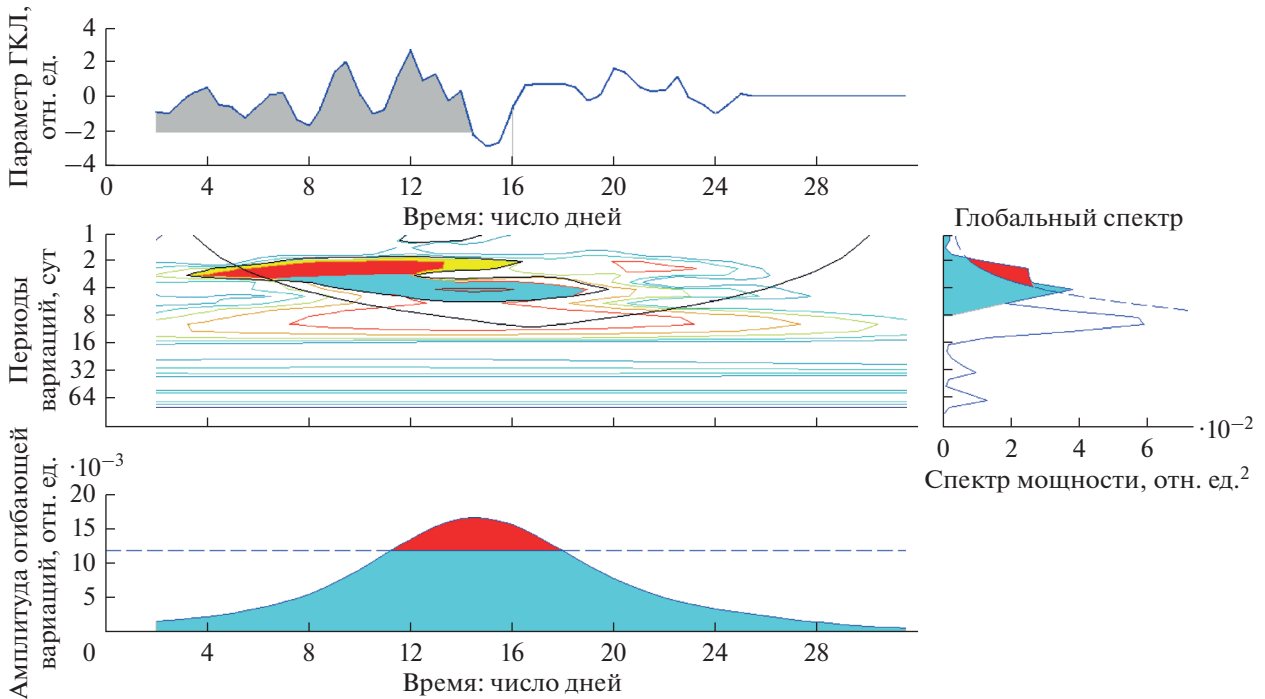


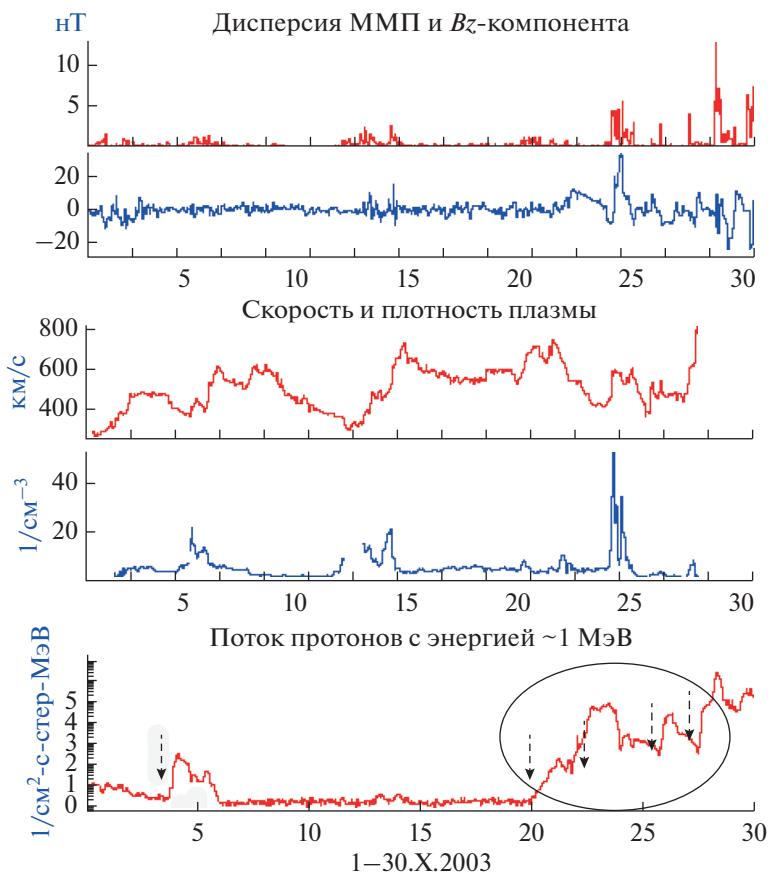
Рис. 2. Иллюстрация процесса *нелинейного укручения* осцилляций гелиосферного токового слоя в космических лучах в октябре–ноябре 2003 г. по результатам вейвлет-анализа. Осцилляция на диаграмме периодов выделена цветом. В осцилляциях явно выражен тренд в высокочастотную область: систематическое смещение периода вариаций в сторону меньших периодов (от 4 до 2 сут). Справа – глобальный спектр осцилляций в целом за анализируемый период. Внизу – огибающая амплитуд осцилляций в относительных единицах.

метра флуктуаций ГКЛ, т.е. – предвестники: 20.X, 23.X и 26–27.X.2003. Предвестник от 20.X.2003 отражает начало быстрого роста активной области (АО) № 484. На момент появления указанной области из-за восточного края солнечного диска 18.X.2003 она была едва заметной, но начиная со следующих суток 19.X.2003, началась ее быстрая активизация: 19–20.X.2003 были зарегистрированы большие вспышки класса *M1* и *X1*.

Предвестник 23.X.2003 можно было бы отнести за счет быстрой активизации того же источника (АО № 484), но нельзя исключить и вклад вновь появившейся из-за восточного края лимба Солнца, более мощной АО 486 (из этой активной области 23.X была зарегистрирована большая вспышка класса *X5*). Последующие низкие значения параметра флуктуаций 21.X, 24.X и 28–30.X.2003, констатируют факт диагностики прогнозируемых событий, т.е. регистрацию эффектов Форбуша в интенсивности ГКЛ. Гигантское понижение интенсивности ГКЛ 28–30.X.2003 (как и предшествующее понижение 24–25.X.2003) обусловлено, скорее всего, кумулятивным эффектом в магнитопазменном токовом слое, т.е. гелиосферном токовом слое (ГТС) от серии мощных выбросов корональной массы (СМЕ) обусловленных большими и очень большими вспышками в анализируемый период класса *M1–M7* и *X10–X17*.

Анализ динамики вариаций параметра флуктуаций ГКЛ в октябре 2003 г. осуществляется с помощью вейвлет-анализа. Для этого рассмотрим все события в целом, в частности, за период с 16.X–14.XI.2003 по данным ст. Тикси. В результате, получены указания на важную роль процесса нелинейного укручения вариации ГТС: вариация с периодом ≈ 4 сут трансформируется в “осцилляцию” с меньшим периодом ≈ 2 сут, но с большей амплитудой (рис. 2). Вывод об осцилляциях следует из явно выраженной “монокromaticности” вариации: она выделена цветом на диаграмме периодов. Причем, с явным трендом в высокочастотную область: наблюдается систематическое смещение периода вариаций ГТС в сторону меньших периодов. И так, вплоть до момента расщепления спектральной “линии” осцилляций, который хорошо заметен как на диаграмме развертки спектра во времени в средней части рисунка (рис. 2).

В итоге, процесс завершается регистрацией экстремальной по мощности ударной волны (Приложение 1). В серийных событиях, аналогичных экстремальным событиям в октябре 2003 г., довольно сложно, а то и просто невозможно отождествить доминирующий источник активности: в это время на видимой части солнечного диска были зарегистрированы 3 мощных активных области (№ 484, 486 и 488). В подобных слу-



Приложение 1. Дисперсия и B_z -компонента межпланетного магнитного поля, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток “штормовых” частиц – низкоэнергичных протонов (на примере частиц с энергией ~ 1 МэВ), по данным измерений на космическом аппарате США, ACE с 1–30.X.2003.

чаях определяющую роль играют нелинейные эффекты, приводящие к укрупнению осцилляций в магнитоплазменном токовом слое – своеобразный аналог “космического цунами” в ГТС.

Наибольшее по амплитуде (с начала 21 века) понижение интенсивности ГКЛ 28–30.X.2003 сопровождается не менее экстремальным радиационным штормом и супер-бурей, что подтверждается регистрацией в третьей декаде октября 2003 г. значительного потока осциллирующих штормовых частиц, в достаточно широком интервале энергий (в том числе, протонов с энергией ~ 1 МэВ). Это следует из данных измерений на американском космическом аппарате ACE: максимальная величина потока достигается непосредственно перед эффектом Форбуша 28–30.X.2003 (Приложение 1). Вертикальными стрелками показано местоположение предвестников. Видно, что предвестники предшествуют всем пяти возрастаниям низкоэнергичных частиц. В том числе, и для относительно небольшого события 5.X.2003. В это время (5–6.X) Земля вошла в высокоскоростной поток солнечного ветра из корональной дыры. Это яв-

ляется хорошей иллюстрацией того, что предвестники регистрируются, как перед вспышечными ударными волнами, так и перед высокоскоростными потоками солнечного ветра.

Не менее ярким случаем, подтверждающим кумулятивную природу экстремальных событий Космической погоды, может служить супер-буря 7–9.XI.2004. В интервале с 3–10.XI.2004 были зарегистрированы вспышки класса M и X , сопровождающиеся серией (порядка 10!) мощных выбросов корональной массы – СМЕ. Если первый предвестник (30–31.X.2004) сложно отнести конкретно к какой либо АО (№ 691, 693 или 696), то предвестник от 6.XI.2004 (рис. 3) можно уже определенно отнести к, практически, единственному источнику (АО 696). В отличие от событий в октябре 2003 г. (когда наблюдались 3 мощных активных области), в событиях первой декады ноября 2004 доминировал один источник – АО 696: были зарегистрированы, по меньшей мере, 3 вспышки класса X , сопровождавшихся серией мощных СМЕ [22]. Сложный, осциллирующий характер параметров солнечного ветра и в этом событии,

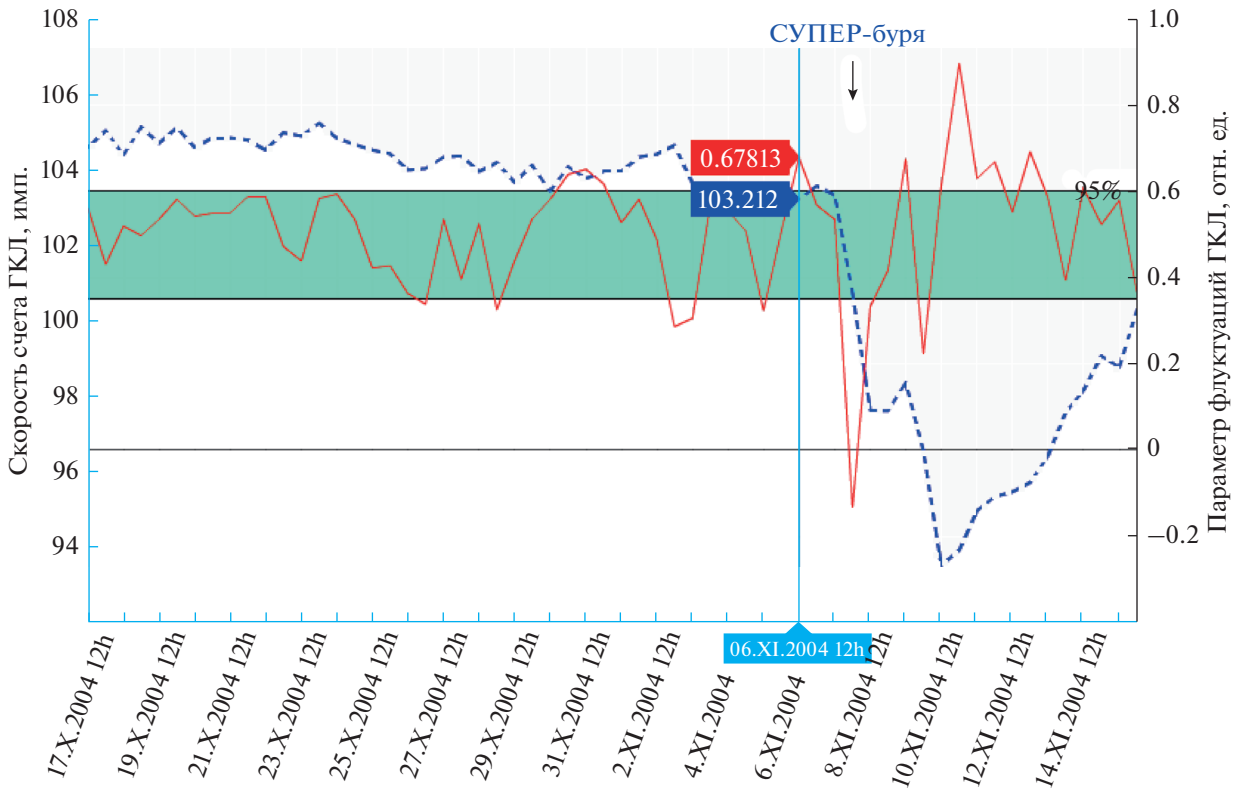


Рис. 3. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ с 17.X.2004—15.XI.2004 по 5-мин данным мировой сети высокоширотных станций космических лучей. Обозначения как на рис. 1.

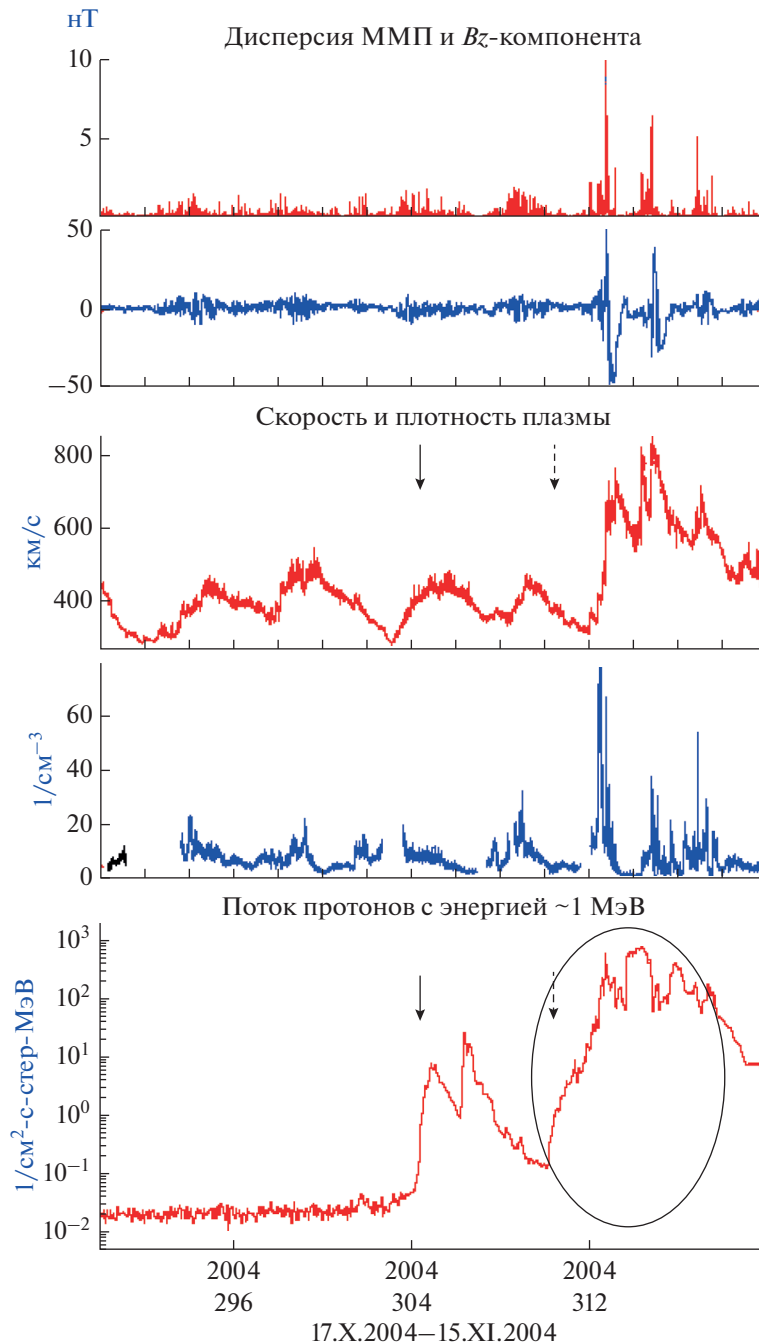
проявился в похожих осцилляциях потока штормовых частиц (Приложение 2) и последующего двухступенчатого эффекта Форбуша 7–10.XI.2004 с амплитудой 7–8% (рис. 3), сопровождавшегося супер-бурей 7–10.XI.2004.

Вполне вероятно, что природа супер-бурь 30–31.X.2003 и 7–9.XI.2004 имеет общее, происхождение: как результат взаимодействия ударных волн (см. также [23]). В таком случае, вряд ли имеет смысл искать ту “единственную” гигантскую вспышку, которая могла бы привести к любому, из указанных выше, экстремальных событий Космической погоды.

Одна из самых больших магнитных бурь, но уже в новом 24 цикле, была зарегистрирована 22–23.VI.2015 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201506/index.html). Не менее мощным оказался и эффект Форбуша с 21–23.VI.2015, предвестник которого был зарегистрирован 18.VI.2015 (рис. 4). Как и в предыдущих событиях, значительная амплитуда данного события обусловлена, скорее всего, эффектом взаимодействия ударных волн от серии СМЕ, вызванных целой серией больших вспышек: класса *M1*, *M3* и *M6*, с 20–22.VI.2015 (<https://spaceweather.com/archive.php?day=21&month=06&year=2015&view=view>). Сложный характер взаимодействующих ударных волн следует

как из данных измерений на космическом аппарате *ACE* (Приложение 3), так и из результатов модельных расчетов (Приложение 4), проведенных в Goddard Space Weather Lab за 22.VI.2015. Земля обозначена справа от диска Солнца кружком на горизонтальной оси. И в данном случае, “сдвоенные” низкие значения параметра флуктуаций ГКЛ 22.VI.2015 (рис. 4) являются маркером регистрации прихода “спаренной” ударной волны на орбиту Земли 22.VI.2015. Это подтверждается, прежде всего, характерным “парным” профилем плотности солнечного ветра (Приложение 3).

Полученный в данной работе вывод о важной роли эффекта взаимодействия ударных волн подтверждается и другими исследователями: в частности, данными непосредственных наблюдений взаимодействия ударных волн от серии СМЕ на космических аппаратах [23, 24]. Распространение ударных волн, очевидно, и приводит к кумулятивному эффекту усиления ударных волн на орбите Земли с развитыми осцилляциями и последующему экстремальному событию в Космической погоде: к наиболее опасному – усиленному потоку, так называемых, “штормовых” частиц в широком интервале энергий: от десятков КэВ до десятков МэВ (Приложения 1–3).



Приложение 2. Как в Приложении 1 с 17.X по 15.XI.2004.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше уже отмечался самоподобный или фрактальный характер магнитного поля на переходном режиме солнечного ветра. На это указывает как степенной характер зависимости числа понижений интенсивности ГКЛ от их амплитуды, так и низкое и конечное ($d = 2.5-3$) значение корреляционной (фрактальной) размерности процесса на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла солнечной активности [12, 13].

Вообще говоря, траектории космических лучей во фрактальных магнитных полях существенно отличаются от броуновских траекторий. Это означает, что изменение функции зависит не только от ее значений в окрестности рассматриваемой точки (как это имеет место при нормальной диффузии), но и от ее значений в удаленных точках пространства [25]. К таким нелокальным процессам относят и немарковские процессы, т.е. процессы с “памятью”, когда приращения нельзя считать стационарными. В этом случае, мы имеем

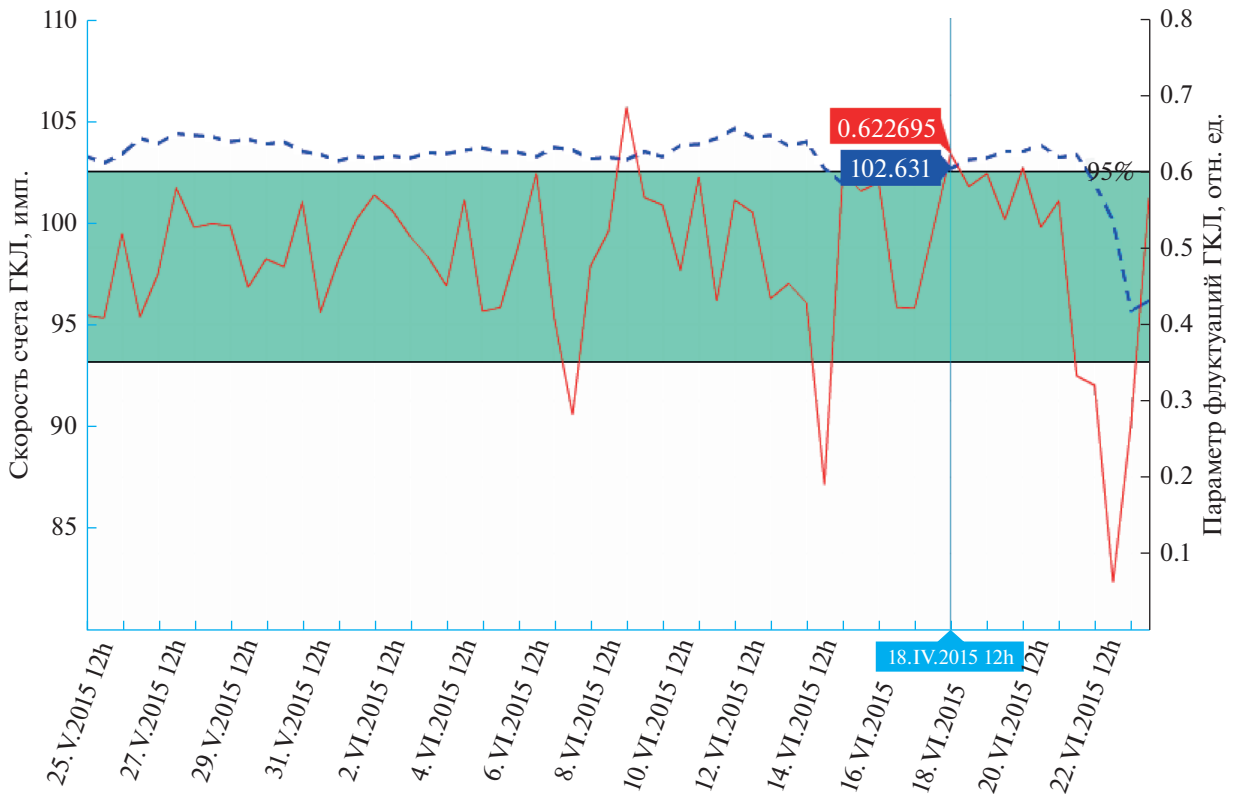


Рис. 4. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ с 25.V.2015–23.VI.2015 по 5-мин данным мировой сети высокоширотных станций космических лучей. Обозначения как на рис. 1.

дело уже с “фрактальным броуновским движением” [26].

Таким образом, нелокальные особенности поведения космических лучей в окрестности ударной волны с фрактальными свойствами замагниченной среды имеют место, как в пространстве, так и во времени. Очевидно, можно сделать вывод, что нелокальность космических лучей в окрестности перед фронтом ударной волны обусловлена фрактальностью замагниченной среды находящейся в состоянии “самоорганизованной критичности”: в этом физическая сущность переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра.

На нелокальность и нелинейность процессов, особенно в случае мощных событий на Солнце, указывалось в [27]: “...наличие прямого энергетического каскада означает сильную делокализацию энергонесущей области”. И далее: “отличие ситуационного подхода от событийного по существу состоит в необходимости рассмотрения и учета более длительных интервалов времени и более крупных областей в пространстве на Солнце и в гелиосфере...” [27]. Подобное же, по сути, утверждение о нелокальности, было выдвинуто ранее М.Н. Гневнышевым, отмечается в [28]: “... физи-

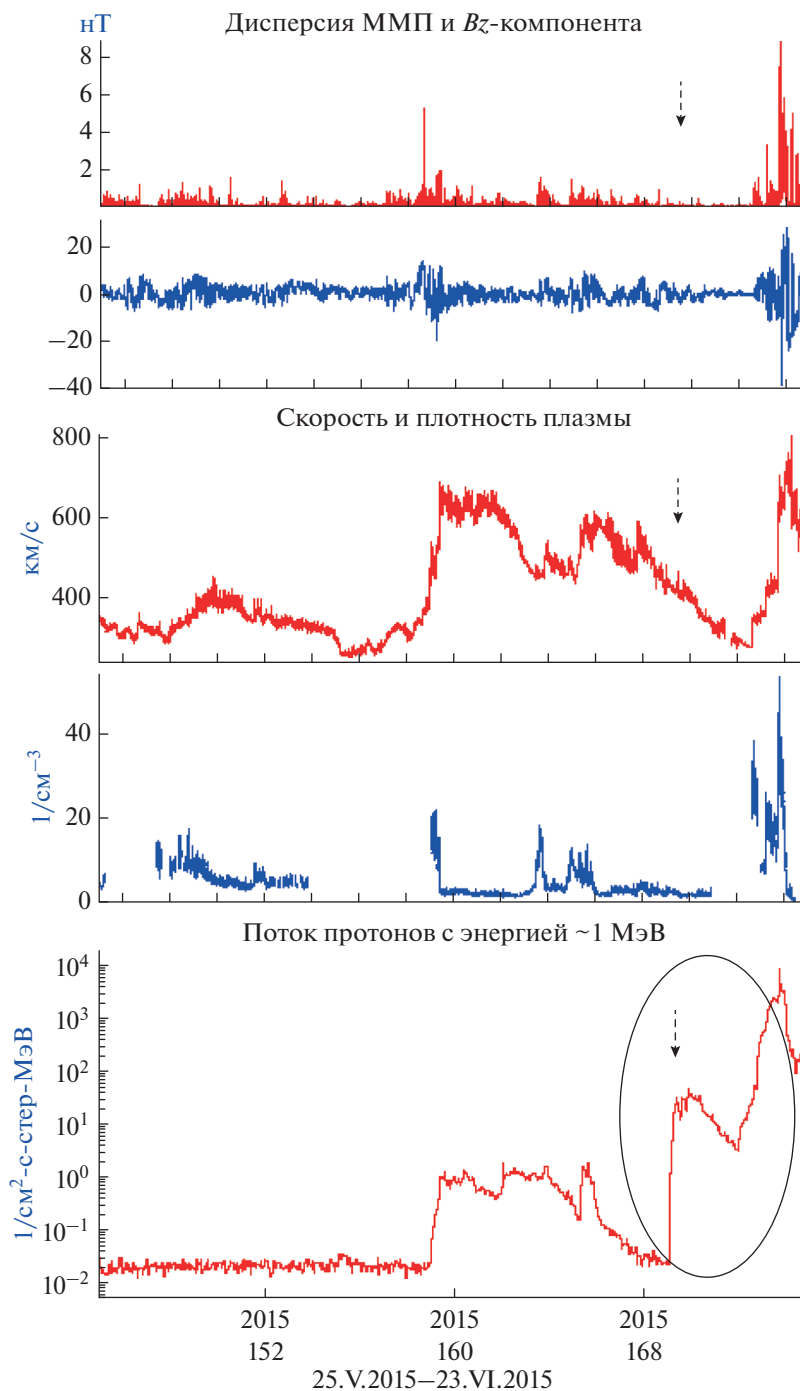
чески связанные солнечные процессы необязательно должны происходить одновременно”.

ВЫВОДЫ

1. Траектории космических лучей во фрактальных магнитных полях существенно отличаются от броуновских траекторий обычной диффузии, что и обуславливает нелокальные свойства космических лучей во фрактальной замагниченной среде в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра.

2. Нелокальность космических лучей проявляется в кластеризации фазового объема космических лучей: регистрации коррелированных флуктуаций в виде пучков частиц — эффект “гало” в космических лучах в области перед фронтом межпланетной ударной волны.

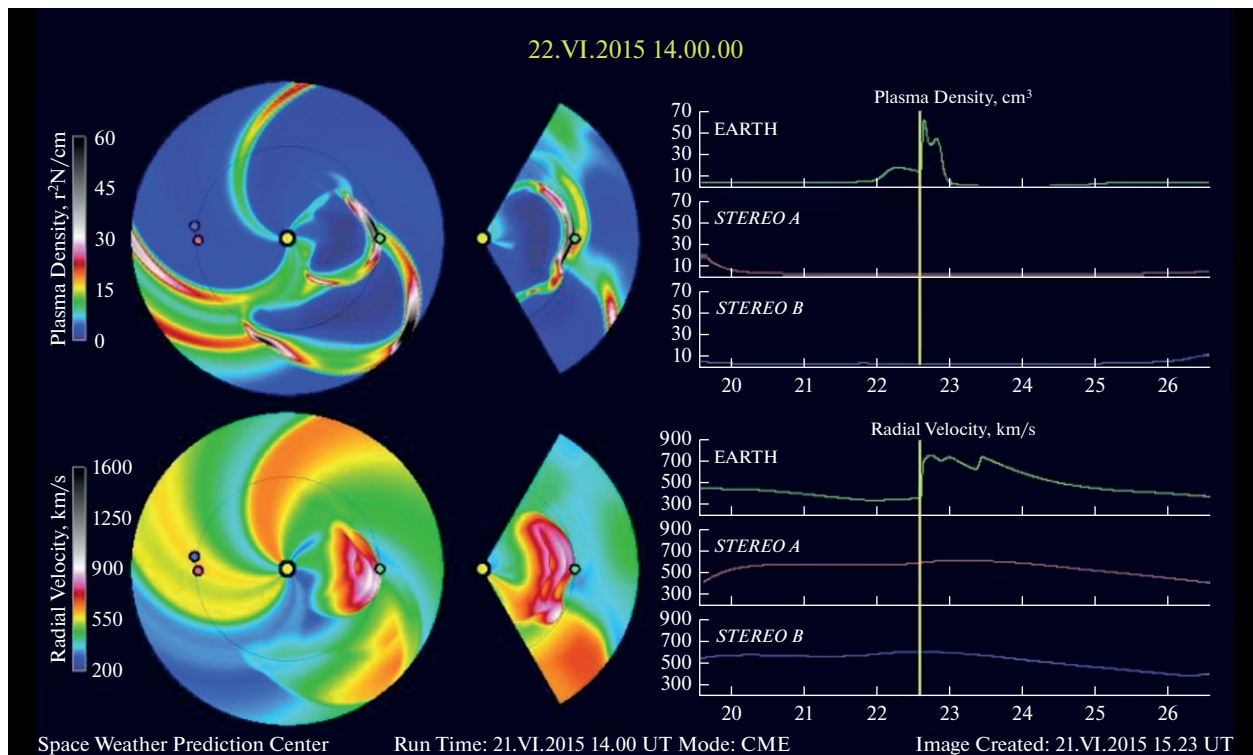
3. Показано, что высокие значимые (выше 90%) значения параметра флуктуаций ГКЛ, является вероятностным индикатором переходного, критического режима в окрестности перед фронтом ударной волны, по сути — предвестником прихода фронта ударной волны на орбиту Земли. Величина заблаговременности регистрации предвестника составляет величину порядка ~ 1 сут.



Приложение 3. Как в Приложении 1 с 25.V по 23.VI.2015.

4. Напротив, низкие — диагностические значения параметра флуктуаций являются маркером регистрации прихода ударной волны на орбиту Земли. Это подтверждается как модельными расчетами, проведенными в Goddard Space Weather Lab, так и данными наблюдений ударных волн на космическом аппарате ACE, США.

5. Весьма вероятно, что природа экстремальных событий Космической погоды имеет общее происхождение: как результат нелинейного взаимодействия ударных волн с явно выраженными осцилляциями. Это подтверждается данными наблюдений ударных волн на космическом аппарате ACE, США.



Приложение 4. Анимационная схема динамики экстремального события 22.VI.2015 от активной области из района центрального меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab. Земля обозначена кружком на горизонтальной оси справа от диска Солнца.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Вячеславу Козлову за разработку, создание и программное сопровождение роботизированной экспертной системы прогноза и диагностики геоэффективных событий Космической погоды в режиме реального времени Cyber-FORSHOCK (<http://www.forshock.ru/pred.html>), по 5-мин данным Европейской БД космических лучей.

Авторы выражают также искреннюю признательность и благодарность Илье Уоскину, Университет г. Оулу, геофизическая обсерватория Соданкила (Финляндия, <http://cosmicrays oulu.fi/>) за любезно предоставленные кондиционные 5-мин данные измерений нейтронного монитора ст. Оулу за длительный период времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымский Г.Ф. Основные проблемы современной космофизики. Методологические проблемы развития науки в регионе. Новосибирск: Наука, 1987.
2. Крымский Г.Ф., Транский И.А. Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. Динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1973.
3. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елиин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэронавигация. 1974. Т. 14. № 2. С. 196–200.
4. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елиин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и Форбуш-эффекты // Геомагнетизм и аэронавигация. 1974. Т. 14. № 3. С. 407–410.
5. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Шафер Г.В. и др. Модели ударных волн и наблюдаемые свойства форбуш-эффектов. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975. С. 58–68.
6. Крымский Г.Ф., Елиин В.К., Ромащенко Ю.А. и др. Магнитные пробки в ударных волнах и их роль в ускорении частиц. Связь физических процессов в ионосфере и магнитосфере Земли с параметрами солнечного ветра. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1977.
7. Kamoldinov S.M. et al. The Influence of Magnetic “Corks” upon the Galactic Cosmic Ray Distribution // Proc. 14 ICRC. 1975. V.3. P. 838–843.
8. Айманова Г.К., Демченко Б.И., Макаренко Н.Г. Прикладные методы топологической динамики. 2. Численный анализ хаоса. Препринт Астрофизического Института им. В.Г. Фесенкова. 1990. № 90-03. С. 52.
9. Рабинович М.И. Нелинейная динамика и турбулентность. Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: Наука, 1989.
10. Morishita I., Nagashima K., Sakakibara S. et al. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease // Proc. 21 ICRC. 1990. V. 6. P. 217–219.

11. *Lindsay G.M., Russel C.T., Luhman J.G. et al.* On the Sources of Interplanetary Shocks at 0.72 AU // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № A1. P. 11–17.
12. *Козлов В.И.* Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1999. Т. 39. № 1. С. 95–99.
13. *Козлов В.И.* Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1999. Т. 39. № 1. С. 100–104.
14. *Козлов В.И., Козлов В.В.* Аритмия Солнца. В космических лучах. Якутск: ФГБУН ИМЗ СО РАН, ИКФИА СО РАН, 2019.
15. *Dennis B.R.* Solar hard X-ray bursts // *Solar Physics.* 1985. V. 100. P. 465–490.
16. *Зеленый Л.М., Милованов А.В.* Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // *УФН.* 2004. Т. 174. № 8. С. 809–852.
17. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-organized criticality // *Phys. Rev.* 1988. V. 38. № 1. P. 364–374.
18. *Bak P.* How nature works. The science of self-organized criticality. N.Y.: Springer-Verlag, 1996.
19. *Подлазов А.В., Осокин А.Р.* Самоорганизованная критичность эруптивных процессов в солнечной плазме // *Матем. моделирование.* 2002. Т. 14. № 2. С. 118–126.
20. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д.* Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983.
21. *Козлов В.И., Козлов В.В.* Параметр флуктуаций галактических космических лучей – индикатор степени неоднородности магнитного поля // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 2011. Т. 51. № 2. С. 191–201.
22. *Yermolaev Yu.I., Zelenyi L.M., Zastenker G.N. et al.* A Year Later: Solar, Heliospheric, and Magnetospheric Disturbances in November 2004 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2005. V. 45. № 6. P. 723–763.
23. *Scolini C., Chané E., Temmer M., Kilpua E.K.J. et al.* CME–CME Interactions as Sources of CME Geoeffectiveness: the Formation of the Complex Ejecta and Intense Geomagnetic Storm in 2017 Early September // *Astrophysical J. Supplement Series.* 2020. V. 247. № 1. P. 21–27.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6216>
24. *Lumme E., Kilpua E., Palmerio E. et al.* Multipoint Observations of the June 2012 Interacting Interplanetary Flux Ropes // *Astronomy and Space Science.* 2019. V. 6. Article number 50.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00050>
25. *Учайкин В.В.* Стохастические модели в кинетической теории космических лучей. Ульяновск: УлГУ, 2011.
26. *Кроновер Р.М.* Фракталы и хаос в динамических системах. М.: ПОСТМАРКЕТ, 2000.
27. *Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др.* Солнечные и гелиосферные явления в октябрь–ноябре 2003 г.: причины и следствия // *Космич. исслед.* 2004. Т. 42. № 5. С. 453–508.
28. *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д.* Глобальные комплексы солнечной активности // *Астрономический журн.* 2013. Т. 90. № 10. С. 857–868.