# О КУМУЛЯТИВНОЙ ПРИРОДЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Козлов В.И., Крымский Г.Ф.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера, СО РАН, г. Якутск, <u>cosmoprognoz@mail.ru</u>

### АННОТАЦИЯ

Исследуется переходный режим в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра по изучению «групповых» особенностей поведения космических лучей высоких энергий. Представлена вероятностная идентификация переходного режима вблизи фронта межпланетной ударной волны (http://www.forshock.ru/pred.html). Получены указания на важную роль процесса нелинейной динамики крупномасштабных осцилляций гелиосферного токового слоя (ГТС) после серии выбросов корональной массы (СМЕ) во время активной фазы солнечного цикла. Очевидно, что природа наиболее экстремальных событий Космической погоды имеет общее, кумулятивное происхождение: как результат взаимодействия «догоняющих» (в среде с убывающей «раз за разом» плотностью) друг друга ударных волн. Это подтверждается данными непосредственных наблюдений взаимодействия ударных волн от серии CME на космических аппаратах.

# ABOUT THE CUMULATIVE NATURE OF EXTREMAL EVENTS OF SPACE WEATHER

#### Kozlov V.I., Krymsky G.F.

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SD RAS, Yakutsk, Russia, <u>cosmoprognoz@mail.ru</u>

## ABSTRACT

By us are revealed the "transition regime" in the vicinity of the front of a large-scale solar wind disturbance by research the "group" features of the behavior of high-energy cosmic rays. The probabilistic identification of the transition regime near the front of the interplanetary shock wave is presented (http://www.forshock.ru/pred.html). Indications are obtained of the important role of the process of nonlinear dynamics of large-scale oscillations of the heliospheric current sheet (HCS) after a series of coronal mass ejections (CMEs) during the active phase of the solar cycle. It is possible that the nature of the most extreme events of Cosmic weather has a common, cumulative origin: as a result of the interaction of "catching up" (in an environment with "time from time" decreasing density) shock waves. This is confirmed by data from direct observations of the interaction of shock waves (after series CME) on spacecrafts.

ТЕЛЕФОН для связи: 8(999)8463269

#### введение

Как известно, в диффузионном приближении быстрым частицам приписываются индивидуальные случайные траектории не связанные между собой. В то же время на малых пространственно-временных масштабах должна быть существенной корреляция траекторий, вследствие которой группы частиц, близких в фазовом пространстве, сравнительно долго сохраняются как компактные образования с «единой» траекторией. Групповое поведение частиц представляет большой интерес с различных точек зрения. Прежде всего, это важно при изучении нелинейного взаимодействия космических лучей с окружающей средой, а также для диагностики крупномасштабных процессов в космической плазме [1].

Целью работы является изучение переходного режима в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра - ударной волны по исследованию особенностей космических лучей, обусловленных флуктуаций 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 или «струи» солнечного ветра и т.д.) вызывают понижения интенсивности космических лучей значительно меньшей амплитуды. В отсутствие спорадической (вспышечной) активности «струи» солнечного ветра также могут иметь предвестники в космических лучах, но это происходит лишь при достижении достаточных градиентов в параметрах солнечного ветра на фронтах разноскоростных потоков. В общем случае, невозможно «а priori» отличить предвестники обусловленных вспышечными ударными волнами от предвестников на границе разноскоростных потоков солнечного ветра.

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 ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ.

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  $A \ge 1,5\%$  в цикле CA 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 (CME), 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)~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.

# ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ СОБЫТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ - КАК ПРОЯВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ «САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТИ».

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 выявлен степенной характер распределения числа событий в зависимости от их амплитуды (рис. 1). Это согласуется с результатом, полученным ранее в [14], что подтверждается близостью степенных показателей т: "-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 т с очевидностью следует из аналитического выражения его связи с фрактальной размерностью: d=t+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.

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 осложняет прогноз) «стравливается» избыток запасенной в системе энергии. При  $\tau \le 3$  степенное распределение обладает бесконечной дисперсией, т.е. не имеет смысла пытаться характеризовать отклонение значений случайной величины от ее математического ожидания, а при  $\tau \le 2$  бесконечным становится и само математическое ожидание. В этом 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 масштабно-инвариантных (фрактальных) систем [15-17].

Это указывает на то, что характер процесса явно не Гауссов, допускающий корреляции на сколь угодно больших пространственно-временных масштабах. Как отмечается в [18], «Дальнодействующие корреляционные эффекты проявляются в «странном» (негауссовом) поведении 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.

В частности, с помощью мониторинга состояния среды посредством космических лучей с целью раннего обнаружения уже случившейся «катастрофы» (в нашем случае, крупномасштабного возмущения солнечного ветра – ударной волны) на расстоянии от Земли равном длине пробега космических лучей. Это обязывает нас, образно говоря, постоянно «держать руку на пульсе». Осознание этого и определило необходимость разработки и создания системы наземного мониторинга космических лучей В Полярной геокосмофизической обсерватории (ПГО) Тикси в 1981 г. Ниже, предлагается подход, который в некоторой степени решает проблему «прогноза», точнее, раннего выявления геоэффективных событий Космической погоды.

Предложенный способ выгодно отличается простотой реализации и эффективностью, т. к. используется уже существующая мировая сеть наземных станций космических лучей – высокоширотных нейтронных мониторов, и оперативностью. Оперативность способа заключается в том, что скорость обнаружения взрывных ударных волн от солнечных вспышек почти мгновенна, т. к. космические лучи, регистрируемые наземными станциями, движутся, практически, со световой скоростью. При этом, расстояние, или "длина пробега" частиц космических лучей, начиная с которого наземные станции космических лучей мерцания (коррелированные флуктуации) космических регистрируют лучей ОТ приближающегося фронта межпланетного возмущения, по меньшей мере, в 10 раз больше расстояния от Земли до местонахождения, например, американского космического аппарата SOHO в "точке либрации".

По этой причине заблаговременность обнаружения мощной ударной волны по флуктуациям космических лучей более чем в 10 раз (≈1 сутки) больше заблаговременности, достигаемой на космическом аппарате (≈15 мин). Экономическая же эффективность предложенного дистанционного способа раннего обнаружения вспышечных ударных волн говорит сама за себя. Стоимость и эксплуатация, к примеру, американской спутниковой

группировки прогноза – порядка ~1 млрд. долл. Ущерб от всевозможных потерь, связанных с пропуском подобных «космических цунами», представляет собой не менее значительную сумму. Все возрастающая зависимость современной цивилизации от высокотехнологичных систем жизнеобеспечения в космосе, в воздухе и на Земле делает нас, по сути, заложниками научно-технического прогресса основанного, в частности, на спутниковых технологиях, в первую очередь подверженных разрушающему воздействию экстремальных проявлений Космической погоды. Все это указывает на актуальность проблемы раннего обнаружения радиационного шторма, сопровождающегося электромагнитной бурей.

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА В ОКРЕСТНОСТИ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Из вероятностной теории разрушения сплошных сред (и теории надежности) известно, что обобщенная функция распределения Вейбулла-Гнеденко описывает выход системы на предельный критический режим [19]. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим выхода на активную фазу 11-летнего цикла или в окрестность межпланетной ударной волны. На языке вероятностной теории 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 космических лучей. Отношение плотности функции распределения Вейбулла к «функции надежности» (Приложение 1) и есть искомая вероятность (функция Риска) или ПАРАМЕТР флуктуаций космических лучей [20].

Для расчета вероятности достижения интенсивностью космических лучей критического значения на стадии переходного режима, потребуется оценка параметра формы эмпирического распределения Вейбулла, который определяет степень отклонения формы аппроксимирующей функции эмпирической гистограммы 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 искомых параметров формы и масштаба. Параметр формы является КЛЮЧЕВЫМ параметром: при достижении им критической величины значение параметра определяется как предвестник выхода на критический (переходный) режим. Параметр масштаба определяется средним значением эмпирической (частотной) гистограммы распределения интенсивности ГКЛ.

Далее, остается только выделить сигнал-предвестник из Гауссова шума: Гауссов шум содержится, проще говоря, в «до критической» линейной области функции Риска, а искомый сигнал-предвестник в «за критической» нелинейной. Искомая, нелинейная компонента сигнала-предвестника формируется при превышении степени (вероятности) процесса критического значения, т.е. при Р>Ркр. ТЕСТИРОВАНИЕ предложенного способа на контрольном ряде, представляющего собой случайный ряд чисел показало, что значения вероятности (далее, параметр флуктуаций) лежащие ниже уровня Р≤0,65 можно уверенно (на уровне значимости 90%) отнести к гауссовскому шуму.

Калибровку «нуля» можно осуществить и по реальным данным. На основе полученного ранее опыта мониторинга космических лучей в Обсерватории Тикси, нами была создана роботизированная экспертная система диагностики и прогноза Космической погоды «Cyber-FORSHOCK». Калибровку «нуля» параметра флуктуаций ГКЛ лучше всего проводить на фазе минимума 11-летнего цикла, когда вспышечная активность минимальна (рис. 2). Важно заметить, что характер «Космического шума» в этот период явно хаотический. Очевидно, что это связано с хаотической природой доминирующего в это время радиационного фона галактических космических лучей, обусловленного снижением солнечной активности в период минимума солнечного цикла: зависимость корреляционной (фрактальной) размерности от размерности вложенного фазового пространства в период минимума 11-летнего цикла имеет характерную, для случайного процесса, монотонную зависимость d(n)~n [20].

Необходимая операция подавления космического «шума» представляет собой процедуру подачи на вход анализатора, наряду с исходным сигналом, двух вариантов «расфазированного» исходного сигнала, с выходом на данном блоке - среднего значения от их суммы. Притом, что величина временного сдвига (±1 час) обоих расфазированных сигналов много меньше, чем интервал усреднения параметра флуктуаций (12 часов). Эта процедура (за счет взаимного подавления при суммировании случайной компоненты сигналов) позволила, практически, вдвое уменьшить дисперсию исходного временного ряда.

Кроме того, с целью исключения ситуации «пропуска цели» (известной в радиофизике как «ошибка 1 рода»), а также случаев регистрации НЕ геоэффективных событий Космической погоды, фактически - «ложных тревог» («ошибки 2 рода»), была проведена настройка или адаптация созданной роботизированной экспертной системы «Cyber-FORSHOCK» к обнаружению геоэффективных событий Космической погоды. Для этого

использовалась процедура расширения частотного диапазона» вариаций космических лучей. Блок расширения диапазона частот включает в себя использование в процедуре исключения тренда полиномов не только 2-го, но и 3-го порядков, «одновременно». Использование полиномов 2-го и 3-го порядка позволяет расширить частотный диапазон оставшихся (после вычитания тренда) мелкомасштабных вариаций.

# О КУМУЛЯТИВНОЙ ПРИРОДЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Результаты применения способа вероятностной идентификации переходного режима в окрестности крупномасштабного возмущения солнечного ветра на примере известных событий, в частности, в октябре 2003 г., представлены на рис. 3. Кроме экстремального понижения интенсивности ГКЛ 28-31 октября 2003 г. в анализируемый период зарегистрировано также 2 события средней величины: 21-22 октября и 24-25 октября. Всем трем событиям, в параметре флуктуаций предшествуют значимые (на уровне 95%) значения параметра флуктуаций ГКЛ, т.е. – предвестники: 20 октября, 23 октября и 26-27 октября. Предвестник от 20 октября отражает начало быстрого роста активной области (AO) № 484. На момент появления указанной области из-за восточного края солнечного диска 18 октября 2003 г. она была едва заметной, но начиная со следующих суток 19 октября, началась ее быстрая активизация: 19-20 октября были зарегистрированы большие вспышки класса М1 и X1.

Предвестник 23 октября 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 октября была зарегистрирована большая вспышка класса Х5). Последующие низкие значения параметра флуктуаций 21, 24 и 28-30 октября, констатируют факт диагностики прогнозируемых событий, т.е. регистрацию эффектов Форбуша в интенсивности ГКЛ. Гигантское понижение интенсивности ГКЛ 28-30 октября (как и предшествующее понижение 24-25 октября) обусловлено, скорее всего, кумулятивным эффектом в магнитоплазменном 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 М1-М7 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 16.10.2003 – 14.11.2003 по данным ст. Тикси. В результате, получены указания на важную роль процесса нелинейного укручения вариации ГТС: вариация с

периодом  $\approx 4$  сут. трансформируется в осцилляцию с меньшим периодом  $\approx 2$  сут., но с большей амплитудой (рис. 4). Вывод об «осцилляциях» следует из «монохроматичности» 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, так и на графике глобального спектра в целом за весь анализируемый период (рис. 4). В итоге, процесс завершается регистрацией экстремальной по мощности ударной волны (Приложение 2а-д).

В серийных событиях, аналогичных экстремальным событиям в октябре-ноябре 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 случаях определяющую роль играют нелинейные эффекты, приводящие к укручению осцилляций – своеобразный аналог «космического цунами» в ГТС.

Наибольшее по амплитуде (с начала 21 века) понижение интенсивности ГКЛ 28-30 октября 2003 г. сопровождается не менее экстремальным радиационным штормом и СУПЕРбурей. Это подтверждается регистрацией в третьей декаде октября 2003 г. значительного потока штормовых частиц в широком интервале энергий (в том числе, и протонов с энергией ~1 МэВ) по данным измерений на американском космическом аппарате АСЕ, с максимальной величиной потока непосредственно перед эффектом Форбуша 28-30 октября 2003 г. (Приложение 2e). Вертикальными стрелками показано местоположение предвестников. Видно, что предвестники предшествуют всем пяти возрастаниям низкоэнергичных частиц. В том числе, и для относительно небольшого события 5 октября 2003 г. В это время (5-6 октября) Земля вошла в высокоскоростной поток солнечного ветра из корональной дыры. Это является хорошей иллюстрацией того, что предвестники регистрируются, как перед вспышечными ударными волнами, так И перед высокоскоростными потоками или «струями» солнечного ветра.

Обращает на себя внимание регистрация 3 ноября значимого предвестника перед гигантской рентгеновской вспышкой класса ≥Х28 случившейся 4 ноября, т.е. в момент захода мощного источника активности за западный край солнечного диска (рис. 5). И только местоположение источника не позволило ему проявиться на Земле должным образом (<u>http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=04&month=11&year=2003</u>). Тем не менее, через 2-3 суток после гигантской вспышки 4 ноября, в космических лучах 6-7 ноября было зарегистрировано небольшое понижение интенсивности ГКЛ, что подтверждается заметно

сниженным, т.е. диагностическим значением параметра флуктуаций ГКЛ в это время (рис. 5). Таким образом, одновременная регистрация 6-7.11.2003 и понижения интенсивности ГКЛ и низкого диагностического значения параметра флуктуаций явилось, своего рода, маркером хотя и мощного, но уже не столь геоэффективного, источника активности.

Тем не менее, потенциал активности всех трех активных областей сохранился: http://spaceweather.com/archive.php?day=12&month=11&year=2003&view=view. Сообщалось о продолжающейся активности вышеуказанных источников сопровождающейся целой серией СМЕ: 6, 7, 9, 11, 12 и 13 ноября. Возможно, что кумулятивный эффект от этих серийных выбросов СМЕ и проявился в регистрации предвестника в космических лучах 9-10 ноября (рис. 5), т.е. до выхода источника активности на видимую часть диска Солнца 14 ноября. Других явных потенциальных источников активности обнаружено не было: поверхность Солнца была, практически, без пятен. Регистрация низкого значения параметра флуктуаций космических лучей 14-15 ноября отражает результат диагностики крупномасштабного возмущения солнечного ветра на орбите Земли, вероятно, кумулятивного происхождения. С другой стороны, нельзя полностью исключить и возможный вклад высокоскоростного потока солнечного ветра в это время. Очередной предвестник 18 ноября был зарегистрирован за сутки до начала СУПЕР-бури 20 ноября (там же, рис. 5). СУПЕР-буря 20 ноября имеет, скорее всего, также кумулятивную природу, т.е. является результатом взаимодействия ударных волн после серии СМЕ из всех трех АО: 484, 486 и 488 (http://spaceweather.com/archive.php?day=19&month=11&year=2003&view=view).

Не менее ярким случаем, подтверждающим кумулятивную природу экстремальных событий Космической погоды, может служить СУПЕР-буря 7-9 ноября 2004 г. В интервале с 3-10 ноября были зарегистрированы вспышки класса М и Х, сопровождающиеся серией (порядка 10!) мощных выбросов корональной массы - СМЕ. Если первый предвестник (31 октября – 1 ноября 2004 г.) сложно отнести конкретно к какой либо АО (№№ 691, 693 или 696), то предвестник от 6 ноября (рис. 6) можно уже определенно отнести к, практически, единственному источнику (АО 696). В отличие от событий в октябре-ноябре 2003 г. (когда наблюдались 3 мощных активных области), в событиях первой декады ноября 2004 г. доминировал один источник - АО 696: были зарегистрированы, по меньшей мере, 3 вспышки X. сопровождавшихся серией мощных СМЕ [21]. класса Сложный характер взаимодействующих ударных волн на орбите Земли проявился в регистрации 7 и 9 ноября потока штормовых частиц от десятков КэВ до десятков МэВ и последующего двухступенчатого эффекта Форбуша 7-10 ноября 2004 г. с амплитудой 7-8%, сопровождавшегося СУПЕР-бурей 7-10 ноября.

Вполне вероятно, что природа всех трех СУПЕР-бурь 30-31 октября и 20 ноября 2003 г., а также 7-9 ноября 2004 г. имеет общее, кумулятивное происхождение: как результат взаимодействия догоняющих (в среде с убывающей «раз за разом» плотностью) друг друга ударных волн. 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.

Не менее благоприятные условия для идентификации источника активности на Солнце сложились в июне 2012 г.: рекуррентная «струя» солнечного ветра доминировала лишь в начале июня. Ее прохождение проявилось в космических лучах в регистрации низких значений параметра флуктуаций в первую неделю июня. Регистрация значимых предвестников 10 и 13 июня 2012 г. (рис. 7) пришлась на момент выхода на восточную часть диска Солнца активной области 1504, сопровождающейся вспышками класса М, которые 13 июня завершились выбросом корональной массы СМЕ. Начало выброса повторного СМЕ (https://spaceweather.com/archive.php?day=14&month=06&year=2012&view=view) было зарегистрировано на следующие сутки - 14 июня (Приложение 3). Приход ударной волны на орбиту Земли проявился в космических лучах в виде низкого значимого значения в параметре флуктуаций ГКЛ 16 июня, одновременно с регистрации эффекта Форбуша (рис. 7). Это подтверждается результатами моделирования проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным прямых измерений на космических аппаратах США (Приложение 4). Что одновременно указывает на хорошие диагностические возможности параметра флуктуаций ГКЛ: низкие значения параметра играют роль надежного маркера регистрации ударной волны на орбите Земли.

СУПЕР-буря была зарегистрирована также 22-23 июня 2015 г.: <u>http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\_provisional/201506/index.html</u>. Не менее мощным оказался и эффект Форбуша с 21-23 июня, предвестник которого был зарегистрирован 18 июня 2015 г. (рис. 8). Как и в предыдущих событиях, грандиозность данного события обусловлена, скорее всего, тем же самым кумулятивным эффектом взаимодействия догоняющих друг друга ударных волн от серии СМЕ, вызванных целой серией больших вспышек: класса М1, М3 и М6, с 20-22 июня https://spaceweather.com/archive.php?day=21&month=06&year=2015&view=view. Наглядно, это видно из результатов модельных расчетов (Приложение 5), проведенных в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B за 22 июня. Земля обозначена справа от диска Солнца кружком на горизонтальной оси. И в данном случае, низкие значения параметра флуктуаций ГКЛ 22 июня (рис. 8) являются маркером регистрации прихода ударной волны на орбиту Земли. Аналогично тому, что было ранее показано для подобного взаимодействия пары СМЕ в событии 15-16 июня 2012 г. (см. Приложения 3-4). Полученный в данной работе вывод о важной роли кумулятивного эффекта от серии (догоняющих друг друга) ударных волн подтверждается данными непосредственных наблюдений взаимодействия ударных волн от серии СМЕ на космических аппаратах в июне 2012 г.[22].

Аналогичная ситуация сложилась и в начале сентября 2017 г.: 2-3 сентября 2017 был зарегистрирован значимый предвестник (рис. 9) который, очевидно, связан с буквально «взрывным» (в течение 24 часов) ростом активности источника № 2673 вышедшего на центральный меридиан Солнца: 4-5 сентября были зарегистрированы 2 больших вспышки класса М4 и М5, которые сопровождались двумя выбросами корональной массы. Буквально на следующие сутки 06.09.2017, АО 2673 явилась источником мощной рентгеновской вспышки (https://spaceweather.com/archive.php?day=06&month=09&year=2017&view=view) класса Х9, с не менее мощным выбросом СМЕ. В соответствии с выводами авторов работы [23], более мощный выброс от 6 сентября, догнав два предыдущих, образовал сложное магнитоплазменное образование (Приложение 6), которое и вызвало 7-9 сентября большую магнитную бурю (Кр≈8) и двухступенчатый эффект Форбуша (≈10%).

Распространение ударных волн (в среде, с «раз за разом» уменьшающейся плотностью), очевидно, приводит к кумулятивному эффекту усиления ударных волн на орбите Земли и последующему экстремальному событию в Космической погоде. В частности, к значительному потоку, так называемых, штормовых частиц в широком интервале энергий (от десятков КэВ до десятков МэВ) и большой геомагнитной буре. Хорошей иллюстрацией сказанному может служить СУПЕР-буря 13-15 марта 1989 г., известное как «Квебекское» (Канада) событие. И в этом случае, предвестник в космических лучах был зарегистрирован еще на стадии выхода активной области (№ 5395) 6 марта 1989 г.на видимую часть диска Солнца (рис. 10). Весь период прохождения указанной АО, от момента ее выхода и далее, сопровождался серией мощных рентгеновских вспышек (класса X). Значимые предвестники были зарегистрированы 9-10 марта, непосредственно перед началом гигантского эффекта Форбуша 12-17 марта 1989 г.

В этой связи, интересна природа уникальной СУПЕР-бури 11-12 апреля. Представляется что, и в этом случае определяющую роль сыграл «кумулятивный» эффект (https://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=11&month=04&year=2001) догоняющих (в среде «с раз за разом убывающей плотностью среды») друг друга ударных волн или «cannibalistic combination» пары СМЕ. Предвестник в космических лучах был зарегистрирован 10 апреля (рис. 11), от вспышек класса М и X2, сопровождавшихся парой мощных выбросов корональной CME массы типа «гало»: https://spaceweather.com/archive.php?day=10&month=04&year=2001&view=view. 10-11 апреля регистрировались, в том числе, и низкоэнергичные потоки «штормовых» частиц с энергий: от десятков до сотен МэВ. Завершилось все это мощной вспышкой СКЛ 15 апреля в очень широком диапазоне энергий: от десятков МэВ до СКЛ высоких энергий (рис. 11), что подтверждается данными мировой сети нейтронных мониторов. Высокая плотность событий в исследуемый месячный интервал времени позволяет получить правдоподобную оценку эффективности обнаружения экстремальных событий Космической Погоды с вероятностью не менее 80%.

#### 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 (см. п. 2), 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 [24]. К таким нелокальным процессам относят и немарковские процессы, т.е. процессы с «памятью», когда приращения нельзя считать стационарными. В этом случае, мы имеем дело уже с «фрактальным броуновским движением» [25].

Таким образом, нелокальные особенности поведения космических лучей в окрестности крупномасштабного возмущения (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 фронта ударной волны обусловлена замагниченной находящейся фрактальностью среды 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 [26]: «...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...» [26]. Подобное же, по сути, утверждение о нелокальности, было выдвинуто ранее

Гневышевым М.Н., отмечается в [27]: «... физически связанные солнечные процессы необязательно должны происходить одновременно».

# выводы

**1.** Траектории космических лучей в возмущенных 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 - ударной волны.

**2.** Нелокальность космических лучей проявляется в кластеризации фазового объема космических лучей: регистрации коррелированных флуктуаций в виде пучков частиц - эффект «гало» в космических лучах в окрестности фронта межпланетной ударной волны.

**3.** Показано, что высокие значимые (выше 90%) значения параметра флуктуаций ГКЛ, является вероятностным индикатором переходного режима в окрестности фронта ударной волны, по сути – предвестником ударной волны. Величина заблаговременности регистрации предвестника составляет величину порядка ~1 суток.

**4.** Напротив, низкие – диагностические значения параметра флуктуаций являются маркером регистрации прихода ударной волны на орбиту Земли. Это подтверждается модельными расчетами, проведенными в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B.

**5.** Весьма вероятно, что природа экстремальных событий Космической погоды имеет общее, кумулятивное происхождение: как результат взаимодействия «догоняющих» (в среде с убывающей «раз за разом» плотностью) друг друга ударных волн. Это подтверждается данными непосредственных наблюдений взаимодействия ударных волн от серии СМЕ на космических аппаратах [22].

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымский Г.Ф. Основные проблемы современной космофизики / Методологические проблемы развития науки в регионе. Новосибирск: изд-во Наука. С. 175-176. 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: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 154-198. 1973.

3. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 14. № 2, С. 196-200. 1974.

4. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Елшин В.К. Поршневые ударные волны в межпланетной среде и Форбуш-эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 14. № 3. С. 407-410. 1974.

5. Крымский Г.Ф., Транский И.А., Шафер Г.В. и др. Модели ударных волн и наблюдаемые свойства форбуш-эффектов / Исследования по космофизике и аэрономии. Якутск: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 58-68. 1975.

6. Крымский Г.Ф., Елшин 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: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 27-49. 1977.

7. Kamoldinov S.M. et al. The Influence of Magnetic "Corks" upon the Galactic Cosmic Ray Distribution / Proc. 14 ICRC. Munchen. Vol.3. P. 838-843. 1975a.

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 № 90-03. С. 52. 1990.

9. Рабинович М.И. Нелинейная динамика и турбулентность / Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: изд-во Наука. С. 50-60. 1989.

10. Morishita I., Nagashima K., Sakakibara S. Et al. Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decrease / Proceed. 21 ICRC. Adelaide. Vol.6. P. 217-219. 1990.

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. Vol. 99. N A1. P. 11-17. 1994.

12. Козлов В.И. Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 95-99. 1999а.

13. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономии. Т. 39. № 1. С. 100-104. 1999б.

14. Dennis B.R. Solar hard X-ray bursts // Solar Physics. V. 100. P. 465-490. 1985.

15. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Phys. Rev. V. 38, N 1, p. 364-374. 1988.

16. Bak P. HOW NATURE WORKS. The science of self-organized criticality. Springer-Verlag, New York, Inc. 1996.

17. Подлазов А. В., Осокин А. Р. «Самоорганизованная критичность эруптивных процессов в солнечной плазме / Матем. Моделирование». Том 14, номер 2, 118–126. 2002.

18. 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.

19. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: изд-во Финансы и статистика. 313 с. 1983.

20. Козлов В.И., Козлов В.В. Параметр флуктуаций галактических космических лучей – индикатор степени неоднородности магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 2. С. 191-201. 2011.

21. 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, Vol. 45, No. 6, 2005, pp. 723–763.

22. <u>Erkka Lumme</u>, <u>Emilia Kilpua</u>, <u>Erika Palmerio</u> et al. "Multipoint Observations of the June 2012 Interacting Interplanetary Flux Ropes". July 2019. DOI: 10.3389/fspas.2019.00050.

23. Camilla Scolini, Emmanuel Chané, Manuela Temmer, Emilia K. J. Kilpua 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 Journal Supplement Series, 247:21 (27pp), 2020 March. https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6216.

24. Учайкин В.В. Стохастические модели в кинетической теории космических лучей. Ульяновск: изд-во УлГУ. С. 539. 2011.

25. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: изд-во ПОСТМАРКЕТ. С. 270. 2000.

26. Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования. Т. 42. № 5. С. 453-508. 2004.

27. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальные комплексы солнечной активности // Астрономический журнал. Т. 90. № 10. С. 857-868. 2013.

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

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



# **Рис. 1.** Степенной закон зависимости числа событий в интенсивности ГКЛ от их амплитуды, по часовым данным ст. Оулу (Финляндия) за период 45 лет с **1968-2012** гг. По оси ординат – натуральные логарифмы числа событий, по оси абсцисс – натуральные логарифмы амплитуд соответствующих событий. «Событие» - понижение интенсивности ГКЛ в процентах. Величина показателя степени т: «-1,56». В анализе использованы форбуш-понижения за указанный период, начиная с амплитуды понижения в **1**%.

#### СТЕПЕННОЙ ЗАКОН ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА СОБЫТИЙ В ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ ОТ ИХ АМПЛИТУДЫ



Рис. 2. Результаты тестирования алгоритма расчета вероятности или параметра флуктуаций космических лучей с 25 июля – 23 августа 2019 г. по реальным данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (http://www.nmdb.eu) на фазе минимума посредством роботизированной экспертной текущего 24 цикла системы: http://www.forshock.ru/pred.html Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,65 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



**Рис. 3.** Результаты расчета параметра флуктуаций на примере серии экстремальных событий в октябре 2003 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<u>http://www.nmdb.eu</u>) посредством роботизированной экспертной системы: <u>http://www.forshock.ru/pred.html</u> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



**Рис. 4.** 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 хорошо 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.



**Рис. 5.** Результаты расчета параметра флуктуаций на примере экстремальных событий в октябре-ноябре 2003 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<u>http://www.nmdb.eu</u>) посредством роботизированной экспертной системы: <u>http://www.forshock.ru/pred.html</u> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



Рис. 6. Результаты расчета параметра флуктуаций в октябре-ноябре 2004 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей ИЗ Европейской БД (http://www.nmdb.eu) посредством роботизированной экспертной системы: http://www.forshock.ru/pred.html Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



**Рис. 7.** Результаты расчета параметра флуктуаций в **мае-июне 2012** г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<u>http://www.nmdb.eu</u>) посредством роботизированной экспертной системы: <u>http://www.forshock.ru/pred.html</u> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



**Рис. 8.** Результаты расчета параметра флуктуаций в **мае-июне 2015** г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (<u>http://www.nmdb.eu</u>) посредством роботизированной экспертной системы: <u>http://www.forshock.ru/pred.html</u> Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



Рис. 9. Результаты расчета параметра флуктуаций во время магнитной бури 7-9 сентября 2017 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (http://www.nmdb.eu) посредством роботизированной экспертной системы: http://www.forshock.ru/pred.html Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



Рис. 10. Результаты расчета параметра флуктуаций во время СУПЕР-бури 13-15 марта 1989 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (http://www.nmdb.eu) посредством роботизированной экспертной системы: http://www.forshock.ru/pred.html Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



Рис. 11. Результаты расчета параметра флуктуаций во время СУПЕР-бури 11-12 апреля 2001 г. по 5-мин. данным высокоширотных станций космических лучей из Европейской БД (http://www.nmdb.eu) посредством роботизированной экспертной системы: http://www.forshock.ru/pred.html Cyber-FORSHOCK. По оси ординат: шкала справа (сплошная кривая) – значения вероятности или параметра флуктуаций; шкала слева (пунктирная кривая) – скорость счета в импульсах за 5 минут (усредненная за 12 часов) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Значения параметра заключенные в интервале: 0,35<P<0,60 – область «Космического шума». По оси абсцисс – дата: год – месяц – день - час.



**Приложение 1.** Математические выражения, определяющие функцию Риска используемые при расчете ПАРАМЕТРА флуктуаций космических лучей по значениям параметра **формы** эмпирической гистограммы(с), масштаба (b) и сдвига (θ).



**Приложение 2.** Данные измерений дисперсии  $\sigma B$  - а, **В***z*-компоненты - б и модуля |**B**| межпланетного магнитного поля - в, скорости **V** - г и плотности **р** - д плазмы солнечного ветра с 01-30 октября 2003 г. на космическом аппарате АСЕ. Потоки «штормовых» частиц - е низкоэнергичных протонов (на примере частиц с энергией ~**1** МэВ), зарегистрированные в третьей декаде октября (21-30 октября) 2003 г. по данным прямых измерений на американском космическом аппарате АСЕ.



**Приложение 3.** Анимационная схема динамики экстремального события **15 июня 2012** от активной области из района *центрального* меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси справа от диска Солнца.



**Приложение 4.** Анимационная схема динамики экстремального события 16 июня 2012 от активной области из района *центрального* меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-A и Stereo-B. Земля обозначена желтым кружком на горизонтальной оси справа от диска Солнца.



**Приложение 5.** Анимационная схема динамики экстремального события **22 июня 2015** от активной области из района *центрального* меридиана Солнца на основе модельных расчетов Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах Stereo-**A** и Stereo-**B**. Земля обозначена **кружком** на горизонтальной оси справа от диска Солнца.



**Приложение 6.** Результаты моделирования посредством системы **EUHFORIA** взаимодействия двойного **CME\_1-2** с от 4-5 сентября 2017 г. от вспышек класса M4 и M5 с третьим **CME-3** (от гигантской вспышки класса **X**) от 6 сентября 2017 г. [23].