**DOI:** 10.13140/RG.2.2.12463.28325

## ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА К АКТИВНОЙ ФАЗЕ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ

Козлов В.И., Крымский Г.Ф.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера, СО РАН, г. Якутск, cosmoprognoz@mail.ru Тел. 8(999)846-3269

### **АННОТАЦИЯ**

По изучению динамики флуктуаций интенсивности галактических космических лучей на различных фазах текущего 24 цикла обнаружен переходный режим к активной фазе солнечного цикла: <a href="http://www.forshock.ru/predlong.html">http://www.forshock.ru/predlong.html</a>, который определяется по наличию предвестника в космических лучах. Моменты регистрации предвестников в космических лучах совпадают с началом перестроек магнитного поля в комплексах активности на Солнце. Сделан вывод, что предвестник в космических лучах является индикатором перестройки магнитного поля Солнца на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла. В итоге, по космическим лучам впервые дан среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего солнечного цикла (<a href="http://www.forshock.ru/predlong.html">http://www.forshock.ru/predlong.html</a>) с заблаговременностью  $\Delta \tau = 3\pm 1$  оборота Солнца.

### DETECTION OF TRANSITION-REGIME TO THE ACTIVE PHASE OF A SOLAR CYCLE BY COSMIC RAYS

Kozlov V.I., Krymsky G.F.

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

### **ABSTRACT**

By studying of the dynamics of galactic cosmic rays fluctuations (GCR) at different phases of the current 24th cycle, a transition regime to the active phase of the solar cycle was discovered: <a href="http://www.forshock.ru/predlong.html">http://www.forshock.ru/predlong.html</a>, which is determined by the presence of a precursor in cosmic rays. The moments of registration of precursors in cosmic rays coincide with the beginning of rearrangements of the magnetic field in activity complexes on the Sun. It is concluded that the precursor in cosmic rays is an indicator of the restructuring of the solar magnetic field in transition to the active phase of the solar cycle. As a result, a medium-term forecast of the active phases of the 11-years solar cycle (<a href="http://www.forshock.ru/predlong.html">http://www.forshock.ru/predlong.html</a>) was first given on cosmic rays, with advance time  $\Delta \tau = 3\pm 1$  of the Sun rotations.

Телефон: +7(999)8463269

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение флуктуаций интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) на больших масштабах усреднения представляет большой интерес с различных точек зрения. Прежде всего, это важно при изучении переходного режима к активной фазе солнечного цикла, выявление и изучение которого является основной целью данной работы. Заблаговременное обнаружение подобного переходного режима могло бы решить практически важную задачу прогноза геоэффективной фазы солнечного цикла. Под геоэффективной фазой солнечного цикла подразумевается окрестность фазы максимума и начало ветви спада 11-летнего цикла, когда регистрируется максимальная спорадическая (вспышечная) активность, сопровождающаяся серийными выбросами корональной массы (СМЕ) и ударными волнами.

Время от времени в литературе интенсивно обсуждается проблема: описывается ли поведение солнечной активности конечным и низко-размерным аттрактором, что указывало бы на регулярность процесса? В работе [1] утвердительного ответа на этот вопрос получено не было. Возможно, это связано с низкой информативностью чисел Вольфа. Так, в [2] было отмечено, что числа Вольфа (из-за специфического правила их подсчета) вряд ли могут быть гладкой функцией истинной динамической переменной. Правдоподобная оценка корреляционной (фрактальной) размерности, т.е. выход обычно монотонной зависимости **d(n)~n** на плато при значении размерности **d≈2,5-3** в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла, была получена нами по индексу мерцаний космических лучей [3-4]. Ни по числам Вольфа, ни по интенсивности ГКЛ корректную оценку корреляционной размерности получить не удавалось.

Выявление конечного и низко-размерного, т.е. частично-детерминированного процесса в вариациях индекса мерцаний ГКЛ является, очевидно, указанием на принципиальную возможность прогноза периода максимальной спорадической активности Солнца. Вывод о принципиальной возможности прогноза активной фазы солнечного цикла, сделанный нами исходя из полученной выше конечной и низкой величины корреляционной размерности, был достаточно подробно прокомментирован в соответствующем разделе монографии [5], посвященном теме фракталов в Космосе.

### МЕТОД

Представляется, что наиболее полная информация о процессе содержится в плотности функции распределения, т.е. в эмпирической (частотной) гистограмме исходных данных. Остается лишь выделить из шумоподобного сигнала потенциально возможный регулярный

сигнал. Естественно, что потенциально возможный полезный сигнал может содержаться во втором и последующих моментах функции распределения интенсивности ГКЛ. На это указывает оценка коэффициента Асимметрии эмпирической частотной гистограммы для 10 оборотов Солнца: с марта по декабрь 2003 г. (рис. 1). Как известно, коэффициент Асимметрии рассчитывается через 3-й момент функции распределения. Большая величина коэффициента взаимной корреляции R=0,93 между введенным коэффициентом Асимметрии и интенсивностью ГКЛ указывает на хорошую связь между ними. Обороты 2323-2324 приходятся на период экстремальной активности в октябре-ноябре 2003 г. Предшествующие активной фазе 7 оборотов Солнца (№№ 2316-2322) отнесены, пока условно, к переходному режиму солнечного ветра.

Как следует из результатов расчета, положительные значения коэффициента Асимметрии регистрируются лишь однажды: на обороте 2322, который предшествует оборотам 2323-2324 с экстремальной активностью. Положительные значения коэффициента Асимметрии означают сдвиг максимума частотной гистограммы в сторону больших значений флуктуаций интенсивности ГКЛ, в отличие от отрицательных значений коэффициента Асимметрии, регистрируемых в течение активной фазы (обороты 2323-2324). В итоге, только один солнечный оборот № 2322 (сентябрь 2003 г.) можно отнести к реальному переходному режиму к активной фазе солнечного цикла, которая пришлась на октябрь-ноябрь 2003 г. [6]. Кроме того, желательно было бы отделить изменения формы эмпирической (частотной) гистограммы от изменений масштаба, который определяется средним значением эмпирической (частотной) гистограммы распределения интенсивности ГКЛ.

Из вероятностной теории разрушения сплошных сред и теории надежности известно, что обобщенная функция распределения Вейбулла-Гнеденко описывает выход системы на предельный критический режим [7]. Таковым можно считать, в нашем случае, переходный режим выхода на активную фазу 11-летнего цикла. На языке этой вероятностной теории задача определения 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 [6].

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. Искомая, нелинейная компонента сигнала-предвестника формируется при превышении степени (вероятности) коррелированности процесса критического значения, т.е. при Р>Ркр.

Ниже, приведены результаты расчета функции Риска применительно к реальным данным в уже известный период экстремальной активности Солнца в октябре-ноябре 2003 г. (солнечные обороты 2323-2324). В это время была зарегистрирована целая серия наиболее мощных событий 23 цикла. Расчет функции Риска проводился за 7 оборотов Солнца: за 5 предшествующих оборотов 2318-2322 и, далее, за обороты 2323-2324, т.е. уже непосредственно в течение активной фазы солнечного цикла. Как следует из результатов расчета, значимые (Р>0,5) значения максимума функции Риска регистрируются на оборотах 2320-2321 (рис. 2).

В этой связи интервал времени, приходящийся на обороты 2320-2321 в течение которых были зарегистрированы предвестники, определяется как - переходный режим к активной фазе солнечного цикла - имевшей место на оборотах 2323-2324. Предвестник в космических лучах в данном случае регистрируется за 1-2 солнечных оборота до начала активной фазы. В отличие от случая использования для этой цели коэффициента Асимметрии, когда переходный режим был выявлен только за 1 оборот Солнца до начала активной фазы (рис. 1). Полученные результаты указывают на большую эффективность предложенного способа выявления предвестника активной фазы солнечного цикла, по сравнению с использованием для этой же цели коэффициента Асимметрии. Это подтверждается оценкой Взаимной корреляционной функции (ВКФ) 27-дневных значений

введенного параметра флуктуаций и соответствующих значений интенсивности космических лучей: величина их взаимной корреляции  $R(\tau)\approx 0.7$ . При этом сдвиг максимума ВКФ на величину  $\tau\approx 1$  оборот Солнца указывает на систематическое опережение параметра флуктуаций соответствующих значений интенсивности ГКЛ. Это согласуется с нашим выводом о прогностических возможностях введенного параметра флуктуаций ГКЛ.

И в завершение, приводятся результаты анализа среднеоборотных значений введенного параметра флуктуаций и интенсивности ГКЛ методом «наложения эпох» относительно «нулевого» оборота, т.е. момента регистрации резкого и глубокого понижения в среднеоборотных значениях интенсивности ГКЛ (рис. 4). Для анализа были выбраны 10 подобных понижений интенсивности ГКЛ на геоэффективной фазе максимума и в начале ветви спада предыдущего 11-летнего цикла № 23. Очевидно, что заблаговременность прогноза и в этом случае составляет, в среднем, ту же величину: 1-2 оборота Солнца. При этом, *низкие*, т.е. *диагностические* значения параметра флуктуаций отражают факт регистрации, в среднем, резкого и глубокого понижения в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА.

Приведенные выше результаты тестирования предложенного способа указывают на прогностические (и диагностические тоже) возможности параметра флуктуаций рассчитанного на основе функции Риска распределения Вейбулла-Гнеденко. На рис. 5 представлены результаты среднесрочного мониторинга космических лучей за период с 1999-2019 гг. Для анализа вариаций параметра с периодами от полугода и более, был исключен низкочастотный тренд, который представляет собой, фактически, 11-летнюю вариацию.

Предвестники активных фаз 24 цикла были зарегистрированы в нижеследующие моменты времени. Предвестник НАЧАЛА 24 цикла – на обороте 2407: декабрь 2009, точечная стрелка черного цвета (см. также Приложение 2). Предвестник фазы РОСТА – на обороте 2421: январь 2011, сплошная стрелка черного цвета (там же, в Приложении 2). Предвестник фазы МАКСИМУМА 24 цикла был зарегистрирован на обороте 2434: январь 2012, стрелка красного цвета (Приложение 2). Прогноз максимума 24 цикла был доложен на Конференции ИКИ РАН, в феврале 2012 г. Предвестник фазы инверсии магнитного поля зарегистрирован на обороте 2449 в начале 2013 г. (точечная стрелка синего цвета на рис. 5). Предвестник геоэффективной фазы начала ветви СПАДА (после завершения фазы переполюсовки в конце 2013 г.) был зарегистрирован на обороте 2469: июль 2014, сплошная стрелка синего цвета на том же рисунке.

Пунктирной стрелкой (зеленого цвета) на рис. 5 представлен предвестник достаточно неожиданной активизации солнечной активности в окрестности фазы МИНИМУМА текущего солнечного цикла 24 в июле-сентябре 2017 г. (обороты 2509-2511). Очевидно, что интервал времени, приходящийся на обороты 2504-2508 (с третьей декады февраля по июнь 2017 г.) и представляет собой переходный режим к достаточно неожиданной активной фазе в окрестности минимума завершающегося 24 цикла. Действительно, в июле и сентябре 2017 г. были зарегистрированы большие (~7%) эффекты Форбуша и геомагнитные бури, которые и обусловили резкое и глубокое понижение в 27-дневных значениях интенсивности ГКЛ на оборотах 2509-2511 (рис. 5). Относительно небольшие вариации интенсивности ГКЛ с предвестниками в середине 2019 г. обусловлены прохождением орбиты Земли рекуррентных высокоскоростных потоков или долгоживущих «струй» солнечного ветра из корональных дыр, что является обычным явлением для фазы минимума 11-летнего цикла.

Низкие значения параметра флуктуаций ГКЛ (заключенные в овал на рис. 5), регистрируемые после предвестников на фоне низких значений интенсивности космических лучей, означают диагностику прогнозируемых фаз солнечного цикла. В частности: фаза МАКСИМУМА спорадической активности (2011-2012 гг.), геоэффективная фаза начала ветви СПАДА текущего цикла (2014-2015 гг.) и достаточно неожиданная фаза АКТИВИЗАЦИИ в окрестности минимума текущего 24 цикла (июль-сентябрь 2017 г.). Таким образом, введенный параметр флуктуаций космических лучей позволяет в среднем с заблаговременностью  $\Delta t$ =3±1 оборота Солнца, дать среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего солнечного цикла (http://www.forshock.ru/predlong.html).

Следует отметить, что моменты регистрации предвестников в космических лучах совпадают с началом перестроек магнитного поля в комплексах активности на Солнце. Это следовало из результатов сопоставления моментов регистрации предвестников (рис. 5) в космических лучах с результатами наблюдений магнитного поля Солнца, представленных в работе [8]. Перестройки магнитного поля наблюдались на фазах роста и спада обоих максимумов (зарегистрированных в среднегодовых значениях чисел Вольфа в 2012 и 2014 гг.) т.е. на фазах их максимальной изменчивости. Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что предвестник в космических лучах является индикатором перестройки магнитного поля Солнца на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

Чтобы убедиться в том, что местоположение предвестников в космических лучах отражает реальную ситуацию в межпланетной среде, ниже проведен совместный анализ интенсивности космических лучей и параметров солнечного ветра: изменчивости или дисперсии межпланетного магнитного поля (ММП) и скорости солнечного ветра. Для

анализа использовались результаты прямых измерений на американском космическом аппарате АСЕ [9]. Действительно, на фазе роста и в окрестности максимума нового 24 цикла заметно выражена годовая вариация дисперсии ММП (рис. 6) и скорости плазмы солнечного ветра (рис. 7). Это совпадает с годовой, в среднем, периодичностью регистрации предвестников, зарегистрированных нами в анализируемый период. Следовательно, можно сделать вывод, что предвестник в космических лучах действительно является индикатором перестройки магнитного поля Солнца на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

# ПЕРЕХОДНЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ИНВЕРСИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

полученных результатов, наибольшего Как следует ИЗ размаха среднеоборотных значений параметра флуктуаций ГКЛ достигают в окрестности максимума и на геоэффективной фазе начала ветви спада 11-летнего цикла (рис. 5). Для изучения динамики вариаций параметра флуктуаций ГКЛ в течение солнечного цикла, удобно воспользоваться методом вейвлет-анализа вариаций. Результаты такого анализа приведены на рис. 8-10. В минимуме нечетных циклов 21 и 23 с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца, явно выражена годовая осцилляция, что хорошо видно из оценки амплитуд огибающих на нижних диаграммах рис. 8 и рис. 10. Доминирование годовой вариации в окрестности минимума 11-летнего цикла (с отрицательным знаком общего магнитного поля Солнца) согласуется с выводами, вытекающими из модели 11-летнего цикла, развиваемой в [10].

В максимуме цикла и на геоэффективной фазе начала ветви спада, как правило, доминирует *нестационарная полугодовая* вариация (рис. 8-10). Нестационарная полугодовая вариация в окрестности максимума 11-летнего цикла обусловлена, по нашим представлениям, переходным колебательным процессом смены знака или инверсии общего магнитного поля Солнца [6]. Обращает на себя внимание, что переходный колебательный процесс переполюсовки в окрестности максимума нового 24 цикла характеризуется НЕ нестационарной полугодовой вариацией (как это было в трех предшествующих циклах 21-23), а вариацией с характерным масштабом ≈1 год. Достаточно наглядно годовая вариация в максимуме текущего цикла 24 представлена в правой части диаграммы периодов вариаций (рис. 10). Это согласуется с современными данными солнечных наблюдений: в [11-12], отмечается квазипериодическая или «импульсная» структура фазы роста нового 24 цикла с периодом ~1 год.

Важно сравнить параметр флуктуаций ГКЛ с ключевым параметром модуляции k=ωT, введенным в работе [13] для характеристики степени регулярности поля. Здесь ω - гирочастота частиц в регулярном магнитном поле, T - 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 отражает *отношение между напряженностью регулярного и турбулентного поля*. Регулярное поле в период максимума много меньше турбулентного. Напротив, напряженность турбулентного поля максимальна во время максимума цикла: сначала она линейно растет со временем, достигая максимума во время переполюсовки и, затем, линейно уменьшается [13].

Связь параметра флуктуаций ГКЛ со степенью турбулентности магнитного поля Солнца следует из результатов сопоставления параметра ГКЛ с «показателем эффективности солнечного мультиполя», который отражает вклад квадрупольной компоненты солнечного магнитного поля. Этот показатель был введен в работах группы ИЗМИРАН [14-15]. Он хорошо (R=0,83) коррелирует с основным параметром солнечной активности – числами Вольфа (Приложение 3). Ниже, проведено сопоставление параметра флуктуаций ГКЛ с «показателем эффективности солнечного мультиполя» ИЗМИРАН. Их сравнение показывает, что огибающие вариаций параметра флуктуаций ГКЛ и вариаций «показателя эффективности солнечного мультиполя», в среднем, согласуются между собой (рис. 11). Это подтверждается достаточно высоким (R= -0,77) значением коэффициента их регрессионной связи, в целом (рис. 12). Таким образом, параметр флуктуаций явно отражает вклад квадрупольной компоненты солнечного магнитного поля, обусловленной в значительной степени перестройкой магнитного поля Солнца в окрестности максимума 11летнего цикла.

Действительно, как следует из результатов анализа приведенного в работе [16], вклад квадрупольной компоненты магнитного поля Солнца оказывается доминирующим в окрестности максимума солнечного цикла. В этом смысле, нестационарный колебательный процесс в космических лучах в окрестности максимума солнечного цикла (рис. 11) является индикатором переходного режима инверсии магнитного поля Солнца. Это подтверждается анализом флуктуирующей компоненты солнечного магнитного диполя за те же 3 цикла солнечной активности 21-23 [17]. Указанные авторы делают вывод, что во время инверсии поля компонента магнитного диполя не обращается в нуль. Она имеет флуктуирующую природу и потому не описывается в рамках традиционной теории динамо среднего поля: <a href="http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2014/07/aa23319-13.pdf">http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2014/07/aa23319-13.pdf</a>. Кроме того, само по себе наличие переходного колебательного процесса смены знака общего магнитного поля Солнца

позволяет с единых позиций объяснить, так называемый, «провал(ы) Гневышева» [18-19], наблюдаемый в окрестности максимума 11-летнего цикла, в том числе, «квази-двухлетние», а также «полугодовые» вариации межпланетного магнитного поля [20].

### выводы.

- 1. По изучению динамики флуктуаций интенсивности галактических космических лучей на различных фазах текущего 24 цикла обнаружен переходный режим к активной фазе солнечного цикла: <a href="http://www.forshock.ru/predlong.html">http://www.forshock.ru/predlong.html</a>, который определяется по наличию предвестника в космических лучах. Моменты регистрации предвестников в космических лучах совпадают с началом перестроек магнитного поля в комплексах активности на Солнце. Сделан вывод, что *предвестник* в космических лучах является *индикатором* перестройки магнитного поля Солнца на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.
- **2.** По космическим лучам впервые дан *среднесрочный прогноз* активных фаз 11-летнего цикла, с заблаговременностью  $\Delta \tau = 3 \pm 1$  оборота Солнца: <a href="http://www.forshock.ru/predlong.html">http://www.forshock.ru/predlong.html</a>. Это обусловлено тем, что предвестник в космических лучах является индикатором перестройки магнитного поля на переходном режиме к активной фазе солнечного цикла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Carbonel M., Oliver L. and Ballester J.L. A Search for Chaotic Behavior in Solar Activity // Astronomy and Astrophys. Vol. 290. N 3. P. 983-994. 1994.
- 2. Михайлуца В.П., Фатьянов М.П. Размерность и структура солнечного аттрактора по значениям энергии магнитного поля Солнца в 21 цикле. // Солнечные данные. 1989.1989. N11. C. 109-116.
- 3. Козлов В.И. Масштабная инвариантность динамики флуктуаций космических лучей на геоэффективных фазах солнечного цикла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 95-99. 1999а.
- 4. Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 100-104. 1999б.
- 5. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М. МГУ: изд-во ЛОГОС. 848 стр. 2005.
- 6. Козлов В.И., Козлов В.В. АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах. Якутск: изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН. ИКФИА СО РАН. 214 с. 2019.
- 7. 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.
- 8. Язев С.А. Комплексы активности на Солнце в 23 цикле активности // Солнечно-земная физика. Вып. 16. С. 94-101. 2010.

- 9. Данные прямых измерений на космическом аппарате ACE: <a href="http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/">http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/</a>
- 10. 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.
- 11. Мордвинов А.В., Язев С.А., Лхагважав Ч., Батмунх Д. Комплексы активности и струтура крупномасштабного магнитного поля Солнца в цикле 24 / Современная геодинамика и опасные природные процессы в центральной Азии. Вып. 7. С. 10-15. 2011.
- 12. Мордвинов А.В., Головко А.А., Язев С.А. Комплексы активности и инверсия магнитного поля на полюсах Солнца в текущем цикле // Солнечно земная физика. Вып. 25. С. 3-9. 2014.
- 13. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., В.Г., Мамрукова В.П., Герасимова. 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.
- 14. Иванов Е.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Крупномасштабная структура солнечных магнитных полей и корональные выбросы массы // Письма в Астрономический журнал. Т. 74. № 2. С. 273-277. 1997.
- 15. Ivanov E.V., Obridko V.N. The Cyclic Variations of the CME Velocity // Solar Phys., Vol. 198, P. 179-196. 2001.
- 16. Sunderson T.R., Appourchaux T., Hoeksema J.T., Harvey K.L. Observations of the Sun's magnetic field during the recent solar maximum // J. Geophysical Res. 2003. V. 108. No. A1. P. 1035.
- 17. Pipin V. V., Moss D, Sokoloff D. and Hoeksema J. T. Reversals of the solar magnetic dipole in the light of observational data and simple dynamo models // Astronomy & Astrophysics. 2014. Volume 567, id.A90, 8 pp. DOI: <a href="https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2014/07/aa23319-13.pdf">https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2014/07/aa23319-13.pdf</a>
- 18. Bazilevskaya G.A., Kraynev M.V., Makhmutov V.S., Sladkova A.I. Long-term changes in galactic cosmic ray variations caused by the solar rotation // Proceeding 24-th ICRC. Vol. 4. P. 572-576. 1995.
- 19. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальная магнитология и опорные точки солнечного цикла // Астрономический журнал. Т. 80. № 11. С. 1034-1045. 2003.
- 20. Сарычев В.Т. Тренды и секторная структура межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 3. С. 309-316. 2006.

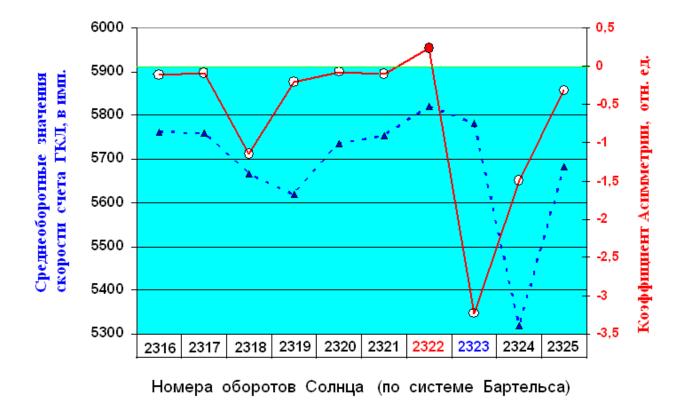
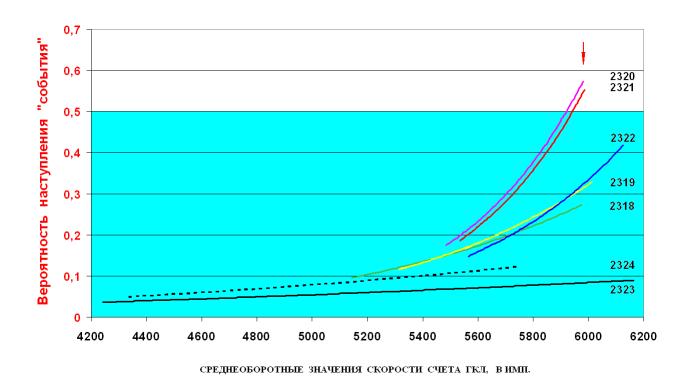
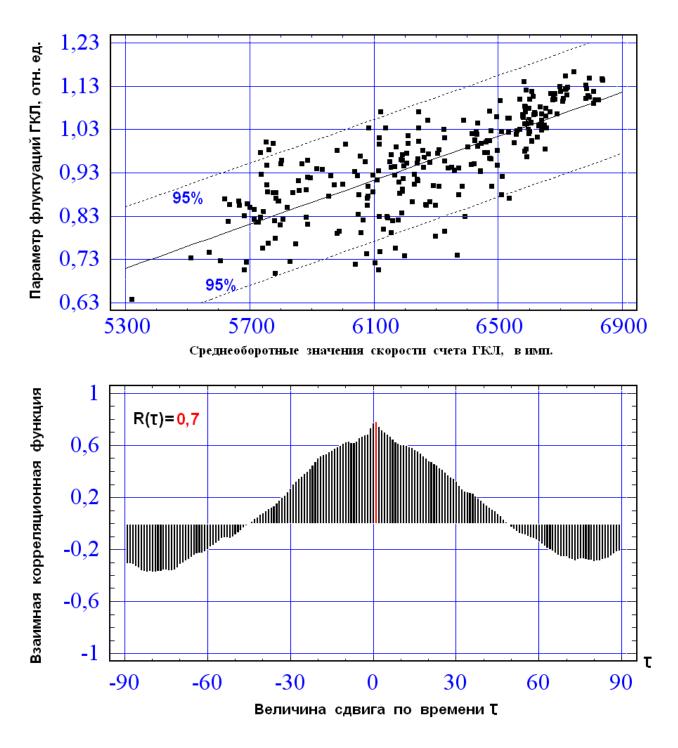


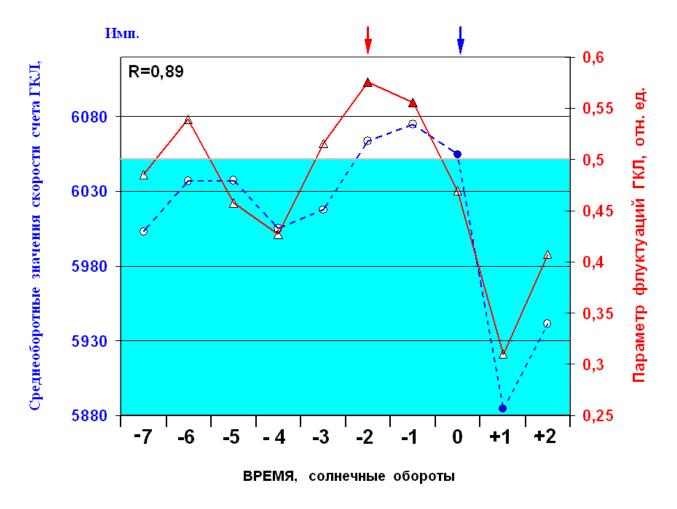
Рис. 1. Коэффициент Асимметрии, рассчитанный по 7776 точкам пятиминутных значений скорости счета в импульсах космических лучей в течение каждого оборота Солнца, начиная с №№ 2316-2325 (28.03.2003-22.12.2003 гг). По оси ординат: шкала слева, пунктирная кривая — скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца (27 дней) по данным нейтронного монитора станции Оулу (Финляндия). Шкала справа, сплошная кривая — величина коэффициента Асимметрии в относительных единицах. По оси абсцисс — время: отложены порядковые номера оборотов Солнца (по системе Бартельса).



**Рис. 2.** Расчет функции **Риска** или вероятности (ось ординат, шкала слева) наступления «события» исходя из распределения Вейбулла-Гнеденко. По оси абсцисс – скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. На оборотах **2320-2321**, т.е. за **1-2** оборота до начала фазы роста активности Солнца в октябре-ноябре 2003 г. (обороты 2323-2324) регистрируются значимые (Р>**0,5**) значения вероятности, т.е. *предвестники* начала активной фазы солнечного цикла.



**Рис. 3.** Оценка связи 27-дневных значений параметра флуктуаций космических лучей и скорости счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца: регрессионная статистическая связь установлена на уровне 95%, величина коэффициента их взаимной корреляции составляет величину  $R(\tau)\approx 0.7$ . Средняя величина заблаговременности предвестника в параметре флуктуаций ГКЛ относительно интенсивности космических лучей определяется величиной временного сдвига (по оси абсцисс)  $\tau\approx 1$  оборот Солнца.



**Рис. 4.** Результаты анализа методом «наложения эпох» для 10 случаев *резких и глубоких минимумов* в интенсивности ГКЛ, зарегистрированных в предыдущем 23 цикле солнечной активности. Шкала слева, пунктирная кривая - скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. Шкала справа, сплошная кривая - параметр флуктуаций ГКЛ в относительных единицах. По оси абсцисс — условное время в оборотах Солнца. Оборот, с которого начинается резкое и глубокое понижение в интенсивности ГКЛ, обозначен как «**нулевой**» оборот.

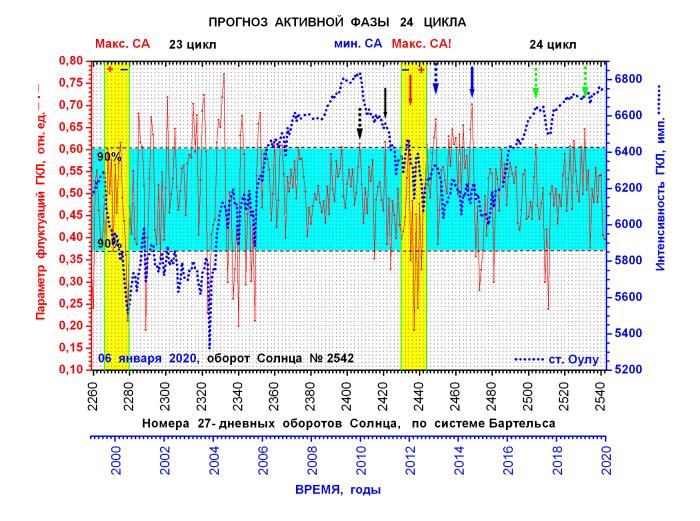
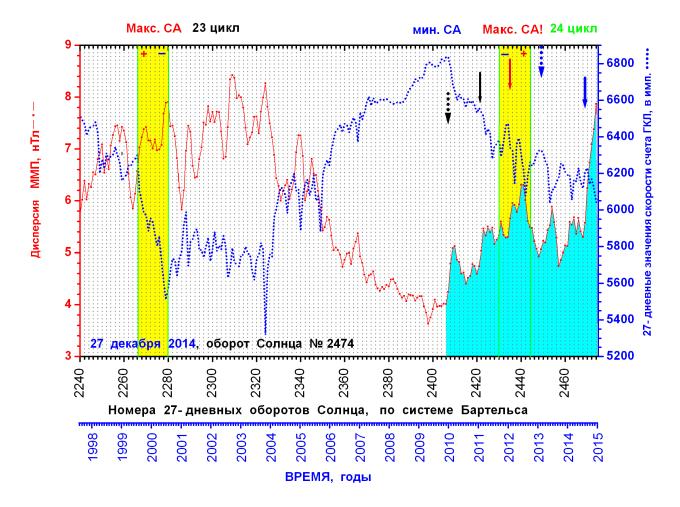


Рис. 5. Сплошная кривая — 27-дневные значения параметра флуктуаций ГКЛ в относительных единицах, шкала слева. Показан 90% уровень значимости. Пунктирная кривая - скорость счета космических лучей в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. Предвестники: НАЧАЛО 24 цикла показано точечной стрелкой, фазы РОСТА текущего цикла — сплошной стрелкой черного цвета, фазы МАКСИМУМА 24 цикла — сплошной стрелкой красного цвета, завершение фазы ПЕРЕПОЛЮСОВКИ — пунктирной стрелкой синего цвета, геоэффективной фазы начала ветви СПАДА — сплошной стрелкой синего цвета. НИЗКИЕ значения параметра флуктуаций в 2011-2012, в 2014-2015 и 2017 гг. (заключены в овал) - означают ДИАГНОСТИКУ активных фаз солнечного цикла.



**Рис. 6.** Сопоставление 27-дневных значений скорости счета космических лучей в импульсах (пунктирная кривая) и дисперсии напряженности межпланетного **магнитного поля** (сплошная кривая) по данным космического аппарата АСЕ [9], в 23-24 циклах солнечной активности: 1997-2014 гг. Предвестники в космических лучах показаны вертикальными стрелками. Все предвестники предшествуют глобальным максимумам в напряженности магнитного поля. Как в параметре флуктуаций ГКЛ, так и в напряженности магнитного поля регистрируется **годовая** вариация.

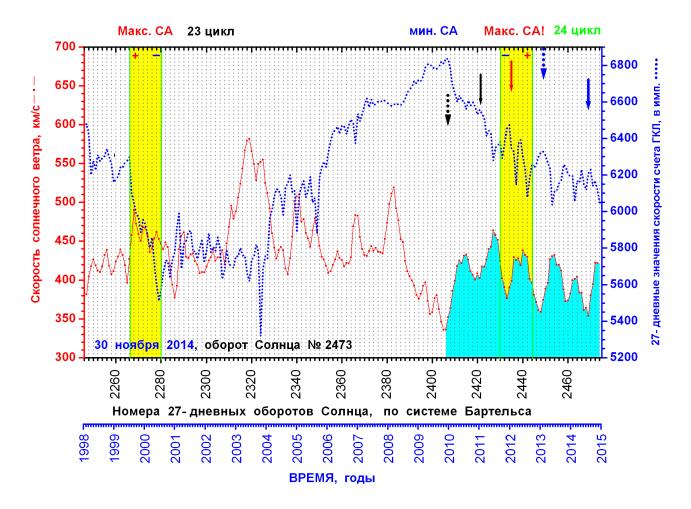
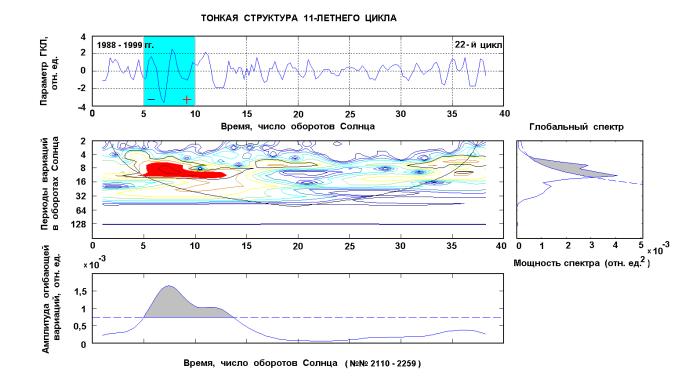


Рис. 7. Сопоставление 27-дневных значений скорости счета космических лучей в импульсах (пунктирная кривая) и скорости солнечного ветра (сплошная кривая) по данным космического аппарата АСЕ [9], в 23-24 циклах солнечной активности: 1997-2014 гг. Предвестники в космических лучах показаны вертикальными стрелками. Все предвестники предшествуют глобальным максимумам в скорости солнечного ветра. И в параметре флуктуаций ГКЛ и в скорости солнечного ветра регистрируется годовая вариация.

#### ТОНКАЯ СТРУКТУРА 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА Параметр ГКЛ, отн. ед. 1978-1988 <mark>гг.</mark> цикл №21 -2 -4 Глобальный спектр Время, число оборотов Солнца Периоды вариаций в оборотах Солнца Амплитуда огибающей вариаций, отн. ед. ×10<sup>-3</sup> Мощность спектра (отн. ед. $^2$ ) 1,5 0,5

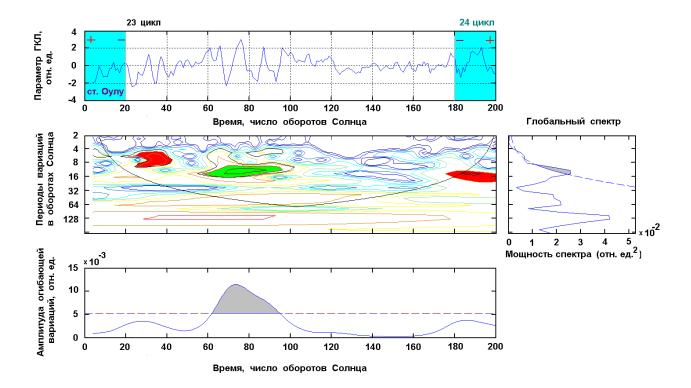
**Рис. 8.** Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в **21** цикле. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ 21 цикла регистрируется нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. В *минимуме нечетного* 21 цикла с *отрицательным* знаком общего магнитного поля Солнца доминирует ожидаемая **годовая** осцилляция. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.

Время, число оборотов Солнца

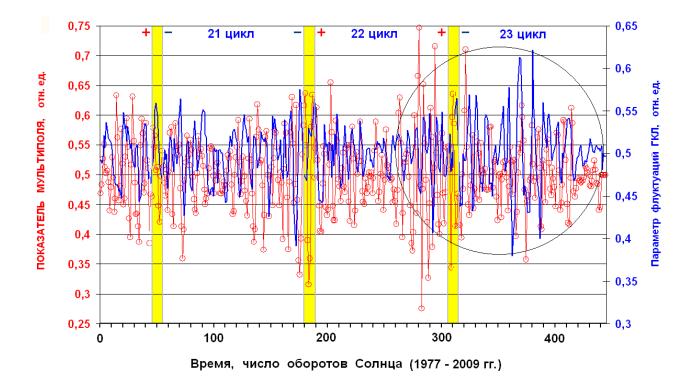


**Рис. 9.** Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в **22** цикле. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ четного 22 цикла доминирует нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. Справа – глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка – амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов.

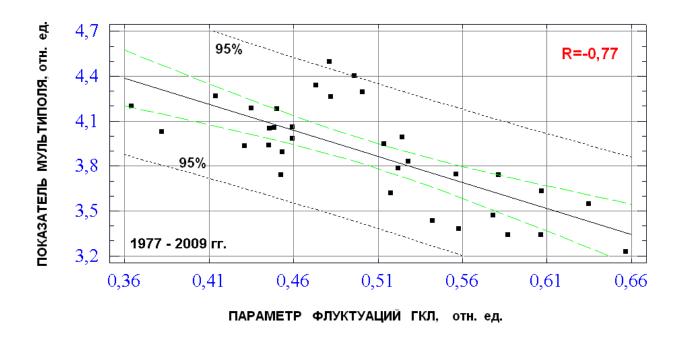
19



**Рис. 10.** Результаты вейвлет-анализа тонкой структуры параметра флуктуаций космических лучей в 23 цикле и в начале 24 цикла. В окрестности ПЕРЕПОЛЮСОВКИ 23 цикла регистрируется нестационарная ПОЛУГОДОВАЯ вариация. В *минимуме нечетного* **23** цикла с *отрицательным* знаком общего магнитного поля Солнца доминирует ожидаемая **годовая** осцилляция. На стадии фазы переполюсовки **24** цикла регистрируется **необычная** ГОДОВАЯ вариация. Справа — глобальный спектр, в целом. В нижней части рисунка — амплитуда огибающей вариаций. По оси абсцисс — время, число солнечных оборотов.



**Рис. 11.** «Индекс мультиплетности» солнечного магнитного поля, открытые кружки – кривая красного цвета, шкала слева. Параметр флуктуаций космических лучей – кривая синего цвета, шкала справа. По оси абсцисс – время, число солнечных оборотов (с 1977 - 2008 гг.). Показаны номера циклов, условно, отмечены периоды смены знака общего магнитного поля Солнца. **Огибающие** вариаций параметра флуктуаций космических лучей и «индекса мультиплетности» достигают максимума, практически, одновременно.



**Рис. 12.** Оценка регрессионной связи (**R=-0,77**), **в целом**, между среднегодовыми значениями показателя «солнечного мультиполя» (ИЗМИРАН) и параметра флуктуаций космических лучей по модели линейной регрессии. Показан 95%-ный уровень значимости.

Функция распределения Вейбулла:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{1} - \exp\{-[(\mathbf{x} - \theta)/\mathbf{b}]^{\mathbf{C}}\}\$$

где

$$\theta < x, b > 0, c > 0$$

- параметр масштаба
- с параметр (формы)
- параметр положения

Плотность распределения Вейбулла:

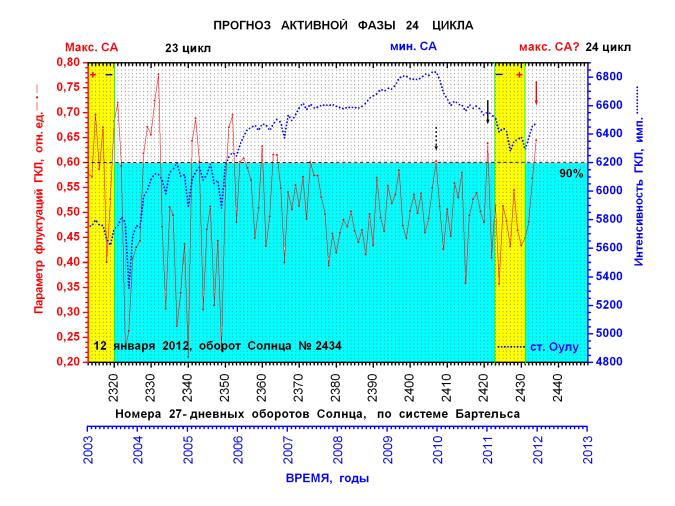
$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}/\mathbf{b}^* [(\mathbf{x} - \theta)/\mathbf{b}]^{\mathbf{c}-1} * \exp^{\left(-\frac{\mathbf{c}}{\mathbf{c}} - \theta\right)/\mathbf{b}}]^{\mathbf{c}}$$

Дополнение к функции распределения:

$$R(x) = 1 - F(x)$$

функция РИСКА 
$$h(x)=f(x)/R(x)=[c*(x-\theta)^{(c-1)}]/b^c$$

**Приложение 1.** Математические выражения, определяющие функцию Риска используемые при расчете ПАРАМЕТРА флуктуаций космических лучей по значениям параметров формы (c), масштаба (b) и сдвига (d).



**Приложение 2.** Пунктирная кривая - 27-дневные значения интенсивности ГКЛ с 1999-**2012** гг., шкала справа. Сплошная кривая — соответствующие значения параметра флуктуаций ГКЛ, шкала слева. Показан 90% уровень значимости. Предвестники: НАЧАЛО 24 цикла показано точечной стрелкой, фаза РОСТА текущего цикла — сплошная стрелка черного цвета, фазы МАКСИМУМА 24 цикла — сплошная стрелка **красного** цвета.

	Параметр ГКЛ	Интенс. ГКЛ	Число больших магнитных бурь	Числа Вольфа (число пятен)	Индекс Мультип. солн. магн. поля	Число больших событий электр. поля
Пар аметр ГКЛ	1	0,80	- 0, 85	-0,74	-0,77	-0,76
Интенс. ГКЛ	0,80	1	- 0,89	- 0,87	-0,68	- 0,67
Число больших магнитных бурь	- 0, 85	- 0,89	1	0,86	0,74	0,83
Числа Вольфа (число пятен)	-0,74	- 0,87	0,86	1	0,83	0,59
Индекс Мультип. солн. магн. поля	-0,77	-0,68	0,74	0,83	1	0,61
Число больших событий электр. поля	-0,76	- 0,67	0,83	0,59	0,61	1

**Приложение 3.** Матрица коррляционных связей параметра флуктуаций ГКЛ с интенсивностью космических лучей, параметрами солнечного ветра и индексами солнечной активности: с интенсивностью ГКЛ R=0,80; с числами Вольфа R=--0,74; с индексом «электрического поля солнечного ветра» R=-0,76. Наибольшее значение имеет антикорреляция параметра флуктуаций ГКЛ с Dst-вариацией R=-0,85.

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 (<a href="http://www.forshock.ru/pred.html">http://www.forshock.ru/pred.html</a>), по 5-мин. данным Европейской БД космических лучей.

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