

УДК 523.165+523.74

## ЗАГОРИЗОНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МОЩНОГО ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ЭФФЕКТУ “ГАЛО” В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

© 2021 г. В. И. Козлов\*

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

*\*cosmoprognoz@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.10.2019 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 17.09.2020 г.

В окрестности фронта ударной волны галактические космические лучи фокусируются в анизотропные “пучки” частиц. Подобные пучки коррелированных частиц – эффект “гало” в космических лучах, являются, по сути, предвестниками ударной волны. Наиболее ярко эффект “гало” в космических лучах проявляется при выявлении источника активности выходящего или заходящего за край солнечного диска. Задачу загоризонтного обнаружения в реальном времени мощного залимбового источника активности на Солнце мы решаем дистанционным методом диагностики околоземного космического пространства (<http://www.forshock.ru/pred.html>) посредством созданной роботизированной экспертной системы Cyber-FORSHOCK, на базе существующей мировой сети (высокоширотных) нейтронных мониторов (<http://www.nmdb.eu>). В данном случае, планета Земля, вместе с работающими на прием космической радиации высокоширотными станциями космических лучей (порядка ~10), представляет собой единый “прибор”.

DOI: 10.31857/S0023420621050071

### ВВЕДЕНИЕ

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: прежде всего, ускоренных ударной волной “штормовых” частиц, предвещающих приход на орбиту Земли межпланетной ударной волны. Ниже, предлагается подход, который в некоторой степени решает проблему заблаговременного обнаружения мощного источника активности еще до его выхода на видимую часть диска Солнца, или когда подобный источник уже скрылся за “линией горизонта”. Суть способа решения указанной проблемы, заключается в обнаружении по космическим лучам переходного режима солнечного ветра в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра – ударной волны. Переходный режим обусловлен проявлением в солнечном ветре мощного источника активности находящегося, на невидимой с Земли, стороне солнечного диска. Подобные

проявления связаны, как правило, с большими рентгеновскими вспышками, сопровождающимися серийными выбросами корональной массы Солнца (СМЕ).

### ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА В ОКРЕСТНОСТИ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В последнее время появились указания на то, что непредсказуемый, “катастрофический” характер экстремальных проявлений солнечной активности обусловлен возможной реализацией на Солнце состояния “самоорганизованной критичности”, см. например, [1]. 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 [2] перед условной “катастрофой”. Таковым можно считать переходный режим в окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра, в нашем случае – межпланетной ударной волны.

На языке этой вероятностной теории проблема обнаружения подобного 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 [3, 4]. Отношение плотности функции распределения Вейбулла к “функции надежности” и есть искомая вероятность (функция Риска) или параметр флуктуаций ГКЛ [5].

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. Характер процесса, в данном случае, явно не Гауссов, допускающий корреляции на сколь угодно больших пространственно-временных масштабах. Как отмечается в [6], “Дальнейшие 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”. Таким образом, анализ “хвостов”, т.е. высших моментов функции распределения может оказаться достаточно информативным в задаче обнаружения переходного режима в окрестности фронта ударной волны.

В итоге, искомая, нелинейная компонента сигнала-предвестника формируется при превышении степени (вероятности) процесса критического значения, т.е. при  $P > P_{кр}$ . Тестирование предложенного способа на контрольном ряде, представляющего собой случайный ряд чисел показало, что значения вероятности (далее, параметр флуктуаций) лежащие ниже уровня “шума”  $P \leq 0.65$  можно уверенно (на уровне значимости 90%) отнести к гауссовскому шуму. Необходимая, в таком случае, операция подавления уровня 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 ( $\pm 1$  ч) обоих расфазированных сигналов много меньше, чем интервал усреднения параметра флуктуаций (12 ч). Эта процедура (за счет взаимного подавления при суммировании случайной компоненты сигнала) позволила, практически, вдвое уменьшить дисперсию исходного временного ряда.

## ЗАГОРИЗОНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МОЩНОГО ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ ПО ЭФФЕКТУ “ГАЛО” В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Очевидно, что наиболее благоприятные условия для отождествления залимбового источника по космическим лучам складываются в период минимума 11-летнего цикла, т.е. при отсутствии солнечных пятен на видимой части диска Солнца. Например, в 2008 г. — “самый белый” год, когда было зарегистрировано максимальное число дней в году без пятен. При полном отсутствии пятен на Солнце, 1.1.2008 был зарегистрирован предвестник в космических лучах (рис. 1) от “залимбового” источника: по данным космического аппарата *Stereo-A*, 31.XII.2008 на невидимой с Земли стороне Солнца наблюдались две больших рентгеновских вспышки класса C8. Обе вспышки сопровождалась выбросами корональной массы — СМЕ. Возможным источником этих рентгеновских вспышек могла быть достаточно большая активная область (АО) № 978 (<https://spaceweather.com/archive.php?day=01&month=01&year=2008&view=view>). Это была единственная активная область, наблюдаемая на предыдущем солнечном обороте, которая появилась на восточном лимбе Солнца лишь 2.1.2008. Выход указанной АО на видимую часть солнечного диска сопровождался выбросами СМЕ.

Понижение интенсивности ГКЛ началось с 4.1. на 5.1.2008. Явно выраженное низкое, диагностическое значение параметра флуктуаций ГКЛ зарегистрированное с 4.1. на 5.1.2008 (рис. 1) более определенно указывают на регистрацию ударной волны в указанный момент времени. Это подтверждается данными прямых измерений характеристик межпланетного магнитного поля (ММП), параметров солнечного ветра и потока низкоэнергичных протонов с энергией  $\sim 1$  МэВ на космическом аппарате США, *ACE* (Приложение 1). Как следует из приведенных данных, скачок в характеристиках ММП и параметрах солнечного ветра действительно регистрируется с 4.1. на 5.1.2008, причем, на фоне возрастания низкоэнергичных частиц. Как следует из приведенных данных, предвестник в космических лучах предшествует регистрации ударной волны на орбите Земли: интервал времени между предвестником и потоком частиц заключен в овал (Приложение 1).

Для надежной идентификации источника активности было бы желательно исключить еще и рекуррентные высокоскоростные потоки солнечного ветра. Подобный редкий случай представился в сентябре 2011 г., когда активизация мощного источника активности (АО 1302) на невидимой с Земли стороне Солнца проходила в отсутствие (<http://spaceweather.com/archive.php?day=22&month=09&year=2011&view=view>) корональных дыр. Ак-

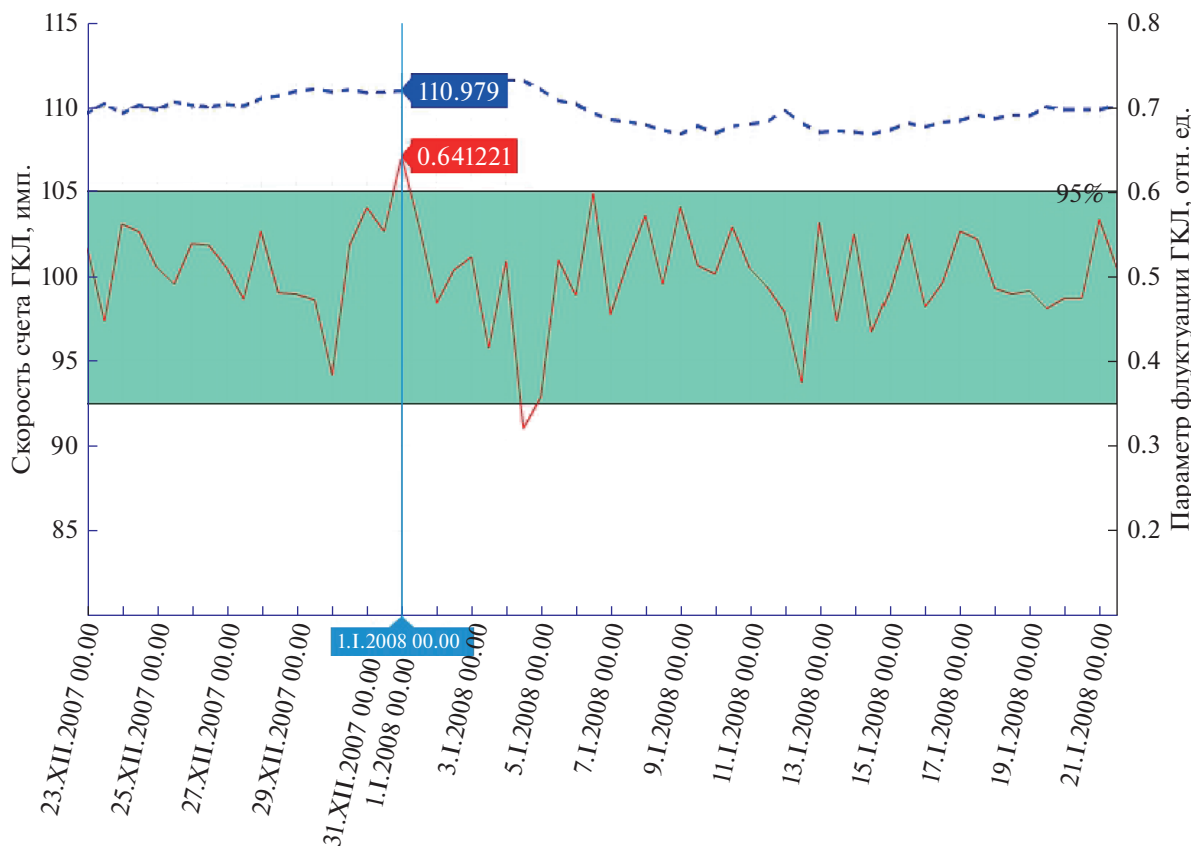


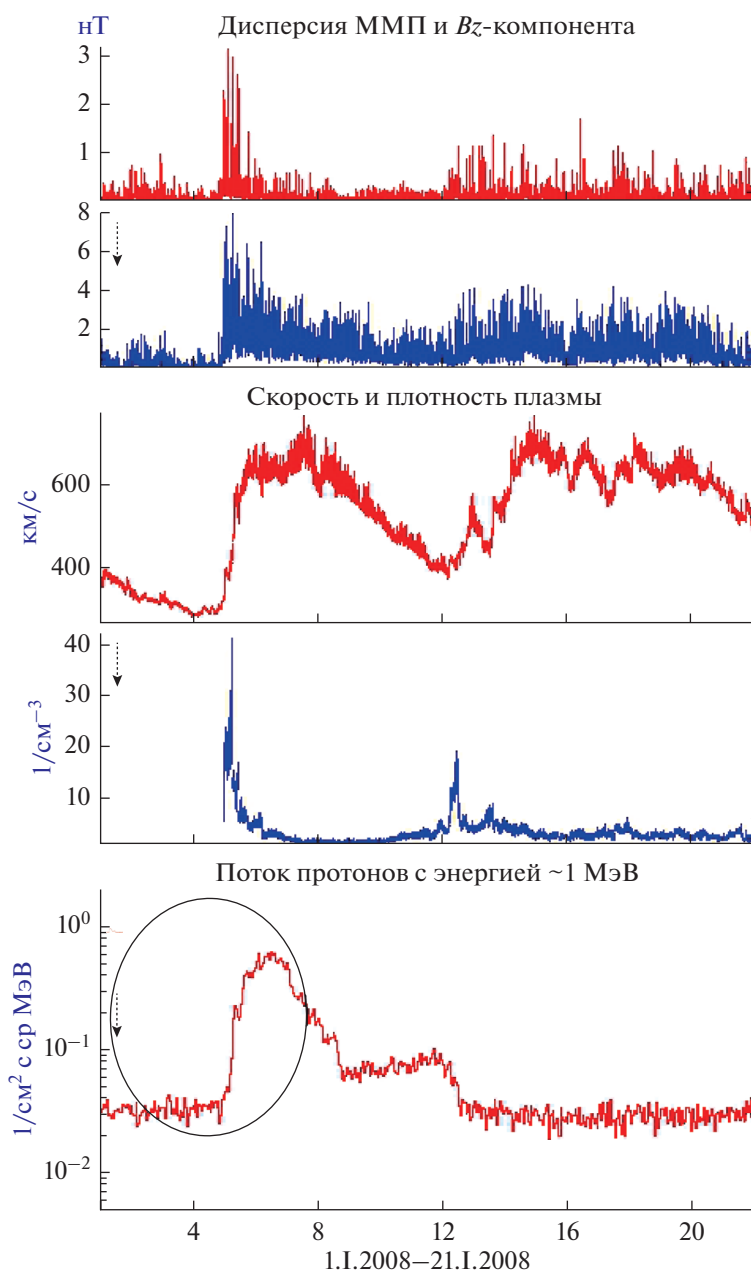
Рис. 1. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ в XII–I.2008.

тивная область 1302 заметно проявилась в регистрации больших вспышек класса М и X, сопровождавшихся серией СМЕ, начиная с 19.IX.2011 и далее, по мере ее выхода на видимую часть диска Солнца 22.IX.2011. При дальнейшем продвижении АО 1302 к центральному меридиану, с 25.IX. на 26.IX.2011 в космических лучах был зарегистрирован эффект Форбуша (рис. 2).

Предвестник в космических лучах был зарегистрирован 19.IX.2011, т.е. за 2–3 дня до выхода указанной активной области на восточный край диска Солнца. И в данном случае, низкое, т.е. диагностическое значение параметра флуктуаций ГКЛ 26.IX.2011 является маркером эффекта Форбуша в интенсивности ГКЛ. Это подтверждается результатами моделирования, проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах США, *Stereo-A* и *Stereo-B* (Приложение 2): мощная ударная волна от выброса корональной массы (СМЕ) регистрируется на орбите Земли также 26.IX.2011. Земля показана светлым кружком на горизонтальной оси, справа от диска Солнца в центре. Вариации параметра флуктуаций ГКЛ в конце сентября и в начале октября отражают проявление “афтершоковой” активности того же источника. Важно отметить, что

регистрация предвестника в космических лучах предшествует началу эффекта “штормовых” частиц, ускоренных фронтом ударной волны: указанный интервал времени заключен в овал (Приложение 3).

Не менее благоприятные условия для идентификации по космическим лучам мощного источника активности, на невидимой с Земли стороне солнечного диска, сложились в начале марта 2012 г. Единственное и неактивное солнечное пятно вблизи центрального меридиана, средние значения скорости солнечного ветра и значения геомагнитного индекса  $Kp = 4$  указывали на слабо возмущенные условия в солнечном ветре в это время. С другой стороны, АО 1429 уже была активной, когда 3.III.2012 она появилась (<http://spaceweather.com/archive.php?day=03&month=03&year=2012&view=view>) на восточном краю диска Солнца. Активизация источника началась в самом начале месяца: 2.III.2012 была зарегистрирована большая залимбовая вспышка класса М3, сопровождающаяся корональным выбросом — СМЕ. В космических лучах это проявилось в регистрации предвестника 1–2.III.2012 (рис. 3), а с 5–8.III.2012 регистрировались уже низкие, т.е. диагностические значения параметра флуктуаций ГКЛ, с последую-



**Приложение 1.** Временной интервал с момента регистрации предвестника в космических лучах (точечная стрелка) и последующего возрастания потока “штормовых” частиц, заключен в овал.

шим гигантским эффектом Форбуша 8–9.III.2012. В это время были зарегистрированы большие (класса М) и очень большие вспышки класса Х, которые сопровождались серией СМЕ (<http://spaceweather.com/archive.php?day=07&month=03&year=2012&view=view>). При этом, большая амплитуда эффекта Форбуша 8–9.III.2012 обусловлена, скорее всего, эффектом кумулятивного взаимодействия серии ударных волн от указанных вспышек  $X1$  (5.III.2012) и  $X5$  (7.III.2012).

Вывод о связи гигантского эффекта Форбуша 8–9.III.2012 с регистрацией мощной ударной вол-

ны подтверждается, как данными прямых измерений параметров солнечного ветра (Приложение 4), так и результатами моделирования, проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах США, *Stereo-A* и *Stereo-B*. Действительно, ударная волна регистрируется на орбите Земли в то же время – 8.III.2012 (Приложение 5). И в этом случае, предвестник в космических лучах предшествует регистрации опасных “штормовых” частиц (заключены в овал), очевидно ускоренных на фронте ударной волны.

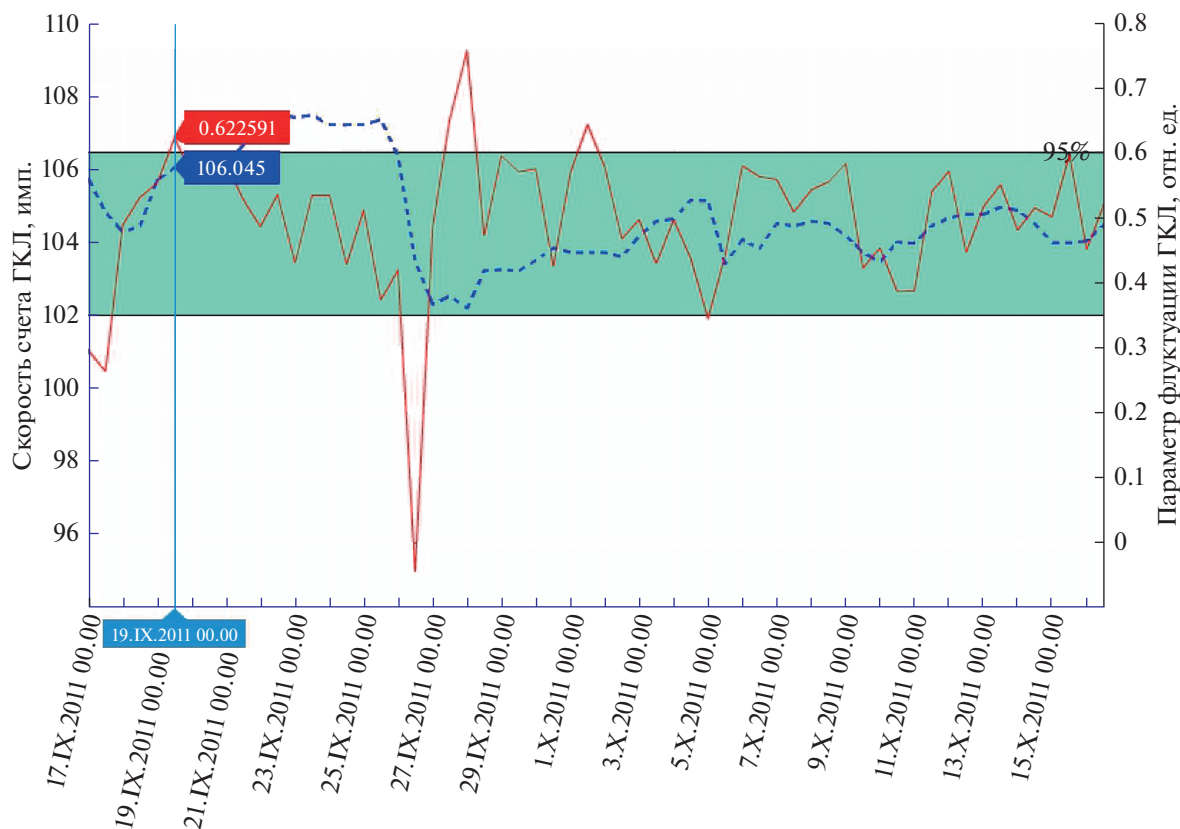
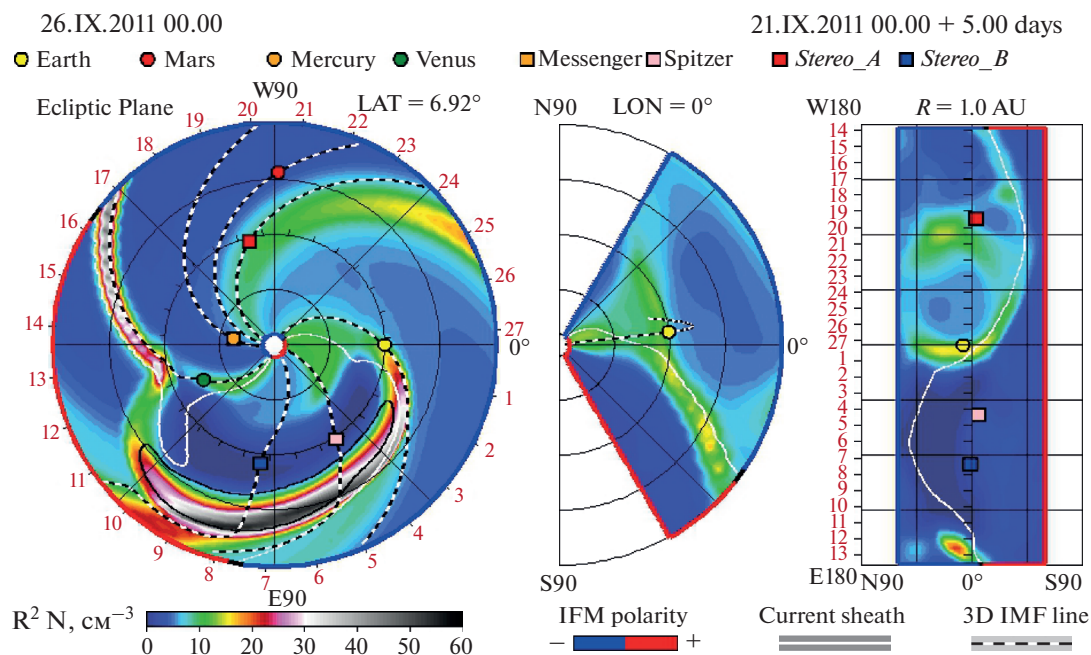


Рис. 2. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ в IX–X.2011.



Приложение 2. Анимационная схема динамики экстремального “залимбового” события (<https://spaceweather.com/archive.php?day=22&month=09&year=2011&view=view>) 19–26.IX.2011. Мощная ударная волна зарегистрирована на орбите Земли 26.IX.2011. Земля обозначена светлым кружком на горизонтальной оси справа от диска Солнца в центре.

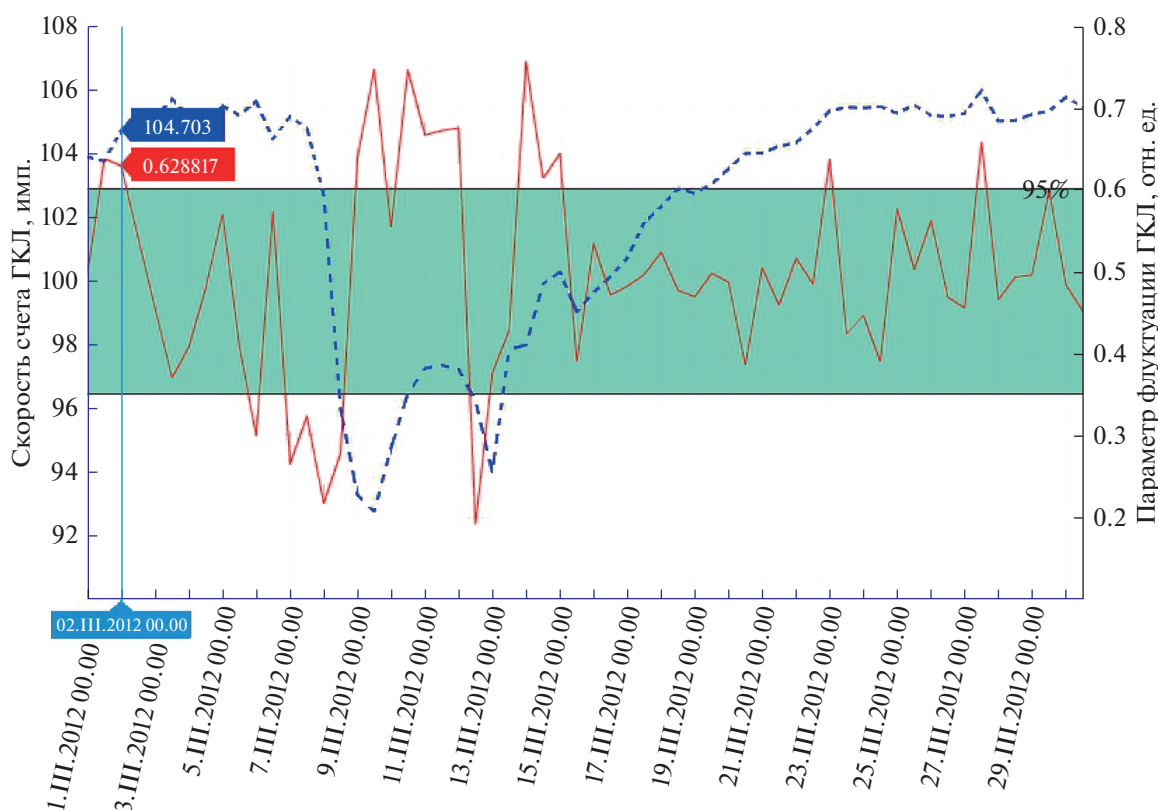


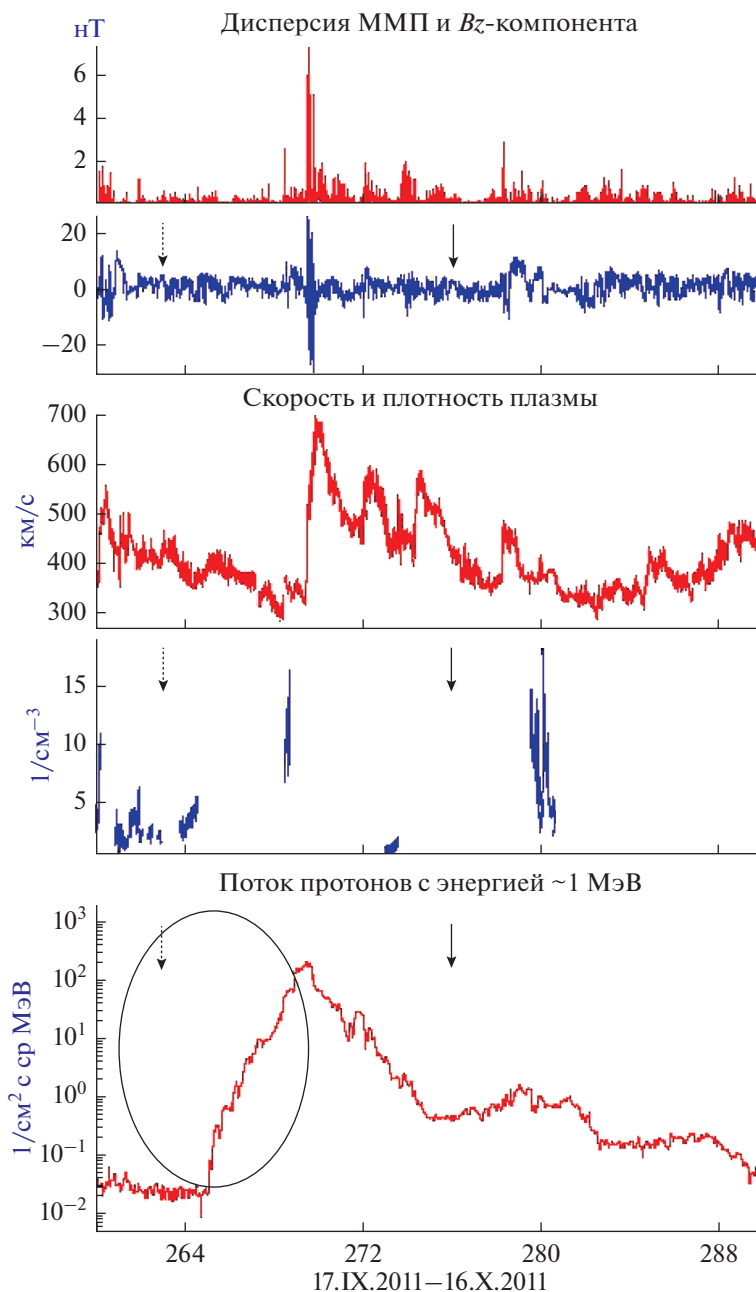
Рис. 3. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ в III.2012.

Активность того же источника продолжалась 9–10.III.2012 (<http://spaceweather.com/archive.php?day=09&month=03&year=2012&view=view>). Очевидно, это явилось причиной резкого (повторного) понижения в интенсивности ГКЛ 12–13.III.2012, что согласуется с резким и низким диагностическим значением параметра флуктуаций ГКЛ с 12.III. на 13.III.2012 (рис. 3). Это подтверждается результатами моделирования, проведенного в Goddard Space Weather Lab по данным измерений на космических аппаратах США, *Stereo-A* и *Stereo-B* (Приложение 6). Ударная волна от СМЕ регистрируется на орбите Земли (которая показана светлым кружком на горизонтальной оси справа от диска Солнца) также с 12.III. на 13.III.2012. Таким образом, низкое диагностическое значение параметра флуктуаций ГКЛ действительно является маркером прихода ударной волны на орбиту Земли. Предвестники данного повторного понижения (“афтершоковой” активности того же источника) интенсивности ГКЛ с 12.III. на 13.III.2012 были зарегистрированы 9–11.III.2012 (рис. 3).

Область 1429 оставалась активной и в момент ее выхода 15.III.2012 на западный край диска Солнца. Предвестник был зарегистрирован с 13.III. на 14.III.2012 (рис. 3). И только местоположение активной области на (западном) краю солнечного диска не позволило ей должным образом

проявиться в интенсивности ГКЛ. Предвестник 14.III.2012, в данном случае сыграл роль маркера небольшого понижения в интенсивности ГКЛ 15.III.2012, сопровождавшегося резким спадом параметра флуктуаций с 14.III. на 15.III.2012 (рис. 3). Данное понижение обусловлено приходом на орбиту Земли ударной волны от СМЕ из АО 1429, практически, уже зашедшей за западный лимб <http://spaceweather.com/archive.php?day=15&month=03&year=2012&view=view> Солнца: изображение АО “в фас” сменилось изображением “в профиль”. Несмотря на то, что воздействие от сильной ударной волны было касательным, регистрация на Земле ударной волны сопровождалась геомагнитной бурей с величиной  $Kp = 6$ . Более того, наличие подобного предвестника с 22.III. на 23.III.2012 (см. рис. 3 и Приложение 4) позволяет утверждать о сохранении активности и на “обратной” стороне Солнца. Действительно (<http://spaceweather.com/archive.php?day=24&month=03&year=2012&view=view>), только с 23.III. по 26.III.2012 было зарегистрировано не менее 4-х выбросов СМЕ.

Очередное проявление того же мощного источника активности из АО 1429 в космических лучах за восточным краем солнечного диска выразилось в регистрации предвестника 27.III.2012 (рис. 3). В период с 24–27.III.2012 на видимой ча-

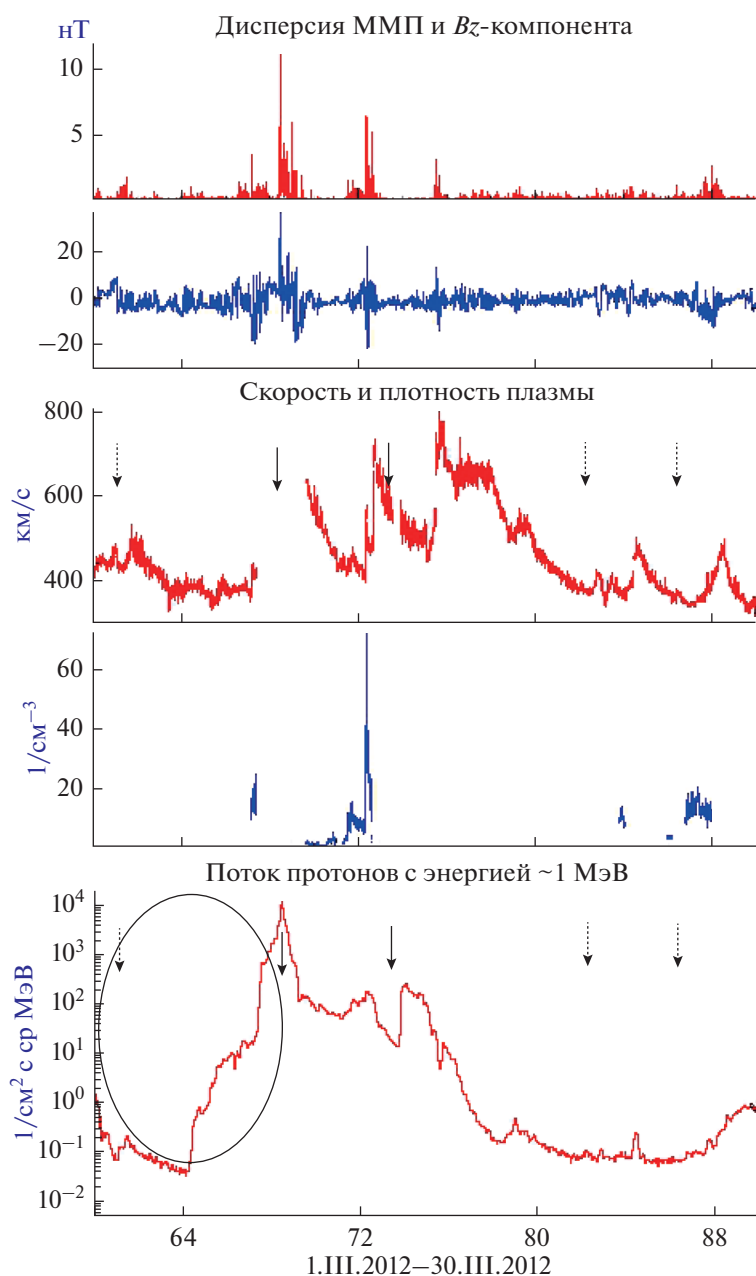


Приложение 3. Обозначения как для Приложения 1.

сти солнечного диска не было зарегистрировано ни активных групп пятен, ни больших солнечных вспышек, ни активных корональных дыр. И, наоборот, перед выходом АО 1429 на видимую часть солнечного диска 26.III.2012 было зарегистрировано очередное мощное (<http://spaceweather.com/archive.php?day=27&month=03&year=2012&view=view>), 11-е по счету, СМЕ. Резкое снижение параметра флуктуаций ГКЛ 28.III.2012 (рис. 3) сыграло роль маркера регистрации ударной волны на орбите Земли, что подтверждается, как данными измерений параметров солнечного ветра (При-

ложение 4), так и результатами моделирования по данным измерений на космическом аппарате *Stereo-B* (Приложение 7).

Достаточно неожиданные случаи загоризонтного обнаружения источника активности представились относительно недавно, в июльских и сентябрьских событиях 2017 г. Особенность данного периода в том, что указанный период относится к началу фазы минимума 24 цикла. С 11–14.VII.2017 центральный меридиан Солнца пересекала гигантская и единственная активная область № 2665.



**Приложение 4.** Анимационная схема динамики экстремального “залимбового” события (<http://spaceweather.com/archive.php?day=07&month=03&year=2012&view=view>) 1–8. III. 2012. Мощная ударная волна зарегистрирована на орбите Земли 8. III. 2012.

13–15. VII. 2017 были зарегистрированы большие рентгеновские вспышки класса C5, C6 и M2 (<https://spaceweather.com/archive.php?day=14&month=07&year=2017&view=view>), сопровождавшиеся СМЕ. С 14. VII. на 15. VII. 2017 был зарегистрирован предвестник в космических лучах с последующим эффектом Форбуша 16. VII. 2017 (рис. 4). С 18. VII. на 19. VII. 2017 АО 2665 скрылась за лимбом Солнца. Когда указанная активная область была уже на невидимой с Земли стороне Солнца, 20. VII. и 23. VII. 2017 наблюдалась серия выбросов СМЕ.

21. VII. 2017 в космических лучах был зарегистрирован предвестник (рис. 4). Поскольку источник активности находился уже за краем (<https://spaceweather.com/archive.php?day=23&month=07&year=2017&view=view>) солнечного диска, явно выраженного понижения в интенсивности ГКЛ не наблюдалось: с момента регистрации предвестника 21. VII. 2017 в интенсивности ГКЛ началось понижение, но постепенное. Напротив, в параметре флуктуаций ГКЛ задний фронт ударной волны от “залимбового” события 23. VII. 2017 про-



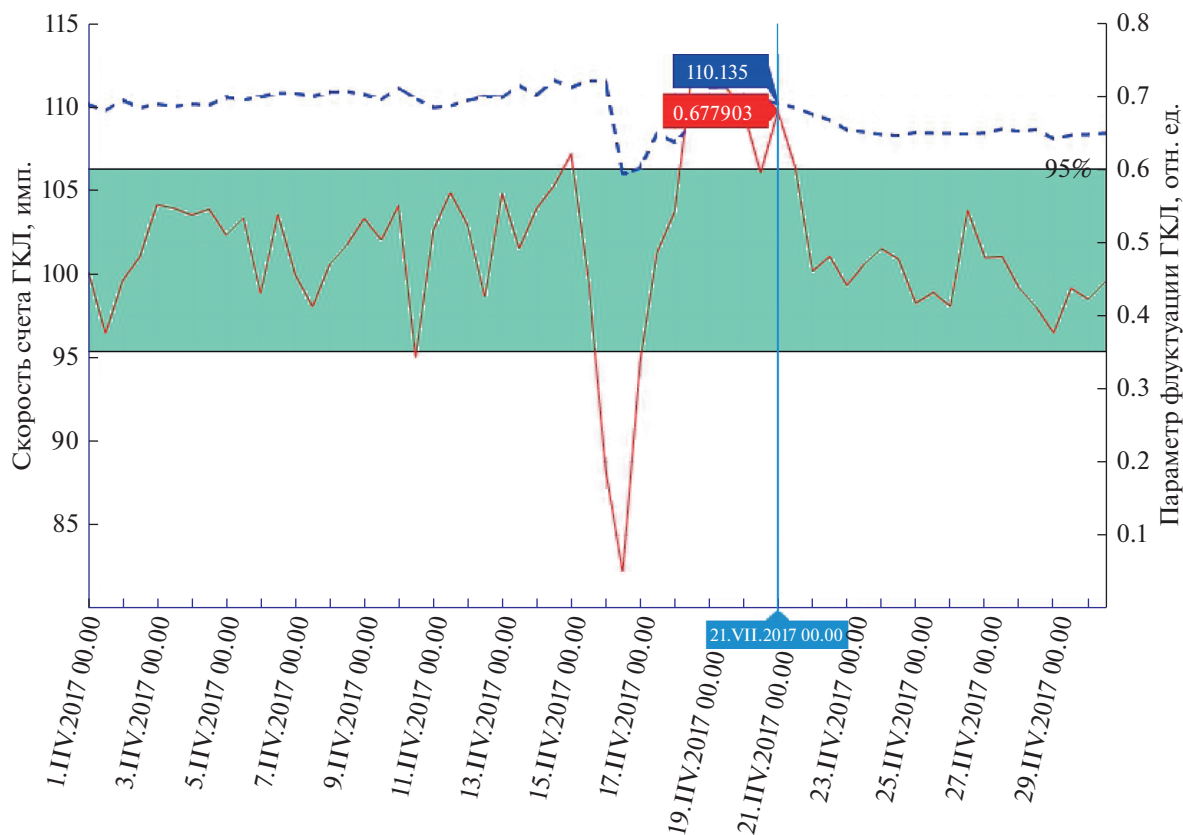
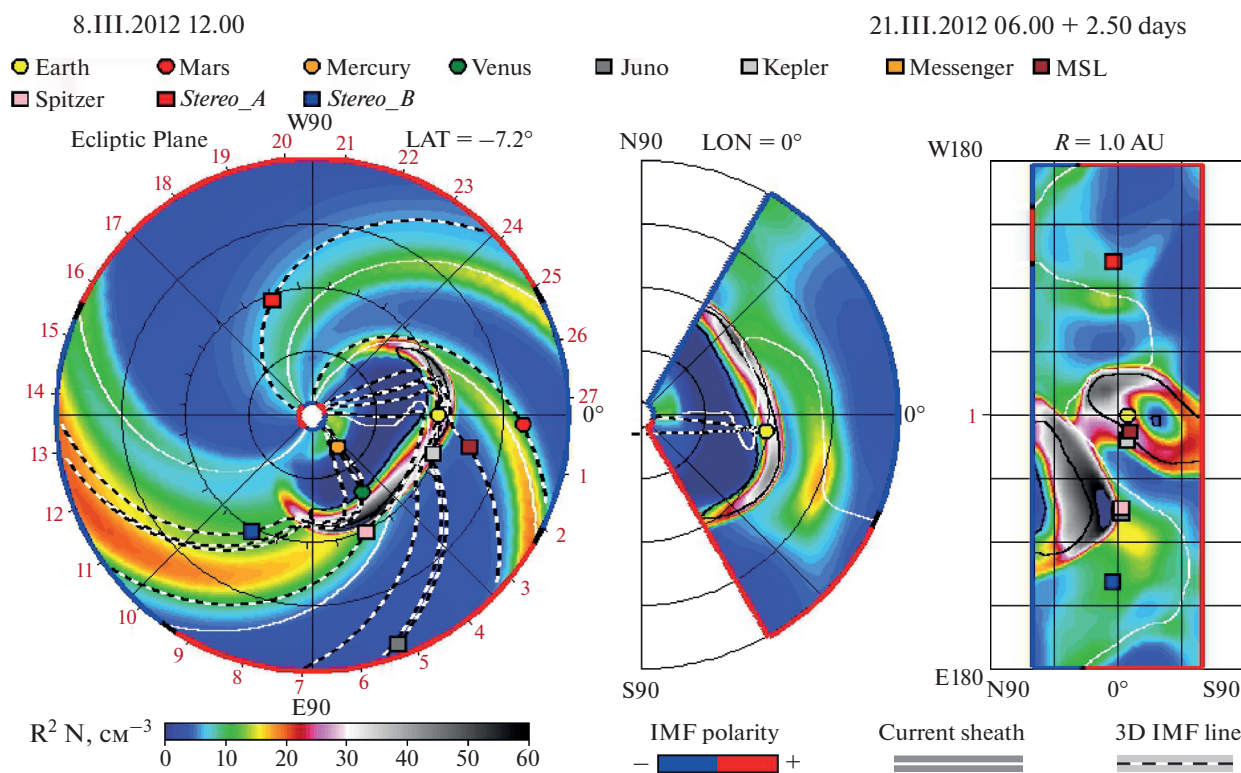
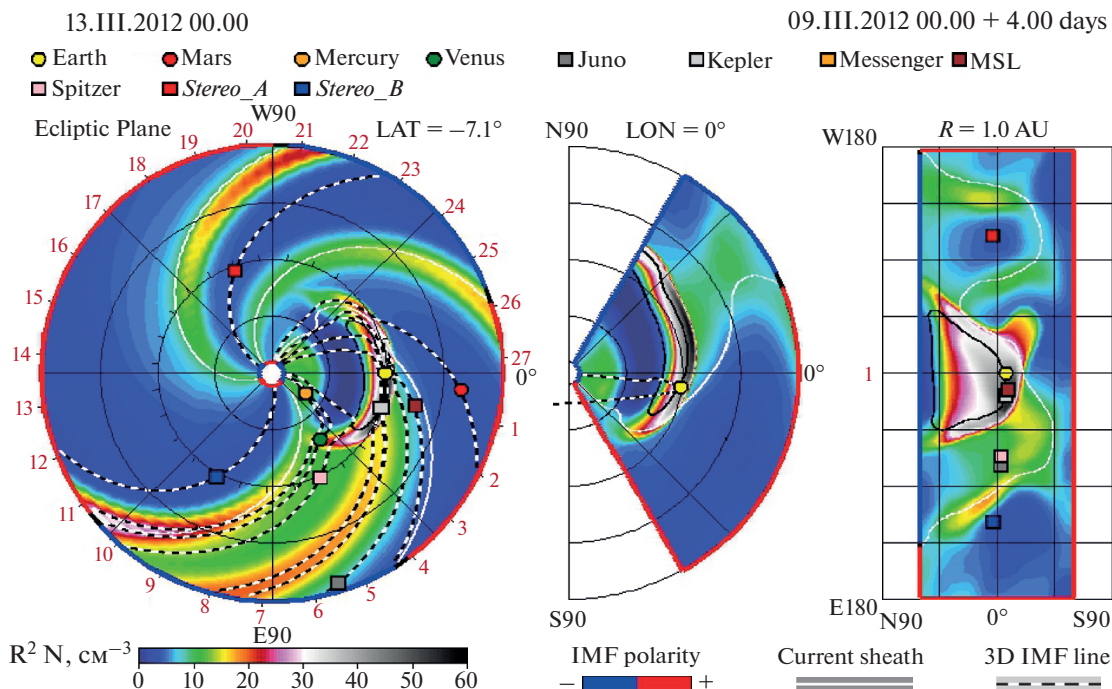


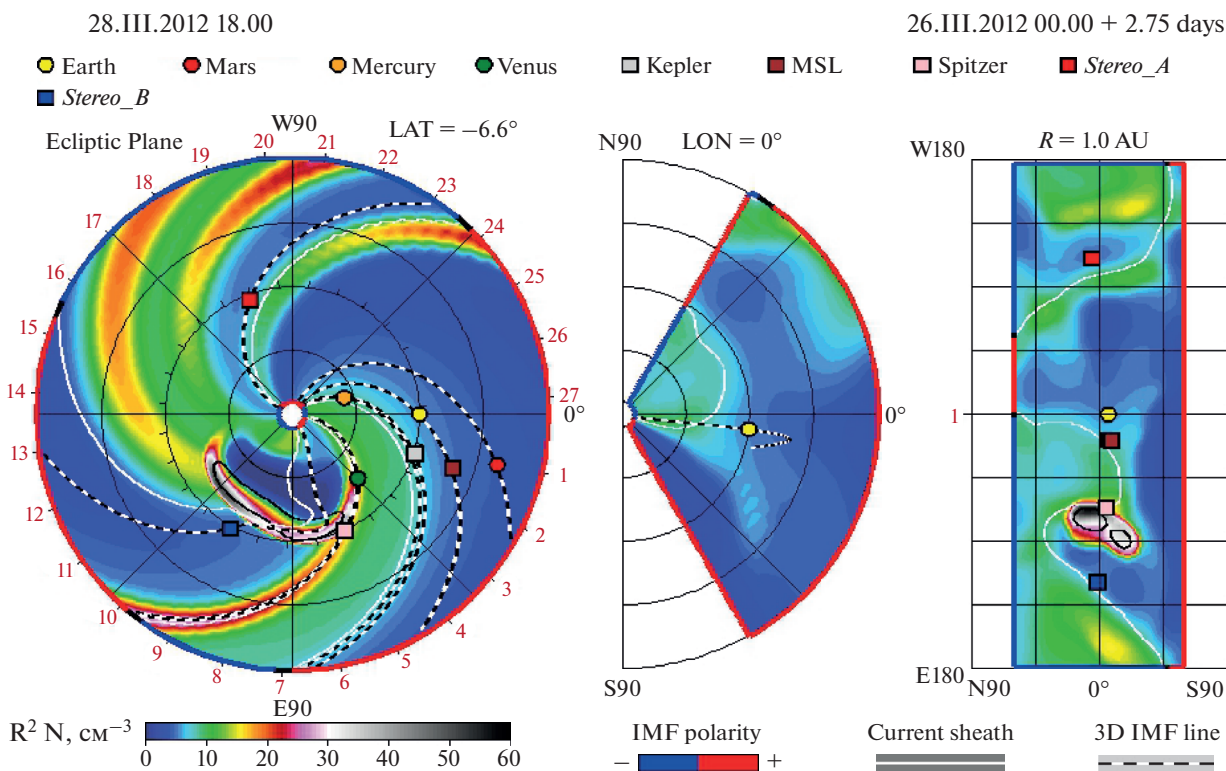
Рис. 4. Результаты расчета параметра флуктуаций ГКЛ в VII.2017.



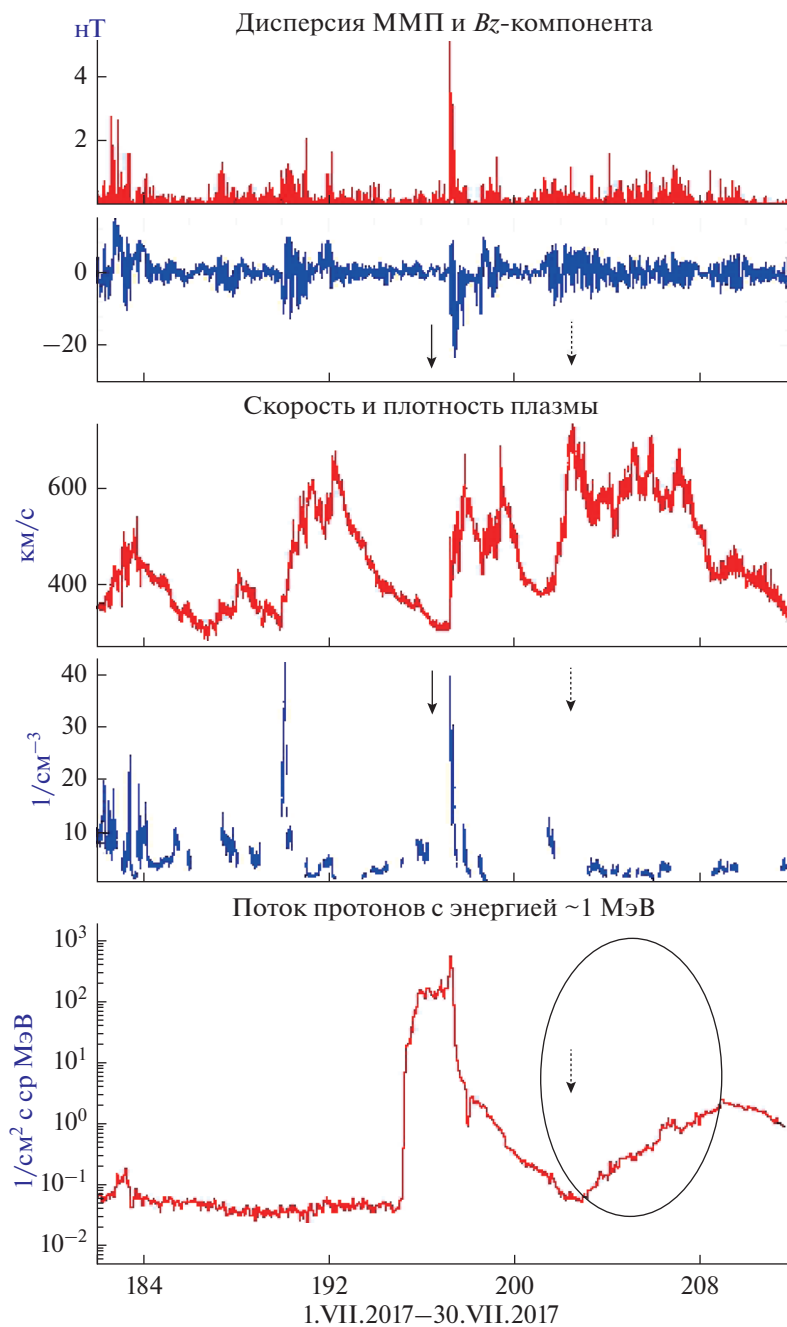
Приложение 5. Обозначения как для Приложения 1.



**Приложение 6.** Анимационная схема динамики экстремального события в окрестности центрального меридиана Солнца. Мощная ударная волна зарегистрирована на орбите (<http://spaceweather.com/archive.php?day=09&month=03&year=2012&view=view>) Земли 13.III.2012.



**Приложение 7.** Анимационная схема динамики экстремального “залимбового” события 27–28.III.2012, зарегистрированного за восточным краем солнечного диска (<http://spaceweather.com/archive.php?day=27&month=03&year=2012&view=view>).



Приложение 8. Обозначения как для Приложения 1.

явился в виде достаточно резкого понижения параметра флуктуаций 22–25.VII.2017 (рис. 4). Это подтверждается данными прямых измерений на космическом аппарате *ACE* (см. Приложение 8, а также [7]). В целом, полученные выше результаты позволяют сделать следующие выводы: во-первых, заблаговременность обнаружения “залимбового” источника активности составляет, в среднем, величину  $\Delta t = 3 \pm 1$  сут, во-вторых, мощность источника за лимбом Солнца должна

характеризоваться рентгеновскими вспышками, по крайней мере, не менее M-класса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

И в заключение, следует отметить следующее обстоятельство: для обнаружения невидимого с Земли источника активности на Солнце США осуществили запуск на специальную орбиту два космических аппарата *Stereo-A* и *Stereo-B*. Ту же

самую задачу загоризонтного обнаружения мощного источника активности за лимбом Солнца в режиме реального времени, мы решаем дистанционным методом диагностики околоземного космического пространства: посредством созданной нами (<http://www.forshock.ru/pred.html>) роботизированной экспертной системой Cyber-FORSHOCK на базе уже существующей мировой сети (высокоширотных) станций космических лучей. В нашем случае, планета Земля, вместе с работающими на прием космической радиации высокоширотными станциями нейтронных мониторов (порядка ~10), представляет собой единый “прибор”!

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В окрестности фронта крупномасштабного возмущения солнечного ветра – ударной волны – обнаружен переходный режим с образованием анизотропных “пучков” частиц. Подобные пучки коррелированных частиц – эффект “гало” в космических лучах, являются, по сути, предвестниками ударной волны. Наиболее ярко эффект “гало” проявляется в случае загоризонтного обнаружения мощного источника активности за лимбом Солнца.

2. Предложен способ раннего обнаружения межпланетных ударных волн с заблаговременностью порядка ~1 сут на базе супермониторинга космических лучей по данным мировой сети (высокоширотных) нейтронных мониторов: <http://www.nmdb.eu>. Способ реализован в виде роботизированной экспертной системы “Cyber-FORSHOCK” (<http://www.forshock.ru/pred.html>). Вероятность прогноза геоэффективных событий Космической погоды  $\geq 80\%$ . Это важно, прежде всего, для прогноза наиболее опасных проявлений Космической погоды: возрастаний “штормовых” частиц, ускоренных на фронте ударной волны, предвещающих приход ударной волны на орбиту Земли.

3. Заблаговременность “загоризонтного” обнаружения залимбового источника активности составляет, в среднем, величину  $\Delta\tau = 3 \pm 1$  сут, при этом, мощность источника за лимбом Солнца должна характеризоваться рентгеновскими вспышками, по крайней мере, не менее М-класса. В нашем случае, планета Земля, вместе с рабо-

тающими на прием космической радиации высокоширотными станциями космических лучей (порядка ~10), представляет собой единый “прибор”.

В заключение, автор выражает 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 (<http://www.forshock.ru/pred.html>), по 5-мин данным Европейской БД космических лучей.

Автор выражает также искреннюю признательность и благодарность Илье Усоскину, 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. Козлов В.И., Козлов В.В. АРИТМИЯ СОЛНЦА. В космических лучах. Якутск: ФГБУН ИМЗ СО РАН, ИКФИА СО РАН, 2019.
2. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин И.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983.
3. Козлов В.И., Крымский П.Ф. Физические основания прогноза катастрофических явлений. Якутск: ЯНЦ СО РАН – ИКФИА, 1993.
4. Козлов В.И., Козлов В.В. “Аномальная” активность Солнца в “слабых” циклах 20 и 23 как проявление инварианта 11-летнего цикла // Солнечно-земная физика. 2008. Т. 1. Вып. 12. С. 32–33.
5. Козлов В.И., Козлов В.В. Параметр флуктуаций галактических космических лучей – индикатор степени неоднородности магнитного поля // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51. № 2. С. 191–201.
6. 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.
7. Ying D. Liu, Xiaowei Zhao, Huidong Hu et al. A Comparative Study of 2017 July and 2012 July Complex Eruptions: Are Solar Superstorms “Perfect Storms” in Nature? // Astrophys. J. Supplement Series. 2019. V. 214. № 2. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab0649>