

Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды.

В. Г. Григорьев, С. А. Стародубцев
Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Россия

Абстракт

В ИКФИА СО РАН, с целью прогноза космической погоды, проводится непрерывный, в режиме реального времени, мониторинг по определению параметров анизотропии космических лучей (КЛ), ответственной за наблюдаемую на Земле суточную вариацию интенсивности регистрируемых частиц. При этом используются часовые данные нейтронного монитора и наземного мюонного телескопа только одной станции – Якутского спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина. С расширением базы данных мировой сети станций нейтронных мониторов (NMDB), появилась возможность исследования динамики параметров анизотропии КЛ с использованием метода глобальной съемки в режиме реального времени. В связи с этим, авторами проведена реализация этого метода на основе данных NMDB. С целью использования результатов расчетов для прогноза космической погоды, выполнен совместный анализ поведения полученных непрерывных часовых значений параметров суточной анизотропии и изотропной интенсивности КЛ, вариаций Dst-индекса геомагнитной активности и скорости солнечного ветра за 2012-2013 годы. Результаты проведенного анализа показывают, что использование метода глобальной съемки в реальном времени позволит увеличить достоверность прогноза попадания Земли в геоэффективные крупномасштабные возмущения солнечного ветра.

Введение

Для большого количества событий попадания Земли в крупномасштабные возмущения солнечного ветра, разными авторами выявлены их предвестники - характерные изменения интенсивности и углового распределения галактических космических лучей [1,2]. Исследования, выполненные на основе измерений интенсивности КЛ с помощью нейтронных мониторов [3], показали, что около 80% наиболее интенсивных геомагнитных бурь (с $K_p > 8$) имеют явные предвестники. Также имеют предвестники, по измерениям мюонных телескопов [4], $\approx 70\%$ больших геомагнитных бурь ($K_p > 7$). Установлено, что среднее время между началом регистрации предвестников и приходом межпланетной ударной волны на орбиту Земли по данным нейтронных мониторов составляет 4 часа, а по мюонных телескопов - 8 часов. В настоящее время, существуют также методики прогноза возмущений межпланетной среды на основе анализа анизотропии КЛ по данным ограниченного числа станций. Результаты этих исследований доступны в сети Интернет по адресам:

<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather>,

<http://cr0.izmiran.rssi.ru/AnisotropyCR/main.htm>,

<http://www.mustang.uni-greifswald.de/spaceweather.htm>.

С 2008г в ИКФИА СО РАН, с целью прогноза космической погоды, организован непрерывный мониторинг по определению параметров суточной анизотропии КЛ в режиме реального времени по часовым данным одной станции – Якутского спектрографа КЛ им.

А.И. Кузьмина [5]. (http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/currents_real_time.html).

Реализация мониторинга КЛ основана на использовании гармонического анализа данных регистрации спектрографа за каждые истекшие 24 часа наблюдений. Методика определения параметров A_x и A_y вектора суточной анизотропии КЛ A в системе координат GSE остается обычной, но возникает необходимость учета сдвига ее фазы, обусловленного вращением Земли и, с помощью метода приемных векторов [6], влияния атмосферы, геомагнитного поля, энергетического спектра КЛ, а также приемных характеристик прибора на величину и фазу определяемого вектора A . Если происходящие изменения фазы и амплитуды анизотропии A , при различных возмущениях межпланетной среды, достаточно стабильны во времени (более чем несколько часов), то можно ожидать, что это также будет соответственно отражаться и в результатах гармонического анализа после каждого текущего часа наблюдений. Важно, что при таком подходе, диагностику поведения вектора A можно проводить в реальном времени. Анализ результатов этого мониторинга показывает, что, с вероятностью около 0.7, появление устойчивой и отрицательной $A_x \leq -0.3\%$, одновременно по данным нейтронного монитора и наземного мюонного телескопа, связано с приближением к Земле области возмущенного солнечного ветра. Однако использование гармонического анализа в режиме реального времени имеет свои недостатки, связанные с использованием ограниченного числа станций. Определение параметров вектора A , более реально отображающих динамику межпланетной среды за каждый измеряемый момент времени возможно проводить на основе метода глобальной съемки [6], где вся мировая сеть нейтронных мониторов используется как один прибор, ориентированный в каждый измеряемый момент в разных направлениях. Однако его реализация в режиме реального времени была до недавнего времени невозможной. Ситуация изменилась с организацией и развитием базы данных NMDB, пополняемой в режиме реального времени и доступной в сети Интернет по адресу <http://www.nmdb.eu>. В данной работе, с целью прогноза геоэффективных возмущений межпланетной среды, приводятся результаты исследования поведения параметров суточной вариации КЛ, полученных методом глобальной съемки с использованием базы данных NMDB за 2012-2013гг., до начала наблюдавшихся геомагнитных возмущений.

Метод глобальной съемки и его реализация

Каждый прибор мировой сети станций КЛ в измеряемый момент времени регистрирует излучение приходящее в определенном направлении. Так как этот прибор установлен на вращающейся Земле, то преимущественное направление на источник излучения определяется один раз в сутки. Ларморовский радиус частиц, регистрируемых наземными нейтронными мониторами, намного больше размеров Земли. Поэтому можно считать Землю с имеющейся сетью нейтронных мониторов одним прибором, ориентированным в измеряемый момент времени в разных направлениях. Получаемые в этом случае характеристики анизотропии КЛ будут давать глобальную картину явлений в объеме межпланетной среды, определяемой ларморовским радиусом частиц. Направление на источник излучения частиц при этом будет в каждый измеряемый момент времени. Приборы, имеющие различные приемные векторы, регистрируют интенсивность I , которую можно представить следующим образом:

$$I = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_n^m \cdot x_n^m + b_n^m \cdot y_n^m),$$

где x_n^m, y_n^m - компоненты приемных векторов для каждого прибора. Если число приборов достаточно, то компоненты a_n^m и b_n^m вектора распределения интенсивности КЛ (для первых двух сферических гармоник) в каждый измеряемый момент времени могут быть найдены из системы линейных уравнений для каждого прибора, которая решается методом наименьших квадратов в предположении, что ряд быстро затухает. Однако возможности этого метода реализовать полностью в настоящее время по ряду причин невозможно. Это обусловлено неравномерностью расположения станций на земной поверхности, зависимости влияния геомагнитного поля от географического положения станции и др. В настоящее время в ИКФИА СО РАН, с использованием данных базы NMDB в режиме реального времени, реализован непрерывный мониторинг по определению параметров первых двух угловых моментов функции распределения КЛ в межпланетном пространстве с помощью метода глобальной съемки [7]. Для проведения расчетов привлекаются часовые данные всех нейтронных мониторов, представленных в этой базе. Следует отметить, что для этой цели, проведены новые расчеты приемных векторов, а основной трудностью в реализации этого мониторинга является устранение инструментальных вариаций, связанных с неустойчивой работой приборов.

Ожидаемое поведение вектора анизотропии КЛ перед возмущениями межпланетной среды

Средние амплитуда и фаза вектора анизотропии КЛ A , определяющей наблюдаемую на Земле суточную вариацию интенсивности частиц, имеют соответственно величину $\approx 0.4\%$ и направление на ≈ 18 часов местного времени и хорошо согласуются с конвективно-диффузионной моделью ее образования [8]. Но в периоды прохождения возмущений солнечного ветра, эти параметры могут значительно изменяться по величине и фазе. При этом, эти изменения происходят различным образом и с разным периодом еще до начала возмущения. В работе [9] проводилось исследование динамики потоков КЛ, рассчитанных на основе обработки данных мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки в периоды до начала и во время 29 форбуш-эффектов, наблюдавшихся в 1966 и 1968 гг. Согласно полученным в ней результатам, можно выделить 4 типа предвестников (предикторов) с характерным для каждого поведением вектора A перед началом возмущения. Во первых, это увеличение величины компоненты A_x в направлении к Солнцу (увеличение составляющей потока частиц КЛ от Солнца), во-вторых- это случаи, в которых происходит поворот вектора A в сторону от Солнца (появление потока к Солнцу). Кроме того, могут наблюдаться случаи значительного (до 0.8%) увеличения составляющей A_y (3-й тип) и его обратного (аномального) направления от среднего (4-й тип). Для первых 3-х типов, авторы находят объяснение наблюдающихся поведений анизотропии КЛ A в рамках моделей неоднородного солнечного ветра и оболочечного Форбуш-эффекта. В работе [10], путем статистического анализа результатов обработки методом глобальной съемки

непрерывных часовых данных за 1966-1994г., также был сделан вывод о том, что появление устойчивой (от нескольких часов до 3-х дней и с амплитудой более 0.2%) отрицательной компоненты анизотропии КЛ A_x , является одним из признаков последующего попадания Земли в возмущенные области солнечного ветра.

Экспериментальные данные и результаты

Мы провели совместный анализ поведения вектора анизотропии A и изотропной вариации КЛ, рассчитанных методом глобальной съемки, данных по Dst-вариациям геомагнитного поля и скорости солнечного ветра для выбранных периодов геомагнитных возмущений, наблюдавшихся в 2012-2013гг.

Анизотропия КЛ в сторону Солнца

На рис.1 представлены динамика поведения вектора A (усредненные 3-х часовые значения), Dst-индекса, скорости солнечного ветра V_{sw} и изотропной составляющей интенсивности КЛ (I) перед началом геомагнитных бурь, наблюдавшихся 17 января (а) и 28 июня (б) 2013г. Как видно из рис.1, примерно за 9 (рис1а) и 15 (рис1б) часов до начала геомагнитных возмущений, наблюдается резкое увеличение (более 0.3%) положительной составляющей A_x в сторону Солнца. При этом, в первом случае, геомагнитная буря не сопровождается возмущением солнечного ветра, но проявляется небольшим возмущением в интенсивности КЛ. Во втором примере, геомагнитная буря начинается одновременно со скачком скорости солнечного ветра и понижением интенсивности КЛ.

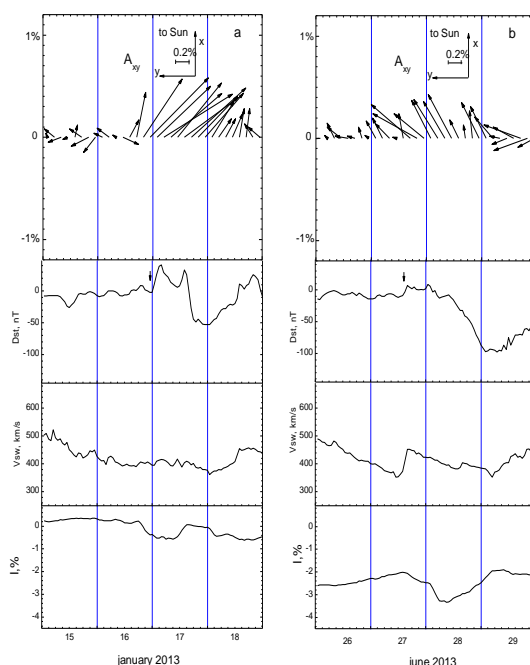


Рис.1. Динамика поведения вектора анизотропии КЛ A , Dst-индекса, V_{sw} и I перед началом геомагнитных бурь, наблюдавшихся 17 января (а) и 28 июня (б) 2013г. Стрелкой указано начало геомагнитной бури.

Анизотропия КЛ со стороны Солнца.

На рис.2 представлены динамика поведения вектора A , Dst-индекса, V_{sw} и I перед началом геомагнитных бурь, наблюдавшихся 23 апреля (а) и 15 июля (б) 2012г. Примерно за 15 часов (рис.2а) и более чем за 2-е суток (рис.2б) до начала приведенных геомагнитных бурь, суточная анизотропия КЛ в основном направлена от Солнца. В первом примере (рис.2а) начало геомагнитного возмущения сопровождается лишь незначительным повышением V_{sw} и отсутствием эффекта в интенсивности КЛ. Начало второй геомагнитной бури (рис.2б) происходит одновременно со скачком ($> 200\text{km/s}$) V_{sw} и значительным ($\sim 3\%$) форбуш-понижением КЛ.

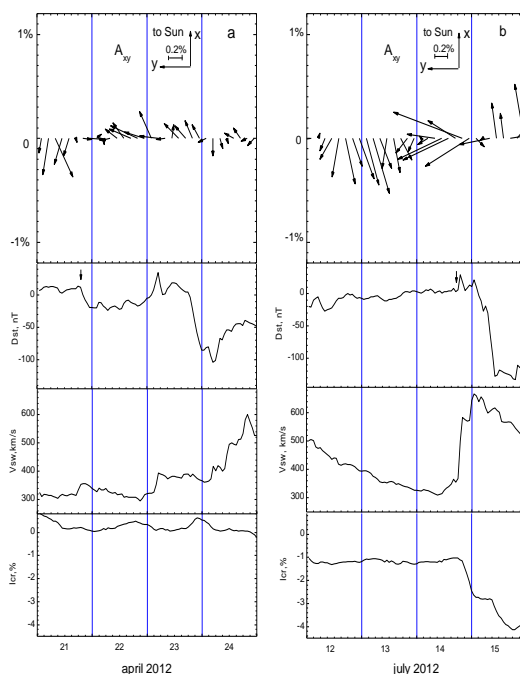


Рис.2. Динамика поведения вектора анизотропии A , Dst-индекса, V_{sw} и I перед началом геомагнитных бурь, наблюдавшихся 23 апреля(а) и 15 июля .(б) 2012г. Стрелкой указано начало магнитной бури.

Азимутальная и аномальная анизотропия КЛ.

На рис.3 представлены динамика поведения вектора A , Dst-индекса, V_{sw} и I перед началом геомагнитных бурь, наблюдавшихся 5 июля 2013г. (а) и 30 сентября 2012г. (б). Как видно из рис.3, за менее чем 2-е суток до начала геомагнитного возмущения наблюдается увеличение азимутальной компоненты анизотропии A_y в первом случае (рис.3а) и аномальное поведение вектора A за период более чем сутки во втором (рис.3б). При увеличении A_y геомагнитная буря (рис.3а) не сопровождается заметными изменениями скорости солнечного ветра V_{sw} и интенсивности КЛ I . При аномальном

поведении вектора A , динамика главной фазы SSC коррелирует с увеличением скорости солнечного ветра, но не сопровождается форбуш-понижением КЛ.

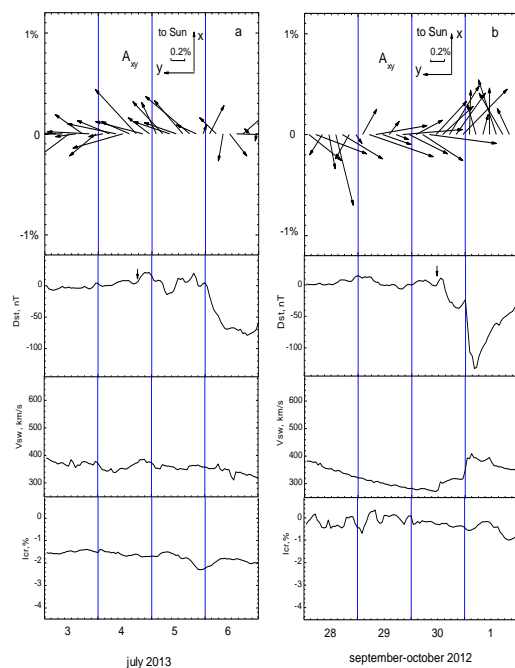


Рис.3. Динамика поведения вектора анизотропии A , Dst-индекса, V_{sw} и I перед началом геомагнитных бурь, наблюдавшихся 4-6 июля 2013г.(а) и 30 сентября – 1 октября 2012г.(б). Стрелкой указано начало магнитной бури.

Анализ эффективности предикторов

С целью анализа эффективности использования результатов метода глобальной съемки для прогноза геомагнитных бурь, нами проведено исследование связи наблюдаемых изменений поведения вектора анизотропии КЛ A , изотропной интенсивности КЛ, проявлений геомагнитных возмущений и скорости солнечного ветра за весь период с 2012 по 2013г. По данным WDC for Geomagnetism, Kyoto, нами рассмотрено 25 умеренных геомагнитных бурь с амплитудой ниже -50nT . В таблице приведены время начала, дата и амплитуда Dst-вариаций, указаны время проявлений и характер предикторов по поведению вектора анизотропии КЛ A . Результаты проведенного статистического анализа показывают, что из 25 возмущений геомагнитного поля, 20 (80%) имели предикторы с заблаговременностью от 9 часов до почти 3-х суток. При этом, основным предиктором (48%) начала геомагнитной бури является появление устойчивой (более 3-х часов и с амплитудой $> 0.3\%$) компоненты потока КЛ в сторону Солнца (отрицательная A_x). Появление потока КЛ со стороны Солнца (положительная $A_x > 0.3\%$) было предиктором в 24% рассмотренных магнитных бурях. По 4% имели случаи увеличения A_y или аномального поведения A . Следует отметить, что появления приведенных типов предикторов, не имеют каких-либо

характерных связей с динамикой поведения скорости солнечного ветра V_{sw} и интенсивностью КЛ I.

Таблица. Время и дата начала геомагнитных возмущений и их предикторов. Указаны амплитуда геомагнитных бурь и характер изменения вектора A . Знак (-) – отсутствие заметных изменений от среднего в поведении вектора A .

№	Время и дата начала SSC	Dst, nT	Время и дата появления предиктора	Направление изменения вектора анизотропии A
1	01 ^h 22.01.12	-69	07 ^h 20.01.12	аномальное
2	16 ^h 24.01.12	-73	12 ^h 23.01.12	от Солнца
3	14 ^h 13.02.12	-58	02 ^h 13.02.12	от Солнца
4	01 ^h 18.02.12	-54	09 ^h 16.02.12	к Солнцу
5	17 ^h 27.02.12	-48	06 ^h 26.02.12	от Солнца
6	06 ^h 07.03.12	-74	-	-
7	12 ^h 08.03.12	-131	23 ^h 07.03.12	от Солнца
8	16 ^h 15.03.12	-74	21 ^h 12.03.12	от Солнца
9	05 ^h 23.04.12	-108	04 ^h 21.04.12	от Солнца
10	18 ^h 16.06.12	-71	03 ^h 14.06.12	к Солнцу
11	01 ^h 09.07.12	-68	-	-
12	04 ^h 15.07.12	-127	11 ^h 14.07.12	от Солнца
13	15 ^h 30.09.12	-119	02 ^h 28.09.12 06 ^h 29.09.12	от Солнца аномальное
14	06 ^h 08.10.12	-104	16 ^h 07.10.12	от Солнца
15	04 ^h 13.10.12	-87	05 ^h 12.10.12	от Солнца
16	01 ^h 17.01.13	-53	16 ^h 16.01.13	к Солнцу
17	07 ^h 17.03.13	-132	21 ^h 16.03.13	от Солнца
18	17 ^h 31.05.13	-116	17 ^h 29.05.12	от Солнца
19	19 ^h 06.06.13	-71	07 ^h 06.06.13	к Солнцу
20	05 ^h 28.06.13	-97	14 ^h 27.06.13	к Солнцу
21	02 ^h 06.07.13	-79	13 ^h 05.07.13	Азимутальное
22	03 ^h 02.10.13	-67	09 ^h 29.09.13	к Солнцу

23	23 ^h 08.10.13	-65	-	-
24	04 ^h 09.11.13	-81	-	-
25	23 ^h 07.12.13	-66	-	-

Заключение

1. С целью прогноза геоэффективных возмущений солнечного ветра, исследована возможность использования результатов реализации в реальном времени метода глобальной съемки на основе базы данных сети нейтронных мониторов NMDB/
2. Анализ полученных результатов показал, что использование такого подхода и его последующее развитие может значительно (до 80%) повысить достоверность прогноза геоэффективных возмущений межпланетной среды по данным наземных измерений космических лучей.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№12-02-98507-р_восток-а и №13-02-00989-а), Программы Президиума РАН №10, гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-3269.2014.2) и Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 8404).

Литература

1. Dorman L.I. et al., Proc. 28-th Int. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, 6, 3553. 2003.
2. K. Munakata et al., Geophys. Res. Lett., 32, L03S04, doi:10.1029/2004GL021469, 2005.
3. Belov A.V. et al., Proc. 27-th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, 9, 3507. 2001.
4. Munakata K. et al., J. Geophys. Res., 105, 27457. 2000.
5. Grigoryev V.G., Starodubsev S.A., Krivoshapkin P.A., Prikhodko A.N., Yegorov A.G. Cosmic ray anisotropy based on Yakutsk station in real time. // *Advances in Space Research*, V.41, P. 943–946, 2008.
6. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука. 224с. 1981.
7. Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A. and Potapova V.D. Definition of parameters of daily anisotropy of cosmic rays according to the world network of neutron monitors. // *J. Phys.: Conf. Ser.*, V.409, 012172, 2013.
8. Крымский Г.Ф. Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве. М.: Наука. 152с. 1969.
9. Алтухов А.М., Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И. Динамические эффекты в космических лучах. // В сб. Распределение галактических космических лучей и динамика структурных образований в солнечном ветре. Якутск: ЯФ СО АН СССР, С.198-248.1973.
10. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Кривошапкин П.А., Приходько А.Н., Егоров А.Г., Турпанов А.А. Анизотропия космических лучей по данным станции Якутск в реальном времени. // Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности. Тр. Всероссийской конференции, Троицк: ИЗМИРАН, С.79-84, 2006.