

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2002 г. А. В. Белов, Р. Т. Гущина, В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг, В. Г. Янке
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН

Запаздывание поведения галактических космических лучей (ГКЛ) относительно солнечных процессов позволяет ставить вопрос о прогнозировании потока КЛ, наблюдаемого в околоземном космическом пространстве. Для такого прогноза требуются: 1) надежные данные о вариациях КЛ и индексах солнечной активности, доступные в реальном времени или в близком к этому режиме и 2) достаточно достоверная модель модуляции КЛ, связывающая глубину модуляции КЛ с солнечными индексами. В работе рассмотрена возможность краткосрочного (1-12 месяцев) прогнозирования вариаций ГКЛ по наблюдениям на отдельной станции КЛ и проведена оценка качества такого прогноза.

Введение.

Галактические космические лучи (ГКЛ) приходят на Землю, пройдя длинный запутанный путь в гелиосфере, где на них воздействует замагниченная плазма солнечного ветра, находящаяся на различных расстояниях от Солнца и покинувшая его в различное время в прошлом. Наблюдаемая у Земли глубина модуляции КЛ является интегральным результатом солнечных и гелиосферных событий, контролирующих поведение КЛ во всей гелиомагнитосфере. Запаздывание поведения КЛ относительно солнечных процессов (гистерезис КЛ) – известно с давних пор (см. например [1,2]). Интересные исследования этого явления продолжают появляться и в последние годы [например, 3-4]. В поведении запаздывания вариаций КЛ отражаются сложные, индивидуальные особенности солнечных циклов, его связь с солнечным магнитным циклом. Этой особенностью временных изменений потока ГКЛ мы предлагаем воспользоваться для прогнозирования потока КЛ, наблюдаемого в околоземном космическом пространстве. Сейчас мы имеем необходимые составляющие для такого прогноза: результаты непрерывного долгосрочного мониторинга КЛ на сети станций, длительные ряды наблюдений разнообразных проявлений солнечной активности (СА) и разработанную модель

долговременной модуляции [5-7 и ссылки к ним], связывающую наблюдаемый поток КЛ на Земле с характеристиками СА.

Данные и методы

В последние годы для проверки моделей модуляции мы использовали вариации плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ, полученные на основе данных сети наземных наблюдений. Мы уверены, что для изучения модуляции дифференциальная плотность КЛ предпочтительнее, чем данные отдельных детекторов. Однако, пока не станет возможным надёжно определять энергетический спектр вариаций КЛ в реальном времени, нам придётся использовать для прогнозирования потока КЛ отдельные нейтронные мониторы (НМ). Станция КЛ в Москве вполне отвечает предъявляемым для прогноза требованиям: в этом пункте с 1958 г. по настоящее время без перерыва на НМ регистрируются частицы с эффективной энергией близкой к 10 ГВ и данные представляются в реальном времени в Интернет. В среднем за последние 25 наблюдаемые московским НМ вариации, были в 1.13 раза меньше, чем вариации плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ.

Необходимая для прогноза полуэмпирическая модель, связывающая наблюдаемые долгопериодные вариации КЛ с характеристиками солнечного магнитного поля, разработана в ИЗМИРАНе и проверена на вариациях плотности КЛ за три последних цикла СА [5-7]. Моделирование долговременной модуляции ГКЛ проведено на основе совместного использования характеристик глобального магнитного поля Солнца, рассчитанных для поверхности источника солнечного ветра: наклон гелиосферного токового слоя, средняя напряженность магнитного поля и его полярность. Детальное обоснование использования именно этих характеристик для построения модели модуляции КЛ дано в [7]. Характеристики магнитного поля Солнца получены по методике, разработанной в [8-10] с использованием магнитных и оптических наблюдений и специально усовершенствованной для построения модели модуляции КЛ. Временные границы инверсии глобального поля на Солнце получены из различных данных наблюдений на фотосфере и на поверхности источника солнечного ветра. Отметим, что модель учитывает как прямое воздействие полярности глобального магнитного поля Солнца на КЛ, так и влияние полярности на модуляцию КЛ, связанную с изменением наклона токового слоя. Нами показано, что поведение КЛ лучше коррелирует с изменением полярности на поверхности источника, чем с инверсией поля на фотосфере. Уточнение полученных границ переполусовок мы проводили с помощью самих КЛ, полагая, что глубина модуляции КЛ является индексом СА, наиболее полно обобщающим различные её проявления.

Результаты и обсуждение

Модель модуляции, использованная здесь, является модификацией модели, описанной в работах [6, 7]. Расчеты проводились с помощью многопараметрического регрессионного анализа, позволяющего оценить вклад в прогнозируемую модуляцию КЛ долговременных изменений каждой характеристики глобального магнитного поля Солнца с учетом собственного максимального времени запаздывания $\tau_{\text{зап}}$. В данной работе, в отличие от предыдущих, мы попытались рассчитывать вариации на несколько месяцев вперед (в этой работе расчет выполнен от 1 месяца до 13). При этом, рассчитывая интегральные индексы солнечной активности [5], мы просто не использовали данные за последние месяцы. Для полярности поля использовались полные данные, поскольку для основной части времени её прогноз тривиален. Известно, например, что в ближайшие несколько лет полярность будет отрицательной. На рис.1 показано изменение коэффициента корреляции ρ и стандартного среднеквадратичного отклонения σ (%) в зависимости от времени прогноза (месяцы) для трех различных временных интервалов. Расчет выполнен для следующих периодов: 1977-2001 гг. – весь анализируемый период, объединяющий данные с разным направлением глобального магнитного поля Солнца и моментами переполюсовки поля, 1981–1989 гг. – период с отрицательной полярностью ($q_A < 0$) и 1991–2000 гг., когда полярность поля на Солнце была положительной ($q_A > 0$). Полученные результаты показывают, что достаточно тесная корреляция (ρ меняется от 0.84 до 0.98; σ от 2.94% до 0.80%) прогнозируемых на 1-12 месяцев долговременных вариаций КЛ с выбранными характеристиками солнечной активности прослеживается для всех трех периодов. Этот факт указывает на пригодность выбранной модели модуляции. Кроме того отчетливо видно, что результаты улучшаются (ρ растет, σ падает), если брать более короткие периоды с одинаковой полярностью глобального поля на Солнце, и наилучшее согласие наблюдаемых и ожидаемых вариаций существует для положительной полярности, что, по-видимому, прежде всего говорит о более тесной связи модуляции КЛ с наклоном ГТС в периоды положительной полярности [11].

На рис. 2 приведен прогноз (на 1 месяц и на 12 месяцев), наблюдаемых на станции Москва долговременных вариаций КЛ, вместе с реально наблюдавшимися вариациями. При прогнозировании вариаций на 1 месяц коэффициент корреляции остается высоким ($\rho = 0.95$), $\tau_{\text{зап}1} = 9$ мес. для изменений наклона токового слоя и $\tau_{\text{зап}2} = 4$ мес. для изменений средней напряженности магнитного поля Солнца. Прогноз на 12 месяцев дает $\rho = 0.84$. Такой уровень корреляции, хотя он и значительно ниже, чем для 1 месяца, можно было бы, вообще говоря, считать приемлемым. Однако анализ показывает, что при этом вклад напряженности магнитного поля становится пренебрежимо малым и $\tau_{\text{зап}1} = 0$, т.е. в этом случае ожидаемые вариации КЛ определяются исключительно изменением наклона токового слоя в последний доступный месяц. Вклад напряженности магнитного поля

становится несущественным уже при прогнозировании на 6-7 месяцев. Это означает, что в рамках нашей модели магнитные поля внутренней гелиосферы намного важнее для модуляции КЛ, чем более удалённые поля. Влияние наклона ГТС, по-видимому, имеет более крупномасштабный характер. В любом случае следует признать, что применённая модель при прогнозировании на полгода или более начинает испытывать трудности. И это не удивительно. Приведённый здесь вариант прогноза (его можно называть ортодоксальным) опирается исключительно на уже измеренные к моменту выдачи прогноза солнечные характеристики. Таким образом, чем больше срок прогнозирования, тем более широкую область внутренней гелиосферы мы, фактически, исключаем из модели, а при прогнозировании на 12 месяцев, эта исключённая область охватывает большую часть гелиосферы. Понятно, что пренебрегая влиянием на космические лучи значительной (или даже основной) части гелиосферы, трудно надеяться на идеальные результаты. Разумеется, ортодоксальный прогноз может быть улучшен, и это следует сделать. Можно будет, по-видимому, извлечь пользу из анализа поведения КЛ в предшествующий период. Ещё более перспективным представляется организация прогноза основных характеристик магнитного поля Солнца, с тем чтобы при прогнозировании вариаций КЛ, наряду с уже измеренными солнечными индексами, использовать оценку их поведения в ближайшем будущем. В настоящее время активно прогнозируется и широко представлено в Интернете число солнечных пятен. К сожалению попытка заменить в нашей модели напряжённость магнитного поля на поверхности источника числом солнечных пятен привела к существенному ухудшению качества модели. Необходимо организовать прогноз характеристик глобального поля Солнца. Мы уверены, что даже грубый оценочный прогноз наклона токового слоя и напряженности глобального поля даст положительный результат при прогнозировании вариаций КЛ. При этом реально осуществить и более долгосрочный (на срок более года) прогноз поведения КЛ.

Заключение

На основе характеристик глобального магнитного поля Солнца, рассчитываемых на поверхности источника солнечного ветра, можно создать методику прогнозирования потока ГКЛ у Земли на 1-12 месяцев вперёд в режиме реального времени. Дальнейшее улучшение качества прогноза должно основываться на оценочном прогнозировании основных характеристик глобального магнитного поля Солнца.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02 -02-16992, 01-02-17580 и 02-02-16199).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simpson J.A.* //Preprint N25. Vatican, 1963. P. 323.
2. *Дорман Л.И.* //Космические лучи, 1967. N8. С.100.
3. *McCracken K. G., McDonald F.B.* //Proc. 27th ICRC, 2001. V.9. P.3753.
4. *Usoskin I.G., Mursula K., and Kovaltsov G.A.* // Proc. 27th ICRC, 2001. V.9. P.3791.
5. *Belov A.V., Gushchina R.T., Obridko V.N., Shelting B.D., Yanke V.G.* // Proc. 27th ICRC, 2001. V.10. P.3911.
6. *Belov A.V., Shelting B.D., Gushchina R.T., Kharshiladze A.F., Obridko V.N., Yanke V.G.* // J. atmospher. and terrest. phys., 2001. V.63. N18. P.1923
7. *Белов А. В., Гущина Р.Т., Обридко В. Н., Харшиладзе А. Ф., Шельтинг Б. Д., Янке В.Г.* //Геомagnetизм и аэрономия, 2001. (в печати).
8. *Hoeksema J.T., & Sherrer P.H.* //Report UAG-94, 1986. WDC-A for Solar Terrestrial Physics
9. *Hoeksema J.T.* // <http://quake.stanford.edu/~wso>, 2000.
10. *Obridko, V. N. and Shelting B. D.* //Solar Physics. 1999. V.184. P.187.
11. *Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С. К. и др.* //Геомagnetизм и аэрономия, 2001. Т.41. N 4. С.444.

**ON THE POSSIBILITY TO FORECAST LONG-TERM VARIATIONS OF GALACTIC
COSMIC RAYS**

A.V.Belov (1), **R.T.Gushchina (1)**, V.N. Obridko (1), B.D. Shelting (1) and V.G.Yanke (1)

(1)Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow region, Russia

Galactic cosmic rays (GCR) arrive at the Earth after having passed a long, intricate way through the heliosphere, where they are affected by the magnetized solar wind plasma. The CR modulation depth observed at the Earth depends on the solar and heliospheric events, which occurred at different time in the past. The delay of CR variations relative to the solar processes allows us to pose the problem of long-term forecast of the CR flux recorded in the Earth's space environment. The development of such forecast would require 1) reliable real-time data on CR variations and solar activity indices and 2) an adequate CR modulation model, which could relate the CR modulation depth to the solar indices.

The calculations show that the forecast of CR modulation for the nearest 1-12 months is quite reliable.

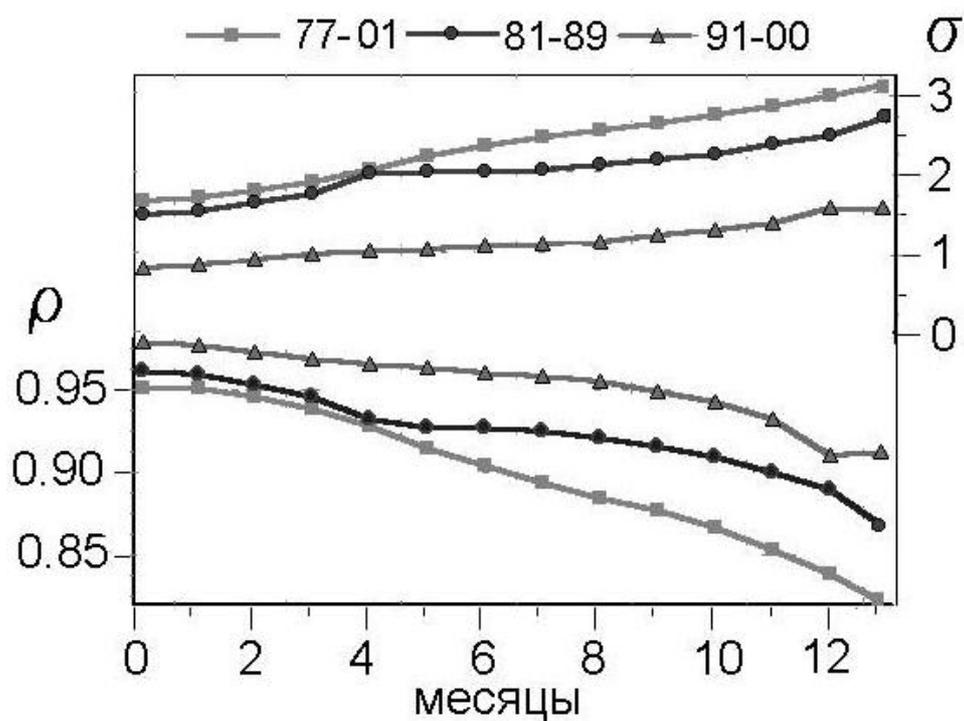


Рис. 1

Изменение коэффициента корреляции ρ и среднеквадратичного отклонения σ (%) для временных интервалов: 1977-2001 гг. (квадратики); 1981-1989 гг. (кружочки) и 1991-2000 гг. (треугольники) в зависимости от времени прогноза (месяцы).



Рис. 2

Вариации КЛ, наблюдаемые на станции Москва (%) и ожидаемые вариации (%), полученные из модельных расчетов для 1977-2001гг.