

## **ПАТРУЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ПОГОДЫ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО МЮОННОГО ГОДОСКОПА-ТОМОГРАФА**

**© 2006 В.В.Борог, О.В.Белоносова, Т.А.Орлова**

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

Рассмотрена методика и приведены примеры ранней идентификации возмущений солнечной погоды (корональных выбросов вещества - КВВ) с помощью широкоапертурного мюонного годоскопа с высоким угловым разрешением. Из направления на Солнце возникают устойчивые аномальные вариации КЛ за 1 – 4 суток до прихода фронта возмущений на орбиту Земли.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время развито много методик и получено большое количество прямых и косвенных данных о моменте зарождения мощной активности в виде КВВ, начальном периоде их развития на Солнце и в его окрестности. Спутниковые оптические снимки типа "гало" не могут однозначно указать направление распространения основной энергии излучения. Прямую информацию о приближении КВВ к орбите Земли дает спутник ACE (в точке Лагранжа – 1,5 млн. км) лишь за 30-50 мин до прихода фронта [1]. Проект системы STEREO [2] состоит из 2-х разнесенных по орбите Земли стационарных спутников, которые по отраженному от КВВ излучению должны восстановить пространственную картину перемещения магнитного облака.

Наземные нейтронные мониторы (НМ) и мюонные телескопы (МТ) могут успешно использоваться для подобных задач, связанных с патрулированием (ранним оповещением) отдаленных возмущений в межпланетном магнитном поле (ММП). Данные отдельных приборов и их объединенная информация из мировой сети позволяют достоверно определять предикторы в среднем за 4-6 часов (НМ) и за 6 – 9 часов (МТ) до начала форбуш-эффекта [3, 4]. Более ранний предиктор от МТ обусловлен большими энергиями первичных КЛ, которым соответствуют МТ (30 – 100 ГэВ), по сравнению с НМ (1 – 30 ГэВ).

Применение мюонных годоскопов с высоким угловым разрешением (1 – 2 градуса) позволяет одновременно регистрировать сотни рядов КЛ по разным направлениям гелиосферы, что качественно улучшает раннее патрулирование солнечной погоды.

## МЕТОД АНАЛИЗА

В конце 90-х годов для исследования вариаций КЛ стали использоваться приборы нового поколения – широкоапертурные мюонные годоскопы, информация от которых получается в непрерывном режиме в виде "снимков-матриц"  $N_{ik}(t)$ . Каждому значению индексов  $i,k$  матрицы в любой момент времени  $t$  соответствует определенное направление в пространстве [5]. В таблице кратко указаны характеристики действующих годоскопов и год их запуска для измерений. В годоскопах используются узкие длинные сцинтилляционные счетчики или пропорциональные камеры, объединенные в несколько  $(X,Y)$  - координатных плоскостей большой площади. От ширины счетчиков зависит угловое разрешение установок. Регистрация частиц под большими зенитными углами позволяет продвинуться в область энергий КЛ более 100 ГэВ. В ближайшее время количество мюонных годоскопов должно увеличиться за счет запуска нескольких новых установок.

Известно, что ММП (спираль Архимеда) имеет выделенное направление, связанное с распространением потока плазмы непосредственно с поверхности Солнца. В работе [9] с помощью годоскопа было обнаружено появление гармонических осцилляций интенсивности мюонов связанных с направлением ММП на протяжении нескольких часов до начала форбуш-понижения. Этот эффект используется в данной работе для поиска заблаговременного предиктора КВВ в виде скрытых периодичностей во временных рядах КЛ из внутренней области гелиосферы. Следует ожидать, что модуляция такого вида может возникать уже на ранней стадии формирования КВВ. Суточные ряды матричных данных  $N_{ik}(t)$  с 1-минутной экспозицией выравнивались с помощью ортогональных полиномов Чебышева третьей степени и затем нормировались  $n_{ik}(t) = (N_{ik}(t) - \langle N_{ik} \rangle) / \sigma_{ik}$ , чтобы исключить влияние углового спектра мюонов, метеозффекты и пространственную неоднородность апертуры. Полиномы малой степени являются аналогом низкочастотного фильтра и практически не влияют на высокочастотный спектр вариаций, с периодами в диапазоне от минут до нескольких часов. Далее проводился спектрально-временной анализ отдельных рядов  $n_{ik}(t)$  на смещающихся 3-х часовых отрезках времени и вычислялись значения  $S_{xx}(f)$  – плотности спектра мощности (ПСМ), во всем диапазоне частот ( $0 < f < 0,5$ ) с шагом 0,01. Для поиска вариаций подсчитывается полная аномальная спектральная

мощность в виде суммы значений ПСМ по всем частотам и во всех рядах матрицы:  $W = \sum S_{xx}(f)$ , если амплитуда  $S_{xx}(f)$  превышает определенное (пороговое) количество стандартных отклонений в спектрах ПСМ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Апробация метода опережающих вариаций КЛ из внутренней области гелиосферы приведена для форбуш-эффекта 19.08.1999 г. В предыдущие дни было спокойное Солнце – в ММП, магнитосфере и атмосфере Земли не отмечено значимых возмущений. При подсчете  $W$  учитывались амплитуды  $S_{xx}$ , превышающие среднее значение на 6 среднеквадратичных отклонений. В предварительном анализе для стационарных условий было получено, что в интервале отклонений от 3 до 5  $\sigma$  практически не наблюдалось аномальных величин  $S_{xx}$ . Их амплитуды, как правило, гораздо больше. На рис. 1 приведен пример изменений  $W$  на фоне невозмущенного состояния магнитного поля Земли. Видно, что на протяжении нескольких дней вдоль линии ММП (в утреннее время – в районе 10:00 LT) получают пики значений параметра  $W$  ( $> 40$  усл. ед.). Эти превышения связаны с измерениями потока КЛ из направления на Солнце.

По мере приближения фронта возмущения к орбите Земли, значение  $W$  возрастает. Большие величины  $W$  начинают уже появляться за трое суток до форбуш-эффекта (ФЭ). Анализ других семи ФЭ (1998 – 2000 гг) дает качественно аналогичную картину: аномальные значения  $W$  возникают за 1 – 4 дня перед фронтом. Параметр  $W$  может служить основой для разработки раннего предиктора. Из рис. 1 также видно, что положение максимумов  $W$  в разные дни монотонно сдвигается (с 8 к 11 часам LT). Это можно интерпретировать как увеличение радиуса кривизны (выполаживание) линий ММП. В дни 16 и 17 августа (рис. 1 а, б) появляются (в районе 18:00 и 20:00 LT или 16:00 и 18:00 UT) аномальные модуляции с восточного направления, которые могут быть связаны с расширяющейся петлевой структурой ММП. В день регистрации ФЭ (19.08.1999) происходит затухание модуляций. Такой эффект "выметания модуляций" наблюдается для большинства обработанных событий.

Высокое пространственное разрешение годоскопа позволяет заблаговременно регистрировать вариации КЛ также из области возмущенного магнитного поля, связанного с перемещением КВВ в пространстве. Поток высокоэнергичных протонов,

проникающий через магнитное облако расширяющегося КВВ, приобретает высокочастотную модуляцию, с характерными периодами меньше одного часа. Длина продольного свободного пробега протонов КЛ с энергией порядка 100 ГэВ сравнима с астрономической ед. длины. Возникшая модуляция практически мгновенно достигает Земли и значительно опережает время приближения фронта КВВ. Динамика изменения частотных модуляций  $S_{xx}(f)$ , из области связанной с КВВ, приведена на рис. 2. Данные относятся к 3-х часовым интервалам из направлений на Солнце в разные дни перед регитрацией ФЭ. Видно, что по мере приближения магнитного облака к орбите Земли амплитуда вариаций возрастает, происходит перекачка энергии между разными частотами. В окрестности Земли угловые размеры возмущенного магнитного поля перекрывают светосилу установки и аномальная модуляция становится заметной во всем диапазоне углов (из фоновых направлений). Достоверные данные в данном событии (15.07.2000 г.) появляются более чем за сутки перед фронтом ФЭ. Анализ других событий указывает, что в среднем опережение составляет около 12 часов.

С помощью годоскопа можно наблюдать пространственную картину модуляций на любой фиксированной частоте  $f_0$  по данным полного набора ПСМ, относящегося ко всем ячейкам матрицы  $n_{ik}$  интенсивности КЛ в определенный отрезок времени. На рис. 3 приведен пример волнового поля для центральной части матрицы размером  $28 \times 28$  ячеек, где сосредоточена основная часть статистики. Видно, что двумерное поле (томографического типа) спектральной мощности  $S_{xx}(f_0)$  выглядит не случайно (в отличие от равномерно расположенных случайных "площадок" пуассоновских вариаций). Наблюдается модуляция вдоль широты, в большом диапазоне углов, и в узком секторе – по долготе. Совокупность снимков такого типа позволяет изучать динамическое поведение (структуру) отдельных участков в области возмущенного магнитного поля, связанного с мощными проявлениями солнечной активности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение мюонных годоскопов дает более ранние предикторы появления мощных КВВ на орбите Земли, по сравнению с нейтронными мониторами и мюонными телескопами. Наблюдение вариаций КЛ в широком диапазоне углов (в виде двумерных матриц интенсивности томографического типа) с высоким разрешением позволяет изучать пространственную динамику изменений в ММП.

2. Одновременная регистрация большого числа временных рядов улучшает отношение "сигнал-шум" при поиске скрытых периодичностей во временных рядах.
3. Мюонные годоскопы являются многоцелевыми приборами и предназначены для решения комплексных задач в области солнечно-земной физики при изучении высокоэнергетичных процессов на Солнце, в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.
4. Несколько широкоапертурных годоскопов в проекте "Земля-космический корабль" (4 – 5 установок, равномерно размещенных по долготе) способно обеспечить непрерывный панорамный мониторинг гелиосферы и служить первым уровнем раннего оповещения в службе солнечной погоды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-02-17213) на уникальной установке Мюонный годоскоп (рег. № 06-11 Минобрнауки РФ).

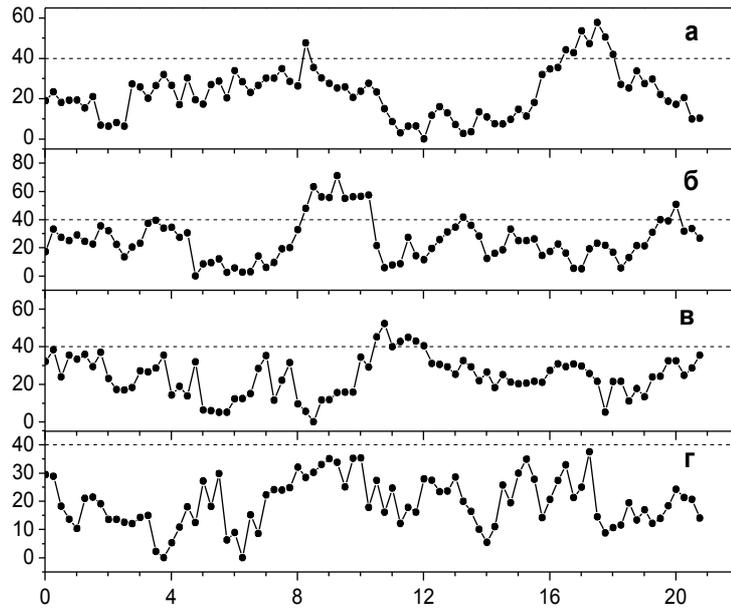
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

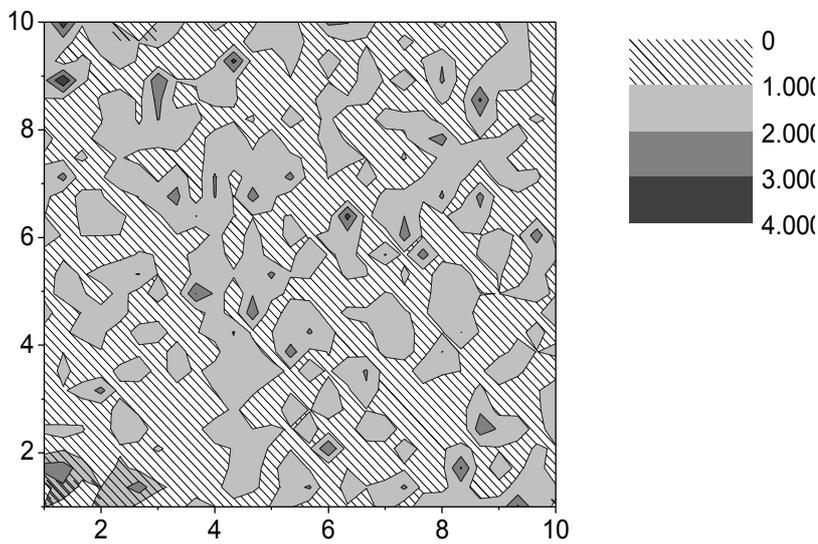
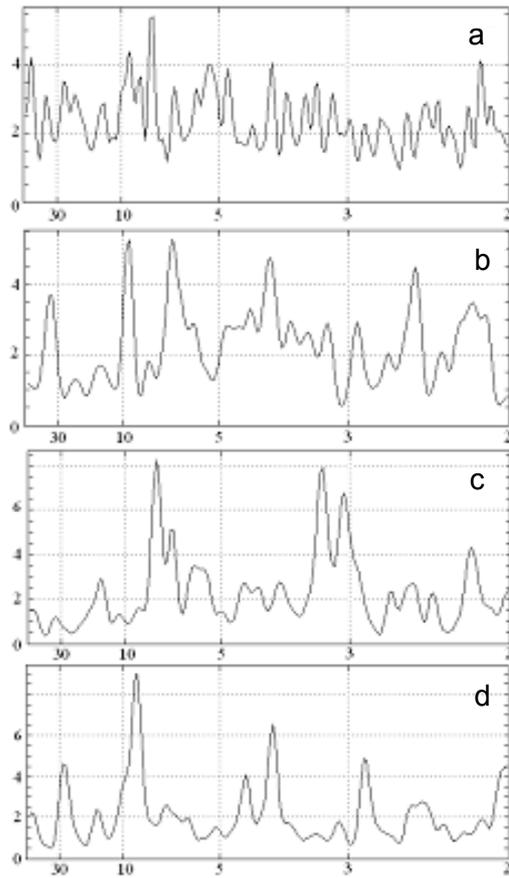
1. <http://www.sec.noaa.gov/ace>
2. <http://stereo.gsfc.nasa.gov/>
3. *Belov A.V. et al.* // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 1999. V. 9. P. 3507.
4. *Munakata K. et al.* // JGR. 2000. V. 105. P. 27,457.
5. *Борог В.В.и др.* // Изв РАН. Сер.физ. 1997. Т. 61. № 6. С. 1256.
6. *Борог В.В.и др.* // Изв РАН. Сер.физ. 1995. Т. 59. № 4. С. 191.
7. *Ohashi Y. et al.* // Proc. 25th ICRC. Durbun. 1997. V. 1. P. 441.
8. *Kawakami S. et al.* // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City. 1999. V. 7. P. 171.
9. *Борог В.В.и др.* // Изв РАН. Сер.физ. 2001. Т. 65. № 3. С. 381.

Характеристики мюонных годоскопов с представлением данных в виде матриц.

Работа	Расположение	Площадь, м <sup>2</sup>	Угловая точн., градус	Размер матриц, i × k	Счет мюонов, с <sup>-1</sup>	Тип счетчиков	Год запуска
[6]	Москва,	9	± 1,5	63×63	600	Сцинт.	1995

	(2 м в.э.)						
[7]	Япония, Норикура	16	$\pm 7$	21 × 21	1200	Проп. камеры	1997
[8]	Индия, Ооту	16 × 35	$\pm 8$	15 × 15	53000	Проп. камеры	1999





Подписи под рисунками

**Рис. 1.** Поведение параметра  $W$  (условн. ед.) в дни, предшествующие фобуш-эффекту: (а – г) – с 16 по 19 августа; г – день регистрации ФЭ (19.08.1999 г). Ось  $x$  – суточное время (LT).

**Рис. 2.** Изменения амплитуды  $S_{xx}(f)$  значений ПСМ для временных рядов по направлению на Солнце, в дни предшествовавшие ФЭ 15.07.2000 г.: а – 11:30-14:30 14.07; в – 10:30-13:30 15.07; с – 13:30-16:30 15.07; d – 11:30-14:30 15.07 (фоновое направление в день регистрации ФЭ). Значения  $S_{xx}(f)$  – в относит. ед. Ось X – периоды колебаний (мин.)

**Рис. 3.** Пример пространственного распределения (по матрице 28×28 ячеек) спектральных амплитуд  $S_{xx}(f_0)$  модуляций КЛ по направлению на КВВ (фиксированная частота  $f_0 = 0,15 \text{ мин}^{-1}$ ) для 18.08.1999 г. – за сутки до прихода фронта ФЭ. Цветом (условн. ед. от 1 до 4) указан диапазон изменения амплитуд.

### **Space Weather prediction with ground level muon hodoscope-tomography**

**V.V.Borog, O.V. Belonosova, T.A.Orlova**

A method of early identification of the solar weather disturbances (coronal mass ejections CME) with the aid of a wide-aperture muon hodoscope with a high angular resolution is discussed, and some examples are presented. Stable anomalous variations of cosmic rays are observed in the Sun-Earth direction 1-4 days before the arrival of a disturbance front at the Earth's orbit.

место работы авторов Борог В.В., Белоносова О.В., Орлова Т.А. –  
Московский инженерно-физический институт ( государственственный университет)

**адрес**

Москва, 115409, Каширское шоссе, д. 31

**контакт**

Борог Владимир Викторович

тел. 323-92-57 раб. 465-17-51 дом.

e-mail: borog@nevod.mephi.ru