

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В.Л. Янчуковский, В.С. Кузьменко, Е.Н. Анцыз

### RESULTS OF COSMIC RAY MONITORING WITH A MULTICHANNEL COMPLEX

V.L. Yanchukovsky, V.S. Kuzmenko, E.N. Antsyz

Приводится метод мониторинга геофизических параметров (атмосферных и магнитосферных) с помощью космических лучей (КЛ). В основу метода положен принцип многоканальной синхронной регистрации всех вторичных компонент КЛ в области энергий от единиц до 200 ГэВ. Геофизические параметры находятся из решения системы уравнений вариаций КЛ. Рассмотрены результаты мониторинга космических лучей многоканальным наблюдательным комплексом за период с января 2004 г.

This paper presents a method for monitoring geophysical parameters (atmospheric and magnetospheric) using cosmic rays (CR). This method rests on the principle of synchronous multichannel recording of all secondary CR components in the energy region from units to 200 GeV. The geophysical parameters can be estimated from the system of CR variation equations. We have analyzed results of CR monitoring over the period from January 2004, using the multichannel observation complex.

#### Введение

При разработке методов мониторинга в обеспечении прогнозов явлений в атмосфере и околосемном космосе (космическая погода) большое значение имеют исследования вариаций космических лучей (КЛ) галактического и солнечного происхождения, так как они реагируют на процессы в космическом пространстве, в магнитосфере и атмосфере Земли. Эта реакция обусловлена взаимодействием КЛ с магнитными полями и веществом, наполняющим пространство. Указанные процессы взаимодействия приводят к изменениям интенсивности, энергетического спектра, ядерного состава и пространственного распределения КЛ.

Геофизические эффекты космических лучей, в основном, обусловлены процессами в магнитосфере и атмосфере Земли. Вклад этих эффектов для регистрируемых на уровне моря космических лучей различных энергий не одинаков. Многоканальный наблюдательный комплекс КЛ в Новосибирске обеспечивает получение информации о вариациях интенсивности КЛ в области энергий от 3 до 200 ГэВ с различными азимутальными направлениями под различными углами к зениту.

#### Метод мониторинга геофизических параметров с помощью космических лучей

Метод основан на использовании данных многоканальных синхронных наблюдений нуклонной компоненты в различных энергетических интервалах и мюонной компоненты под различными углами к зениту в одном пункте (с помощью одной установки).

Вариации интенсивности, регистрируемой каналом  $k$  установки в пункте  $c$  на уровне  $h_0$  атмосферы, связаны с первичным спектром КЛ  $D(R)$ , жесткостью геомагнитного обрезания  $R_c$ , температурой  $T$  атмосферы и атмосферным давлением  $h$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_k}{I_{k_c}}(h_0, t) = & \int_{R_c}^{\infty} \frac{\Delta D}{D}(R, t) W_k(R, h_0) dR - \\ & - \Delta R_c(t) W_k(\bar{R}_c, h_0) + \left\{ \exp \left[ - \int_{h_0}^h \beta_k(h) dh \right] - 1 \right\} + \\ & + \int_0^h w_k(T_0, h_0, h) \Delta T(h, t) dh, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $W_k(R, h_0)$  – функция энергетической чувствительности канала  $k$ , или коэффициент связи согласно определению [Дорман, 1975];  $\beta_k(h)$  – барометрический коэффициент канала  $k$ ;  $w(T_0, h_0, h)$  – функция плотности температурных коэффициентов, отражающая вклад слоев атмосферы в создание интегрального температурного эффекта интенсивности;  $\Delta T(h)$  – временные вариации температуры атмосферы в зависимости от высоты. Интегральный (от всей атмосферы) температурный эффект интенсивности мюонов, регистрируемых установкой на уровне  $h_0$  атмосферы, представлен [Дорман, 1972] выражением

$$\frac{\Delta I}{I}(T) = \int_0^h w(T_0, h_0, h) \Delta T(h) dh = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta T_i. \quad (2)$$

Интеграл можно заменить суммой, где  $\alpha_i$  – доля температурного коэффициента, определяемая интегрированием  $w(T_0, h_0, h)$  по слою  $i$  атмосферы;  $\Delta T_i$  – изменения температуры слоя  $i$  атмосферы относительно среднего (опорного) значения. Интеграл (2) допускает применение теоремы о среднем, тогда

$$\frac{\Delta I}{I}(T) = \overline{w(T_0, h_0, h)} \int_0^h \Delta T(h) dh \text{ или}$$

$$\frac{\Delta I}{I}(T) = \alpha_{cm} \Delta T_{cm}, \text{ а } \Delta T_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}.$$

Таким образом, интегральный температурный эффект интенсивности мюонов может быть представлен как эффект среднемассовой температуры атмосферы.

Вариации, обусловленные изменениями атмосферного давления

$$\frac{\Delta I}{I}(h) = \left\{ \exp \left[ - \int_{h_0}^h \beta_k(h) dh \right] - 1 \right\},$$

на основании результатов работы [Yanchukovsky et al., 1997] можно представить как

$$\frac{\Delta I}{I}(h) = P(h, R)[1 - rF(k)], \quad (3)$$

где  $P(h, R)$  – функция, учитывающая зависимость величины барометрического эффекта как от атмосферного давления, так и от характеристик регистрируемого излучения,  $r=0/3086$ ,  $F(k)$  – соотношение энергетических порогов каналов  $k$  и  $k=1$  [Yanchukovsky et al., 1997]. В грубом приближении можно использовать постоянные барометрические коэффициенты для каналов комплекса, тогда составляющая вариаций интенсивности за счет атмосферного давления имеет вид

$$\frac{\Delta I}{I}(h) = \left\{ \exp \left[ -\beta_k(h - h_0) \right] - 1 \right\}.$$

Вариации интенсивности первичного потока КЛ в выражении (1) представим в виде степенного ряда

$$\frac{\Delta D}{D}(R, t) = B_1(t)R^{-1} + B_2(t)R^{-2} + B_3(t)R^{-3} \dots \quad (4)$$

Это позволяет перейти от системы уравнений (1) к системе линейных уравнений вида

$$J_k(t) = A_{1k}B_1(t) + A_{2k}B_2(t) + A_{3k}B_3(t) - V_k\Delta R_c(t) + P(t, h, R)[1 - rF_k] + \alpha_k T(t), \quad (5)$$

где  $\frac{\Delta I_k}{I_{k_c}}(h_0, t) = J_k(t)$ ;  $A_{1k} = \int_{R_c}^{\infty} R^{-1}W_k(R, h_0) dR$ ;

$$A_{2k} = \int_{R_c}^{\infty} R^{-2}W_k(R, h_0) dR; \quad A_{3k} = \int_{R_c}^{\infty} R^{-3}W_k(R, h_0) dR;$$

$$W_k(R_c, h_0) = V_k; \quad \Delta T_c(t) = T(t).$$

Неизвестные  $B_1, 2, 3$ ,  $\Delta R_c(t)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  находились из решения системы уравнений (5) методом наименьших квадратов с использованием метода регуляризации по Тихонову [Калиткин, 1978].

## Результаты

Были привлечены данные непрерывных наблюдений КЛ с помощью многоканального комплекса в Новосибирске за 2004–2010 гг. Поскольку измерения в каналах наблюдательного комплекса неравноточные, то для приведения системы уравнений (1) к системе равновесных уравнений шаг и кратность сглаживания выбирались на основании распределения статистических весов каналов измерений. Полученные из решения системы уравнений (5) результаты для всего периода наблюдений 2004–2010 гг. показаны на рис. 1. Нижними двумя кривыми на рисунке показаны исходные данные – вариации интенсивности общей ионизующей и нейтронной компоненты КЛ, наблюдаемые на уровне моря. Следующие (выше) две кривые на рисунке отражают вариации интенсивности общей ионизующей и нейтронной

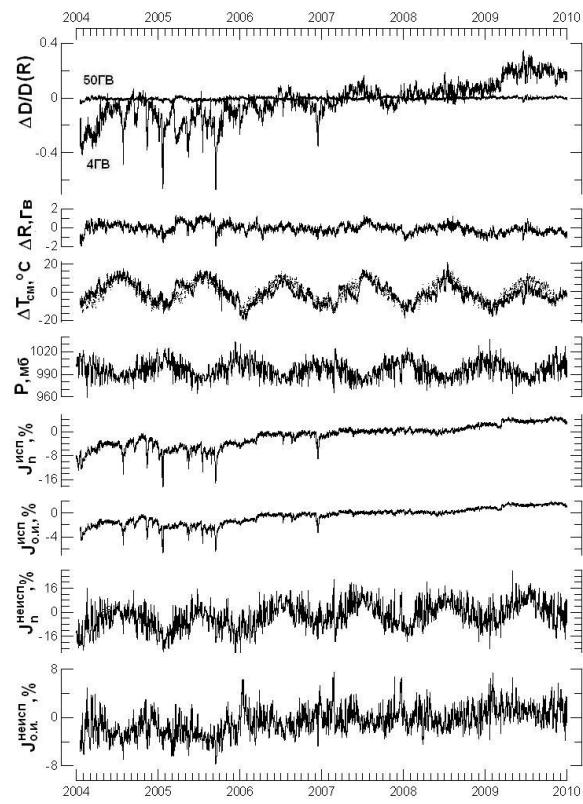


Рис. 1. Мониторинг геофизических параметров с помощью космических лучей за 2004–2010 гг. на станции Новосибирск.

компоненты КЛ, освобожденные от вариаций атмосферного происхождения без привлечения метеорологических данных. Далее (пятая кривая снизу) изображены изменения атмосферного давления. Шестая (снизу) кривая – изменения среднемассовой температуры атмосферы, найденные в данных о вариациях интенсивности КЛ; точками здесь указаны результаты прямых измерений (данные аэрологического зондирования). Седьмой кривой снизу показаны изменения жесткости геомагнитного обрезания  $\Delta R_c(t)$ . Верхние кривые отражают вариации интенсивности первичного потока КЛ  $\Delta D/D(R, t)$  для частиц с жесткостью (4 и 50 ГВ) за пределами атмосферы и магнитосферы.

## Заключение

Таким образом, многоканальные наблюдения КЛ, с одной стороны, обеспечивают получение информации о вариациях потока первичного излучения в различных областях энергий, а с другой – дают возможность проводить мониторинг геофизических параметров в реальном времени.

Приведенные результаты за длительный период (2004–2010 гг.) получены путем анализа только изотропной составляющей вариаций интенсивности КЛ в одном пункте, представленной выражением (1). Данные матричного телескопа на всем временном интервале проинтегрированы по азимутальному углу. Для исследования анизотропии КЛ необходимо учитывать направленные свойства используемых детекторов КЛ. Получать информацию о вариациях

углового и энергетического распределения первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли позволяет метод спектрографической глобальной съемки (СГС), разработанный в ИСЗФ СО РАН [Дворников и др. 2001; 2003; 2005]; в его рамках мировая сеть станций КЛ, распределенных по земному шару, рассматривается как единый прибор. Нейтронные мониторы мировой сети, данные которых используются при СГС, позволяют регистрировать энергию от единиц до нескольких десятков ГэВ. Привлечение данных новосибирского комплекса расширит энергетический диапазон до нескольких сотен ГэВ, увеличит наблюдательную базу наземных измерений КЛ и повысит достоверность результатов метода СГС.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН: проект 8.2 «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям» в рамках программы № 8 «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика» и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-12022-офи-м).

## *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Природа вариаций жесткостного спектра космических лучей в периоды солнечно-гелиосферных спорадических явлений // Известия РАН. Сер. Физическая. 2001. Т. 65, № 3. С. 343–346.

Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Вариации параметров жесткостного спектра космических лучей в период GLE 29 сентября 1989 г. // Известия РАН. Сер. Физическая. 2003. Т. 67, № 4. С. 459–461.

Дворников В.М., Кравцова М.В., Луковникова А.А. и др. Вариации жесткостного спектра космических лучей в периоды солнечных протонных событий // Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности. Всероссийская конференция. Троицк Московской обл. ИЗМИРАН. 2005. С. 20.

Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.

Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 211 с.

Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

Yanchukovsky V.L., Philimonov G.J. Barometric Effect of Cosmic Rays as a Function of several Variables // Proc. 25<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference. Durban. 1997. V. 2. P. 445–448.

*Геофизическая служба СО РАН, Новосибирск*