

УДК 523.165

**ПРИЕМНЫЕ ВЕКТОРЫ КОМПЛЕКСА МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ СТАНЦИИ «ЯКУТСК»**

**М.Э. Дьячковский, В.Г. Григорьев, П.А. Кривошапкин**

**RECEIVING VECTORS OF MUON TELESCOPES AT THE YAKUTSK STATION**

**M.E. Dyachkovsky, V.G. Grigoryev, P.A. Krivoshapkin**

Явления космической погоды, возникающие под действием солнечной активности, накладывают свой отпечаток на многие земные явления: атмосферные процессы и климат, океан, сейсмическую активность, электромагнитную обстановку, включая грозовую активность и биосферу в целом. Поэтому исследование возмущений, распространяющихся в солнечном ветре, их диагностика, прогнозирование, классификация, выработка «стандартных» моделей обусловлены не только теоретическим интересом, но и практическими потребностями. В данной работе проведены расчеты приемных векторов мюонных телескопов, которые позволяют учитывать диаграмму направленности прибора, энергетический спектр первичного излучения, а также влияние на космические лучи магнитного поля и атмосферы Земли.

Phenomena of space weather caused by the action of solar activity influence many terrestrial phenomena: atmospheric processes and climate, ocean, seismic activity, electromagnetic environment, including thunderstorm activity and the biosphere on the whole. Hence, the study of disturbances, propagating in the solar wind, their diagnostics, prediction, and classification are caused not only by a theoretical interest, but also by practical needs. In this paper, the receiving vectors for muon telescopes have been calculated which allow us to take into account the direction diagram, energy spectrum of primary emission as well as the influence of the Earth's magnetic field and atmosphere on cosmic rays.

**Введение**

На станции «Якутск» создается новый наземно-подземный комплекс мюонных телескопов по регистрации галактических космических лучей на уровнях 0, 7, 20 и 40 м водного эквивалента (м.в.э.). Телескопы собирают информацию по мюонной компоненте космических лучей с пяти направлений: вертикального и под зенитными углами 30° и 60° к северу и югу. В данной работе проведены расчеты приемных векторов мюонных телескопов, которые позволяют учитывать коэффициенты связи, диаграмму направленности прибора, энергетический спектр первичного излучения, а также влияние на космические лучи магнитного поля и атмосферы Земли. Использование приемных векторов позволяет рассчитать в распределении мюонной компоненты космических лучей, кроме изотропной составляющей, первые две сферические гармоники [1].

**Коэффициенты связи**

Для расчета приемных векторов важно знать коэффициенты связи между вторичными и первичными потоками частиц космических лучей. Коэффициенты связи характеризуют относительную чувствительность данного детектора к первичным космическим лучам. Расчеты коэффициентов связи для нового наземно-подземного комплекса мюонных телескопов по регистрации галактических космических лучей были выполнены в работе [2]. На рис. 1 приведены коэффициенты связи для Якутского комплекса мюонных телескопов.

**Диаграмма направленности**

Расчет векторов для реальных приборов требует также знания диаграммы направленности прибора, так как он ориентирован в определенную область неба. В диаграмме направленности находят отражение как геометрические особенности прибора, так и зенитно-угловая зависимость падающей на прибор радиации. Диаграмма направленности прибора – это его чувствительность к различным углам прихода частиц. На рис. 2 приведены примеры зенитной и азимутальной диаграмм направленности для вертикального телескопа.

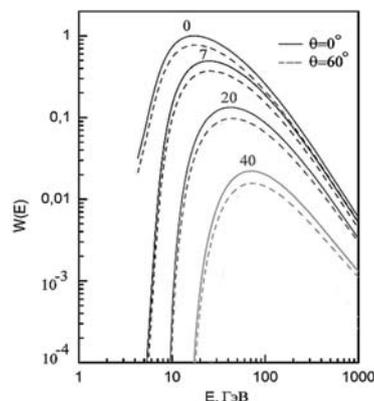


Рис. 1. Нормированные коэффициенты связи  $W(\epsilon)$  для Якутского комплекса мюонных телескопов в зависимости от энергии частиц  $\epsilon$  для двух зенитных углов  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 60^\circ$  и четырех уровней наблюдения. Цифры над кривыми соответствуют экрану над прибором в м.в.э.

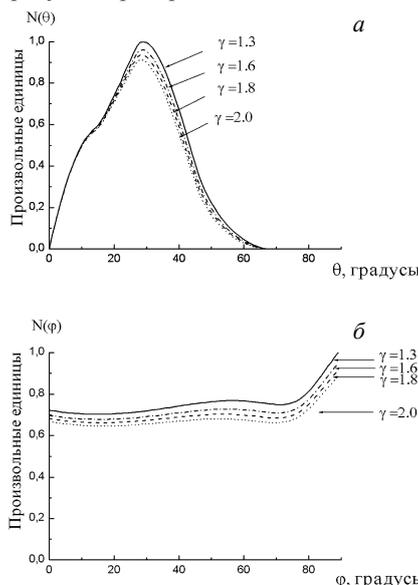


Рис. 2. Зенитная (а) и азимутальная (б) диаграммы направленности вертикального телескопа на поверхности земли ( $\gamma = 1.3$ ) и под землей на глубинах 7 ( $\gamma = 1.6$ ), 20 ( $\gamma = 1.8$ ) и 40 ( $\gamma = 2.0$ ) м.в.э. соответственно;  $\gamma$  – показатель степени углового распределения, зависящий от глубины регистрации под землей, изменяется в пределах от 1 до 2.

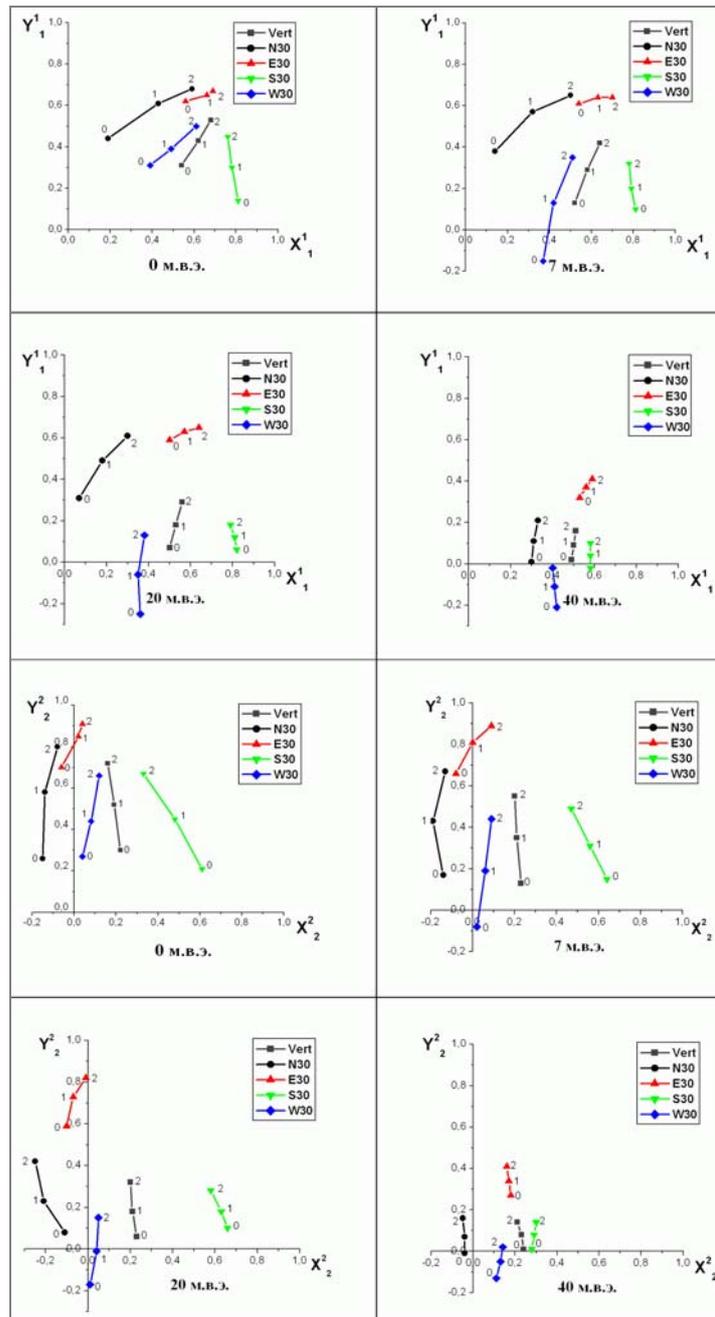


Рис. 3. Компоненты приемных векторов для первой  $(X_1^1, Y_1^1)$  и второй  $(X_2^2, Y_2^2)$  гармоник распределения космических лучей на поверхности земли и под землей на уровнях 7, 20 и 40 м.в.э.

### Траектории космических лучей

В последнее время для станции «Якутск» методом численного интегрирования были более детально рассчитаны асимптотические углы прихода частиц космических лучей с разрешением  $8^\circ$  по зениту (от 0 до  $80^\circ$ ) и  $10^\circ$  по азимуту (от 0 до  $360^\circ$ ). Для расчетов были использованы коэффициенты разложения магнитного поля Земли, представленные 10 гармониками по модели Цыганенко для эпохи 2000 г.

### Расчет приемных векторов

Исходя из всего вышеизложенного, в данной работе рассчитаны приемные векторы комплекса мюонных телескопов. Для расчета приемных векторов была использована следующая формула [3]:

$$Z_n^m = \frac{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} W(\varepsilon) f_n N(\theta, \varphi) \sin \varphi e^{im\psi} P_n^m(\sin \Phi) d\varepsilon d\theta d\varphi}{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} W(\varepsilon) f_n(\varepsilon) N(\theta, \varphi) \sin \varphi d\varepsilon d\theta d\varphi},$$

где  $W(\varepsilon)$  – коэффициент связи;  $f_n(\varepsilon)$  – энергетический спектр  $n$ -й сферической гармоники;  $N(\theta, \varphi)$  – диаграммы направленности детектора;  $\theta, \varphi$  – зенитный и азимутальный углы;  $\varepsilon$  – энергия;  $P_n^m(\sin \Phi)$  – нормированные присоединенные полиномы Лежандра;  $\Phi, \Psi$  – асимптотические углы прихода частиц космических лучей.

При расчете компонент приемных векторов для первых двух сферических гармоник распределения космических лучей использовались [3] спектры вида

$$f_1(\varepsilon) = \varepsilon^{-\gamma} \text{ для первой гармоники,}$$

$$f_2(\varepsilon) = \begin{cases} 0, & \text{если } \varepsilon < 70 \text{ ГэВ,} \\ \varepsilon^{-\gamma}, & \text{если } \varepsilon > 70 \text{ ГэВ,} \end{cases} \text{ для второй гар-}$$

моники.

Показатель спектра  $\gamma$  принимает значения 0, 1 и 2.

Результаты расчета компонент приемных векторов для комплекса мюонных телескопов в направлении вертикали и  $30^\circ$  и их графическое отображение приведены на рис. 3, где цифры возле кривых указывают показатель спектра  $\gamma$ .

### Заключение

В результате проведенных расчетов получены компоненты приемных векторов для первых двух угловых моментов функции распределения галактических космических лучей, наблюдаемых по мюонной компоненте.

Использование этих векторов позволяет при проведении научного исследования учитывать влияние на наблюдаемую мюонную компоненту космических лучей магнитного поля Земли, энергетического спектра вариаций, атмосферы и геометрии прибора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 221 с.
2. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Григорьев В.Г. Расчет коэффициентов связи для наземных и подземных мюонных телескопов // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69. С. 911–913.
3. Кривошапкин П.А. Вторая сферическая гармоника в распределении космических лучей: Кандидатская диссертация. М.: НИИЯФ МГУ, 1976. 216 с.

*Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск*