

УДК 551.521.64; 524.1:550.385

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ МЮОНОВ В АТМОСФЕРЕ И ВЫСОТНЫЙ ХОД ТЕМПЕРАТУРЫ**

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

**THE DENSITY DISTRIBUTION OF THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF MUONS INTENSITY IN THE ATMOSPHERE AND ALTITUDINAL TEMPERATURE VARIATION**

*V. S. Kuzmenko, V. L. Yanchukovskiy, E. N. Antsyz*

*Работа выполнена при финансовой 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».*

*Найдено распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере. Исходя из температурной вариации интенсивности мюонов космических лучей, делается оценка температуры различных слоев атмосферы.*

*The density distribution of the temperature coefficients of the muons intensity in the atmosphere has been found. The estimation of the temperature of different layers of the atmosphere is provided on the basis of a temperature variation in the muons intensity.*

**Ключевые слова:** космические лучи, мюоны, интенсивность, температура, атмосфера.

**Keywords:** cosmic rays, muons, intensity, temperature, atmosphere.

Известно [2], что наблюдаемые вариации интенсивности мюонов космических лучей (КЛ) в атмосфере являются суперпозицией эффектов различной природы. Они обусловлены изменениями условий, как в межпланетном пространстве, так и в атмосфере Земли (давление, температура, перераспределение масс). Вариации интенсивности мюонов, регистрируемых на уровне  $h_0$  атмосферы в пункте с порогом геомагнитного обрезания  $R_c$  обычно [2] представляют в виде выражения

$$\begin{aligned} \frac{\Delta J_m}{J_m}(h_0) = & \left\{ \exp \left[ - \int_{h_0}^h \beta_m(h) dh \right] - 1 \right\} + \\ & + \int_0^h w_t(T_0, h_0, h) \Delta T(h) dh + \\ & + \int_{R_c}^{\infty} \frac{\Delta D}{D}(R) W(R, h_0) dR \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\beta_m(h)$  – барометрический коэффициент интенсивности мюонов,  $w_t(T_0, h_0, h)$  – функция плотности температурных коэффициентов, отражающая вклад слоев атмосферы в создании интегрального температурного эффекта интенсивности;  $\Delta T(h)$  – временные вариации температуры атмосферы в зависимости от высоты,  $\frac{\Delta D}{D}(R)$  и  $W(R, h_0)$  – спектр вариаций первичного потока и коэффициенты связи для мюонной компоненты КЛ соответственно. При этом предполагается, что барометрические коэффициенты и плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов КЛ известны. Теоретически рассчитанные значения плотности температурных коэффициентов были получены ранее [3, 4] для наземных мюонных телескопов с экранами, имеющими порог  $\Delta \varepsilon \leq 0,4$  ГэВ, и для подземных мюонных телескопов с  $\Delta \varepsilon \geq 1,6$  ГэВ. Совершенно очевидно, что для корректного учета метеорологических эффектов интенсивности мюонов следует использовать значения этих параметров, найденные экспериментально.

### Оценка метеорологических коэффициентов интенсивности мюонов

Вариации интенсивности мюонов КЛ (1) в то же время можно представить в рамках линейного приближения в виде многофакторного уравнения регрессии, в котором барометрический, температурный эффект и эффект от первичной вариации КЛ выражены через факторы  $x_1, x_2, x_3, x_4$ :

$$Y = A_0 + \sum_{j=1}^4 A_j \cdot X_j + \varepsilon. \quad (2)$$

Результативный фактор  $y$  – вариации интенсивности мюонов  $\frac{J_{mi} - \overline{J}_m}{\overline{J}_m} \cdot 100 = \delta J_{mi}$ ,

фактор  $x_1$  – изменения атмосферного давления  $h_i - h_0 = \Delta h_i$ ,

фактор  $x_2$  – изменения температуры слоя переменной массы (приземного слоя)

$$(\overline{T}_{ni} - \overline{T}_n) \cdot (P_i - 950) = \Delta t_i (P_i - 950),$$

фактор  $x_3$  – изменения среднemasсовой температуры атмосферы  $T_{cmi} - \overline{T}_{cm} = \Delta T_{cmi}$ ,

фактор  $x_4$  – изменения интенсивности нейтронной компоненты, обусловленные изменениями спектра

первичного потока КЛ,  $\frac{N_i - \overline{N}}{\overline{N}} \cdot 100 = \delta n_i$ .

Уравнение (2) было представлено в стандартизованном масштабе, в котором  $y_i^{\hat{}} = (y_i - \overline{Y})/\sigma_Y$ ;  $x_{ji}^{\hat{}} = (x_{ji} - \overline{X}_j)/\sigma_{X_j}$  ( $i = \overline{1, n}$ ) ( $j = \overline{1, m(4)}$ ) – стандартизованные переменные, а стандартизованные коэффициенты регрессии  $\alpha_j$  находились из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} r_{YX_1} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot r_{X_1X_2} + \alpha_3 \cdot r_{X_1X_3} + \alpha_4 \cdot r_{X_1X_4} \\ r_{YX_2} = \alpha_1 \cdot r_{X_2X_1} + \alpha_2 + \alpha_3 \cdot r_{X_2X_3} + \alpha_4 \cdot r_{X_2X_4} \\ r_{YX_3} = \alpha_1 \cdot r_{X_3X_1} + \alpha_2 \cdot r_{X_3X_2} + \alpha_3 + \alpha_4 \cdot r_{X_3X_4} \\ r_{YX_4} = \alpha_1 \cdot r_{X_4X_1} + \alpha_2 \cdot r_{X_4X_2} + \alpha_3 \cdot r_{X_4X_3} + \alpha_4 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $r_{YX_j}, r_{X_jX_k}$  – коэффициенты парной линейной корреляции между переменными.

Переход от найденных стандартизованных коэффициентов  $\alpha_j$  к искомым коэффициентам многофакторной регрессии  $A_j$  осуществлялся с помощью соотношения:

$$A_j = \alpha_j \sigma_Y / \sigma_{X_j}. \quad (4)$$

Метеорологические коэффициенты интенсивности мюонов (барометрический  $A_1$ , температурный для приземного слоя  $A_2$ , температурный для среднemasсовой температуры атмосферы  $A_3$ ), полученные таким образом экспериментально, представлены таблицей для общей ионизирующей компоненты (G.I.) и мюонов под различными углами к зениту. При этом использовались результаты аэрологического зондирования и данные непрерывных наблюдений мюонной компоненты КЛ в Новосибирске за период 2004 – 2010 гг.

**Метеорологические коэффициенты интенсивности мюонов**

$A_j$	G.I.	0	30	40	50	60	67	71
$A_1, \%/мб$	-0.175	-0.143	-0.139	-0.142	-0.149	-0.169	-0.233	-0.430
$A_2, \%/оС, 10^{-2}$	-0.033	-0.042	-0.047	-0.047	-0.049	-0.050	-0.061	-0.045
$A_3, \%/^{\circ}С$	-0.222	-0.328	-0.313	-0.317	-0.384	-0.308	-0.324	-0.355
$A_4$	0.375	0.482	0.429	0.397	0.433	0.220	0.267	0.393

**Оценка плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов**

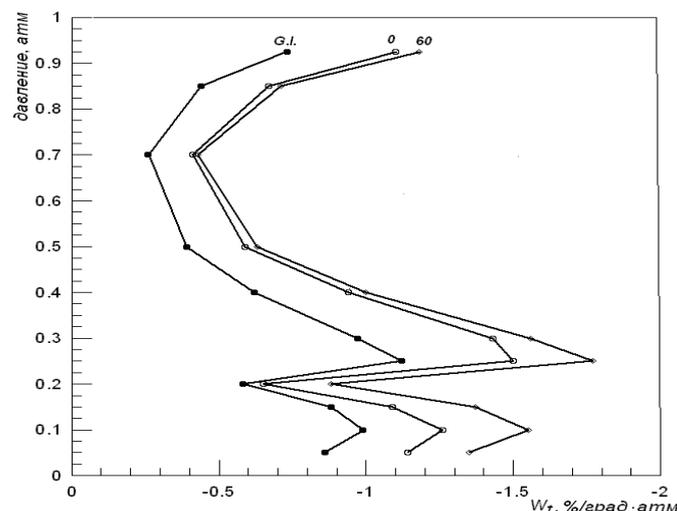
Было показано [5, с. 110 – 112], что интегральный (от всей атмосферы) температурный эффект интенсивности мюонов может быть представлен как эффект от средневзвешенной по массе температуры атмосферы

$$\Delta T_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i} \tag{5}$$

Здесь  $\Delta T_i$  и  $\Delta h_i$  – изменения температуры и масса слоя  $i$  атмосферы соответственно. Знание температурного коэффициента интенсивности мюонов от среднемассовой температуры атмосферы  $A_3$  позволяет оценить температурный эффект интенсивности мюонов от всей атмосферы (интегральный):  $[(J_i - \bar{J})/\bar{J}] \cdot 100 = A_{см} \cdot \Delta T_{см}$ . Для оценки температурных коэффициентов интенсивности на  $k$  изобарах можно также использовать многофакторное уравнение регрессии вида (2) для  $k$  факторов, в котором: результативный фактор  $y$  – вариации интенсивности  $A_{см} \cdot \Delta T_{см}$

фактор  $x_j$  – изменения температуры на изобаре  $j$   $T_{ji} - \bar{T}_j = \Delta T_{ji}$ .

Однако ввиду условности разделения атмосферы на отдельные слои очевидна сильная корреляция (не только парная) между значениями температуры на каждом слое, что подтверждают диаграммы рассеяния и расчетные значения коэффициентов парной корреляции. Таким образом, прямое разрешение регрессии не представляется возможным, а методы, такие как гребневая регрессия, дают искусственно зашумленный результат, что является необходимым условием для получения устойчивого решения. В этой связи был использован метод главных компонент [1]. Процедура выделения главных компонент подобна вращению, максимизирующему дисперсию исходного пространства переменных. Метод позволяет получить ортогональные проекции исходных температур на подпространство главных компонент. Таким образом становится возможным прямое разрешение регрессии. Полученные в подпространстве главных компонент температурные коэффициенты с помощью матрицы перехода переводятся в исходное пространство. На рисунке представлены найденные значения плотности температурных коэффициентов интенсивности  $w_i$  для общей ионизирующей компоненты и мюонной компоненты под различными углами к зениту в атмосфере.



**Рис. 1. Распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере**

Полученные результаты, с одной стороны, позволяют находить температурную составляющую вариаций интенсивности мюонов, а с другой – получать информацию о температурном режиме атмосферы.

### Мониторинг температурного режима атмосферы с помощью космических лучей

Температурная составляющая вариаций интенсивности космических лучей в выражении (1) оценивается по результатам спектрографического анализа вариаций КЛ [5]. Исходя из выделенной температурной составляющей вариаций интенсивности мюонов под различными углами к зениту и используя полученные распределения плотности температурных коэффициентов, сделана оценка изменений температуры различных слоев атмосферы за указанный период (когда число слоев не превышает число каналов регистрации мюонов).

$$\begin{aligned} \delta I_T(h_0, \theta, t) &= \\ &= \alpha_T(\theta) \Delta T_{cm}(t) = \sum_{i=1}^N k_i(\theta) \Delta T_i(t). \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь  $k_i(\theta) = w_T(h, \theta) \cdot \Delta h_i$ , а  $w_T(h, \theta)$  – функция плотности температурного коэффициента. Изменения температуры  $\Delta T_i(t)$  также находились как

$$\Delta T_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta I_{T,k}(\theta, t) / R_k(\theta), \tag{7}$$

где  $\delta I_{T,k}(\theta)$  – температурная составляющая вариации интенсивности мюонов под различными углами к зениту,  $R_k(\theta)$  – коэффициенты регрессии для пар значений  $\delta I_{T,k}(\theta)$  и  $\Delta T_i$  слоя  $i$  атмосферы,  $n$  – число каналов регистрации мюонов под зенитными углами  $\theta$ . Полученные результаты представлены на рис. 2.

Сплошными линиями на рисунке показаны вариации температуры, найденной по результатам непрерывной регистрации КЛ, точками приведены данные аэрологического зондирования. На рисунке 3 приведены высотные профили температуры атмосферы для различных сезонов года.

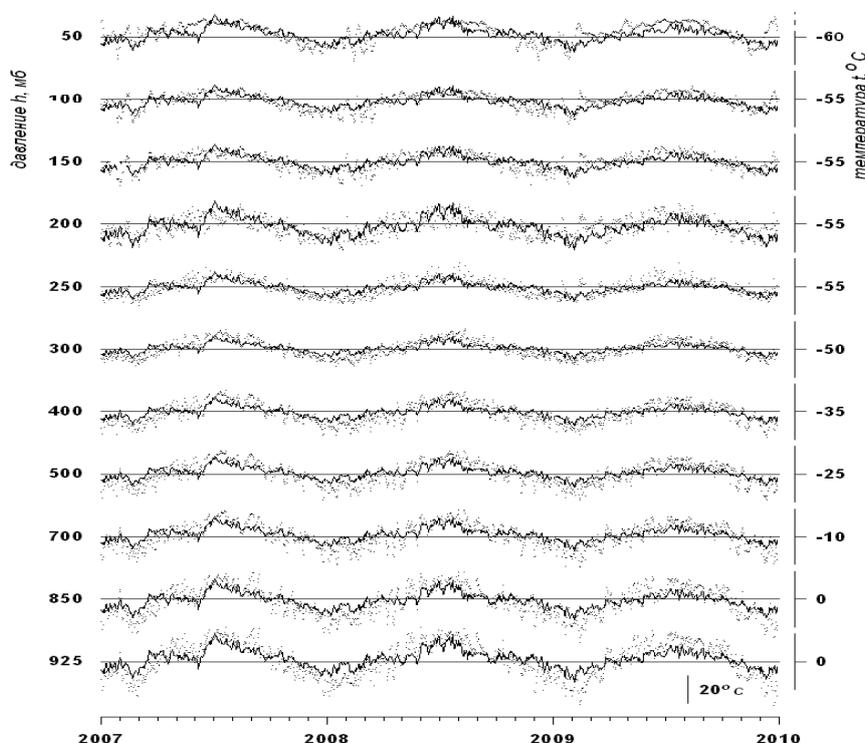


Рис. 2. Вариации температуры атмосферы на различных изобарических уровнях за период 2007 – 2010 гг.

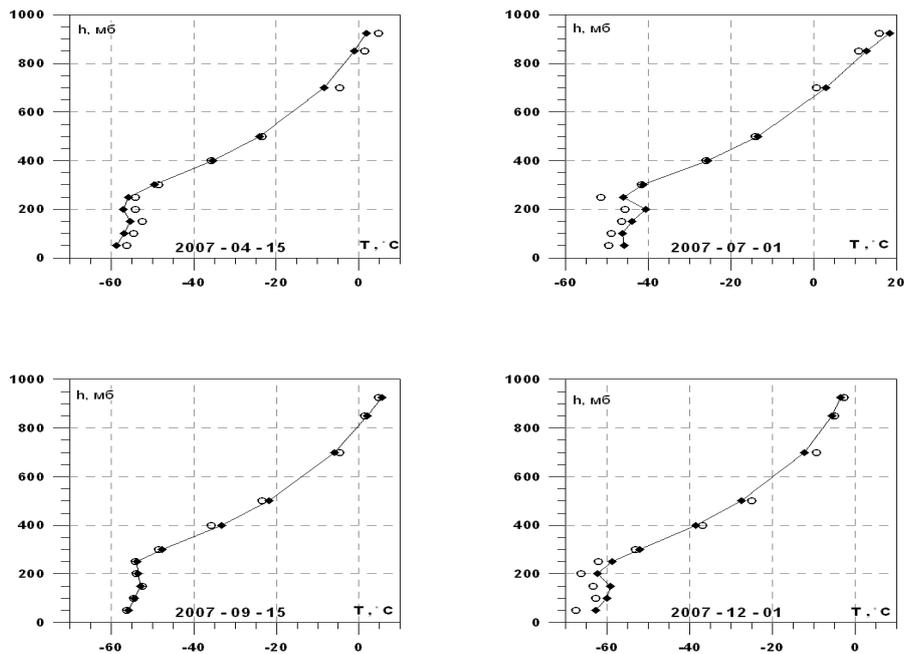


Рис. 3. Высотные профили температуры атмосферы, полученные по данным наблюдений космических лучей (квадратики) и по данным аэрологического зондирования (кружки)

### Заключение

Покомпонентная многоканальная непрерывная регистрация космических лучей, с одной стороны, обеспечивают получение информации о вариациях потока первичного излучения в различных областях энергий, а с другой позволяет проводить мониторинг температурного режима атмосферы в реальном времени.

### Литература

1. Айвазян, С. А. Классификация многомерных наблюдений / С. Айвазян, З. И. Бежаева, О. В. Староверов. – М.: Статистика, 1974. – 240 с.
2. Дорман, Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей / Л. И. Дорман. – М.: Наука, 1975. – 462 с.
3. Дорман, Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей / Л. И. Дорман. – М.: Наука, 1972. – 211 с.
4. Кузьмин, А. И. Вариации космических лучей высоких энергий / А. И. Кузьмин. – М.: Наука. 1964. – 159 с.
5. Янчуковский, В. Л. Солнечно-земная физика / В. Л. Янчуковский, В. С. Кузьменко, Е. Н. Анцыз. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2010. – Вып. 16.

### Информация об авторах:

**Кузьменко Василий Сергеевич** – младший научный сотрудник лаборатории (обсерватории) солнечно-земной физики Геофизической службы СО РАН, т. 8(383) 330-24-86, [mp3.87@mail.ru](mailto:mp3.87@mail.ru).

**Kuzmenko Vasilij Sergeevich** – junior researcher at the Laboratory (observatory) of Solar-Terrestrial Physics of Geophysical Survey of the Siberian Branch of the RAS.

**Янчуковский Валерий Леонидович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Геофизической службы СО РАН, т. 8(383) 330-24-86, [vjanch@gs.nsc.ru](mailto:vjanch@gs.nsc.ru).

**Yanchukovsky Valery Leonidovich** – Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory Geophysical Survey of the Siberian Branch of the RAS.

**Анцыз Елена Николаевна** – младший научный сотрудник лаборатории (обсерватории) солнечно-земной физики Геофизической службы СО РАН, т. 8(383) 330-24-86, [anzis@gs.nsc.ru](mailto:anzis@gs.nsc.ru).

**Antsyz Elena Nikolaevna** – junior researcher at the Laboratory (observatory) of Solar-Terrestrial Physics of Geophysical Survey of the Siberian Branch of the RAS.