

ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ МЮОНОВ И ТЕМПЕРАТУРА АТМОСФЕРЫ

MUON INTENSITY VARIATIONS AND ATMOSPHERIC TEMPERATURE

В.Л. Янчуковский

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru*

V.L. Yanchukovskiy

*A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics
SB RAS,
Novosibirsk, Russia, YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. Мюоны в атмосфере образуются при распаде пионов, возникающих в результате ядерных взаимодействий космических лучей с ядрами атомов воздуха. Образующиеся мюоны являются нестабильными частицами с малым временем жизни. Поэтому не все из них достигают уровня наблюдений в атмосфере. При изменении температуры атмосферы меняется расстояние до уровня наблюдений, что приводит к вариациям интенсивности мюонов температурного происхождения. Эти вариации, обусловленные изменениями температуры атмосферы, накладываются на данные непрерывных наблюдений мюонных телескопов. Поэтому их исключение крайне необходимо, особенно в данных современных мюонных телескопов, статистическая точность которых очень высока. Вклад различных слоев атмосферы в суммарный температурный эффект для мюонов неодинаков. Этот вклад характеризуется распределением плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере. С использованием этого распределения и данных непрерывных наблюдений интенсивности с помощью мюонного телескопа в Новосибирске, выполнена обратная задача, из решения которой найдены вариации температуры атмосферы за длительный период с 2004 по 2011 г. Полученные результаты сопоставлены с данными аэрологического зондирования.

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

Abstract. Muons in the atmosphere are formed during the decay of pions resulting from nuclear interactions of cosmic rays with nuclei of air atoms. The resulting muons are also unstable particles with a short lifetime. Therefore, not all of them reach the level of observation in the atmosphere. When the atmospheric temperature changes, the distance to the observation level changes too, thus leading to variations in the intensity of muons of temperature origin. These variations, caused by atmospheric temperature variations, are superimposed on continuous observations of muon telescopes. Their exclusion is, therefore, extremely necessary, especially in the data from modern muon telescopes whose statistical accuracy is very high. The contribution of various atmospheric layers to the total temperature effect is not the same for muons. This contribution is characterized by the distribution of the density of temperature coefficients for muons in the atmosphere. Using this distribution and the continuous intensity observations from the muon telescope in Novosibirsk, the inverse problem has been solved, from the solution of which the atmospheric temperature variations over a long period from 2004 to 2011 have been found. The results obtained are compared with aerological sounding data.

Keywords: cosmic rays, muons, temperature, atmosphere.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы продолжает расти число мюонных телескопов для наблюдения космических лучей (КЛ) [Осипенко и др., 2015]. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению с нейтронными мониторами [Янчуковский, 2010]. Однако имеется и сдерживающий фактор — наличие температурного эффекта мюонной компоненты в атмосфере. Для его корректного учета в данных непрерывных наблюдений с помощью мюонных телескопов необходимо знать распределение плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере и температурный разрез атмосферы в данный момент времени. Распределение найдено с помощью расчетов [Кузьмин, 1964; Дорман, Янке, 1971; Дмитриева и др., 2009; Кузьменко, Янчуковский, 2017], а его оценка проведена по данным непрерывных длительных наблюдений [Янчуковский, Кузьменко, 2018]. Полученные

результаты позволяют учитывать температурный эффект в данных мюонных телескопов, как это было показано в работе [Осипенко и др., 2015]. Основная трудность корректного учета температурного эффекта обусловлена качеством аэрологических данных. Аэрологическое зондирование осуществляется два раза в сутки и не в месте расположения телескопа — снос зонда доходит до сотни километров и более. Часто зонды не выполняют полных замеров, поскольку не достигают заданных высот, в результате чего имеются пропуски. Поэтому часто получаемые данные — результат интерполяции и экстраполяции. Измерения же интенсивности мюонов с помощью телескопов проводятся с высокой статистической точностью и разрешением 1 ч, в большинстве случаев 1 мин (на некоторых телескопах 1 с). В связи с этим возникает вопрос, как осуществить учет температурного эффекта в результатах наблюдений мюонных телескопов, не привлекая аэрологические данные.

**ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ
ИНТЕНСИВНОСТИ МЮОНОВ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

Вариации интенсивности различных компонент КЛ, регистрируемых каналом k на уровне h_0 атмосферы в пункте С с жесткостью геомагнитного обрезания R_c , складываются из вариаций первичного потока КЛ $\frac{\Delta D}{D}(R, t)$, вариаций интенсивности КЛ магнитосферного и атмосферного происхождения [Дорман, 1975]

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

Здесь $W_k(R, h_0)$ — коэффициент связи канала k согласно определению [Дорман, 1975]; $\beta_k(h)$ — барометрический коэффициент канала k ; $w(h_0, h)$ — функция плотности температурных коэффициентов, $\Delta T(h, t)$ — изменения температуры атмосферы во времени в зависимости от высоты. В атмосферную составляющую вариаций интенсивности входят барометрический и температурный эффекты (третий и четвертый члены выражения).

В случае, если одновременно проводятся наблюдения нескольких компонент КЛ в различных энергетических интервалах, разделение наблюдаемых вариаций на составляющие осуществляется спектрографическим методом [Дворников и др., 1979], адаптированным для случая многоканальной регистрации КЛ в одном пункте [Yanchukovsky et al., 2011]. Можно использовать и статистические методы, представив выражение (1) в виде уравнения многофакторной регрессии [Янчуковский, Кузьменко, 2018]. Таким образом, многоканальная регистрация различных компонент КЛ в одном пункте позволяет из решения системы уравнений (1) выделить и температурную составляющую вариаций интенсивности мюонов. Это было впервые показано в работе [Yanchukovsky et al., 2011]. При известной температурной

вариации интенсивности мюонов $\frac{\Delta I_k}{I_k}(T, t)$ можно решение обратной задачи — определение вариаций температуры на различных изобарах в атмосфере из решения системы уравнений

$$\frac{\Delta I_k}{I_k}(T, t) = \int_0^h w_k(h) \Delta T(h, t) dh. \quad (2)$$

Так были найдены вариации температуры на 11 изобарах за длительный период и сопоставлены с аэрологическими данными [Yanchukovsky et al., 2015]. Интеграл в выражении (2) был заменен суммой, а $w_k(h)$ задавалась таблично в виде температурных коэффициентов. Используемые температурные коэффициенты интенсивности были получены по экспериментальным данным для конкретных изобар. Следует заметить, что дальнейшее увеличение числа изобар, для которых необходимо определение вариаций температуры, будет в данном случае ограничено числом каналов регистрации мюонов.

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ
КОЭФФИЦИЕНТОВ
ДЛЯ МЮОНОВ В АТМОСФЕРЕ**

Для учета температурного эффекта в данных мюонных телескопов и при решении обратной задачи желательно использовать распределение плотности температурных коэффициентов, полученное экспериментально, поскольку оно соответствует конкретному прибору и свободно от различных приближений, характерных для теоретических методов. В работе [Янчуковский, Кузьменко, 2018] распределения плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов, регистрируемых под различными углами к зениту, были нами найдены с использованием различных методов многофакторного анализа. В табл. 1 приведены распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых без свинцового экрана (O.I.) и со свинцовым экраном под углами к зениту 0°, 30°, 40°, 50°, 60°, 67° и 71°, найденные как среднее метода PLS-2 (алгоритм KERNEL) и корреляционно-регрессионного анализа.

Таблица 1

Плотность температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере $w(h)$

h , бар	O.I.	0°	30°	40°	50°	60°	67°	71°
0.05	-0.313	-0.412	-0.415	-0.387	-0.445	-0.469	-0.703	-0.479
0.1	-0.489	-0.629	-0.632	-0.540	-0.762	-0.639	-0.879	-0.598
0.15	-0.425	-0.613	-0.613	-0.531	-0.760	-0.630	-0.726	-0.494
0.2	-0.416	-0.545	-0.546	-0.518	-0.728	-0.579	-0.671	-0.457
0.25	-0.300	-0.351	-0.332	-0.422	-0.426	-0.400	-0.619	-0.421
0.3	-0.189	-0.228	-0.251	-0.250	-0.295	-0.304	-0.319	-0.217
0.4	-0.178	-0.191	-0.203	-0.230	-0.231	-0.245	-0.180	-0.122
0.5	-0.134	-0.186	-0.191	-0.204	-0.216	-0.234	-0.108	-0.073
0.7	-0.159	-0.215	-0.205	-0.199	-0.243	-0.175	-0.102	-0.070
0.85	-0.172	-0.227	-0.239	-0.220	-0.294	-0.231	-0.139	-0.095
0.925	-0.205	-0.245	-0.272	-0.268	-0.301	-0.280	-0.184	-0.153

Здесь $w(h)$ в %/(град бар).

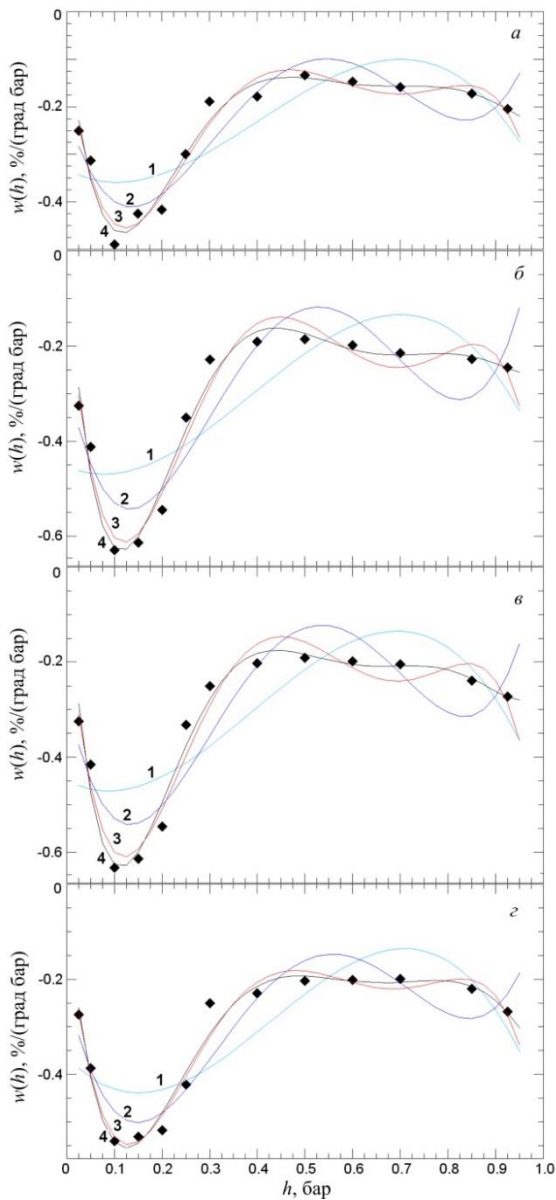


Рис. 1. Аппроксимация распределений плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых с вертикального направления (0° к зениту) без экрана (а) и с экраном из свинца, обеспечивающий энергетический порог обрезания мюонов 0.56 ГэВ (б), а также под углами к зениту 30° (в) и 40° (з). Кривая 1 — полином 3 степени, кривая 2 — полином 4 степени, кривая 3 — полином 5 степени, кривая 4 — полином 6 степени

С использованием данных табл. 1, выполнена аппроксимация распределений $w(h)$ с помощью полинома. Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов. На рис. 1. показаны полученные распределения $w(h)$ для каналов регистрации мюонов с вертикального направления (0° к зениту) без экрана (а) и с экраном в 0.56 ГэВ (б), а также под углами к зениту 30° (в) и 40° (з).

Аналогично выполнена аппроксимация распределений плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых под углами к зениту 50°, 60°, 67° и 71°. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Для всех направлений регистрации мюонов (под различными углами к зениту) распределение плот-

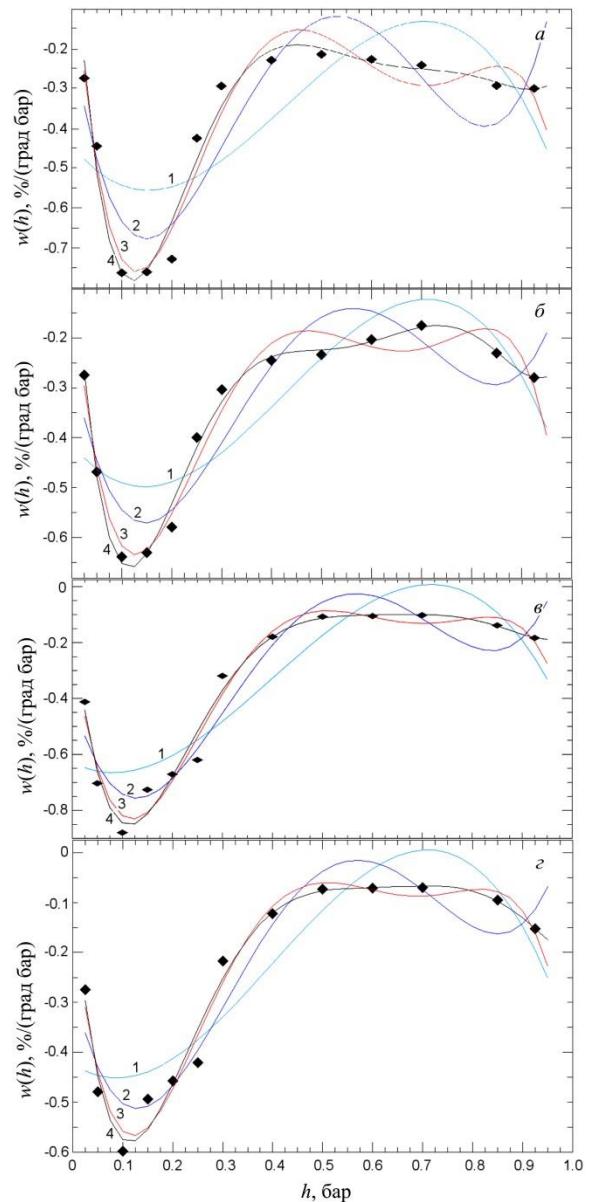


Рис. 2. Аппроксимация распределений плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых под углами к зениту 50° (а), 60° (б), 67° (в) и 71° (з). Кривая 1 — полином 3 степени, кривая 2 — полином 4 степени, кривая 3 — полином 5 степени, кривая 4 — полином 6 степени

ности температурных коэффициентов, приведенных на рис. 1, 2, наилучшим образом описывается функцией, представляющей собой полином 6 степени

$$w(h) = a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3 + a_4h^4 + a_5h^5 + a_6h^6. \quad (3)$$

Параметры функции аппроксимации, коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_6 полинома, найденные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 2.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ ПО ВЫСОТЕ

Использовались аэрологические данные с 1 января 2004 по 7 ноября 2018 г. (10849 пусков) [<https://ruc.noaa.gov/raobs>]. В табл. 3 даны средние значения тем-

Таблица 2

Параметры функции аппроксимации распределений плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых под различными углами к зениту θ

θ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
О.И.	-0.0363247	-9.256169	67.184662	-196.71242	283.05153	-199.37579	54.90318
0°	-0.0001308	-13.86269	102.53497	-304.70426	442.38944	-313.35752	86.74166
30°	0.00461710	-14.17922	106.82805	-326.53205	490.75341	-361.18261	104.0522
40°	-0.0425815	-10.35925	70.729137	-195.81495	265.18775	-173.95738	43.86181
50°	0.19893443	-20.59934	147.67809	-439.1849	648.04104	-471.58344	135.2362
60°	0.06428264	-16.01382	121.3395	-384.67404	607.13936	-470.57117	142.5278
67°	-0.0998818	-16.44955	120.34995	-350.7992	508.00637	-364.5099	103.3406
71°	-0.0627640	-11.25749	81.84462	-236.3424	337.35257	-237.10135	65.35399

Таблица 3

Средние значения температуры (в °C) атмосферы на изобарах для различных сезонов

h , бар	\bar{T} , °C					число замеров n				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
0.01	-46.25	-43.08	-38.32	-47.50	-43.79	228	886	1266	750	3130
0.02	-53.54	-51.66	-45.25	-54.70	-51.29	838	1665	1921	1497	5921
0.03	-58.47	-54.67	-48.61	-57.68	-54.86	1289	1851	2057	1805	7002
0.05	-61.95	-56.30	-50.81	-58.80	-56.96	1830	2113	2246	2113	8302
0.07	-62.45	-56.43	-51.42	-58.11	-57.10	2086	2248	2341	2255	8930
0.1	-61.73	-55.65	-50.90	-57.13	-56.35	2237	2394	2425	2346	9402
0.15	-60.86	-54.47	-49.05	-56.15	-55.13	2318	2473	2500	2428	9719
0.2	-62.15	-56.30	-50.41	-57.32	-56.54	2387	2529	2556	2482	9954
0.25	-61.29	-55.99	-49.68	-55.89	-55.71	2426	2571	2585	2526	10108
0.3	-56.47	-50.85	-42.53	-50.00	-49.96	2470	2600	2606	2569	10245
0.4	-44.27	-37.59	-27.21	-36.17	-36.31	2506	2626	2631	2595	10358
0.5	-33.59	-26.33	-15.41	-24.86	-25.05	2526	2647	2649	2614	10436
0.7	-18.65	-10.71	0.54	-9.58	-9.60	2541	2672	2699	2636	10548
0.85	-13.01	-2.58	10.31	-2.39	-1.92	2549	2684	2714	2645	10592
0.925	-12.91	1.33	15.75	0.81	1.24	2549	2684	2715	2646	10594

Здесь: зима — декабрь–февраль; весна — март–май; лето — июнь–август; осень — сентябрь–ноябрь.

пературы на различных изобарических уровнях атмосферы, найденные за весь период для различных сезонов, а также указано число используемых замеров.

Полученные по данным за этот период распределения температуры атмосферы по высоте над Новосибирском (среднегодовое и для летнего и зимнего сезонов) показаны на рис. 3.

Значения температуры атмосферы для весеннего и осеннего сезонов близки среднегодовым значениям (кривая 1). Аппроксимация среднегодового распределения температуры атмосферы показана на рис. 4.

Кривые 2–4, соответствующие полиномам 4–6 степени, практически совпадают. Распределение средних значений сезонных вариаций температуры $\Delta T(h)$ в зависимости от глубины атмосферы h показано на рис. 5.

Аппроксимация экспериментальной зависимости $\Delta T(h)$ выполнена с использованием метода наименьших квадратов. Полином 6 степени удовлетворяет наилучшим образом всем экспериментальным значениям

$$\Delta T(h) = b_0 + b_1h + b_2h^2 + b_3h^3 + b_4h^4 + b_5h^5 + b_6h^6. \quad (4)$$

Параметры функции аппроксимации, коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_6 полинома приведены в табл. 4.

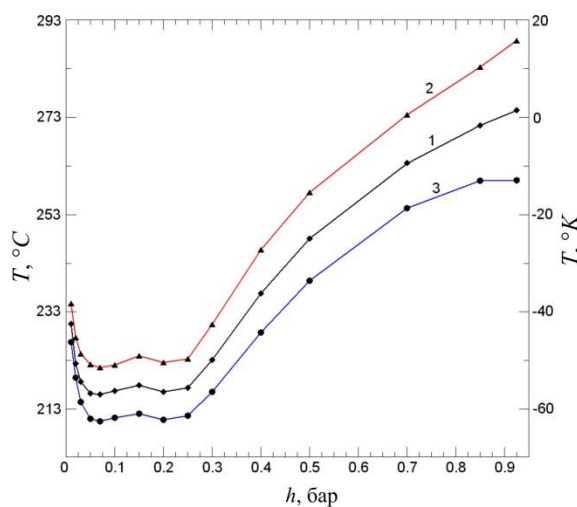


Рис. 3. Распределение температуры атмосферы по высоте: среднегодовое — кривая 1; для лета — кривая 2; для зимы — кривая 3

Таблица 4

Параметры функции аппроксимации распределения наблюдаемых вариаций (средних значений) температуры от глубины атмосферы

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
6.638635	-14.810158	65.654888	-28.445272	-129.468102	158.636595	-42.541395

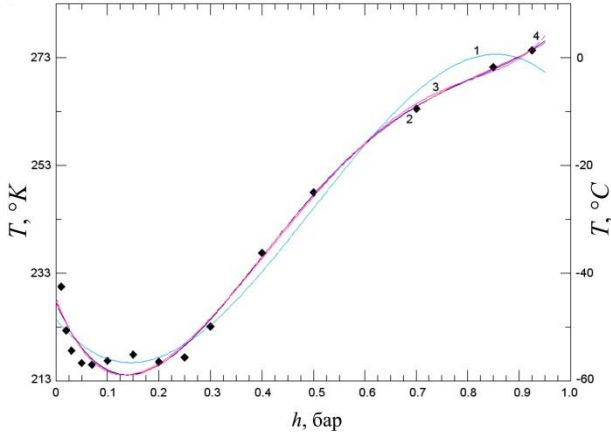


Рис. 4. Аппроксимация среднегодового распределения температуры атмосферы: полиномом 3 степени (кривая 1), полиномом 4 степени (кривая 2), полиномом 5 степени (кривая 3) и полиномом 6 степени (кривая 4)

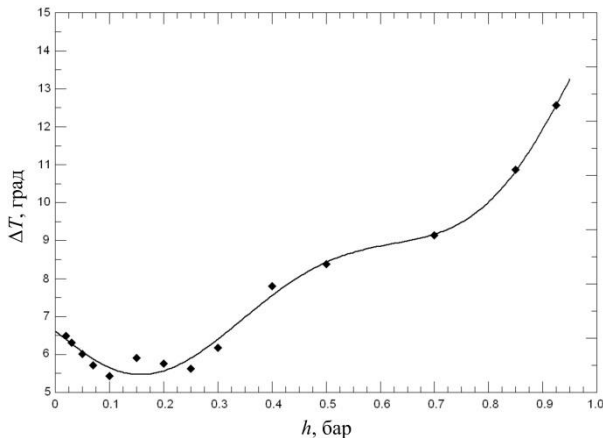


Рис. 5. Распределение вариаций температуры атмосферы с высотой: точки — экспериментальные данные; сплошная линия — аппроксимация зависимости полиномом 6 степени

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ О ВАРИАЦИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ МЮОНОВ

Используя выражение (2), зададим $w_k(h)$ и $\Delta T(h, t)$ функционально полиномами (3) и (4), произведение которых дает также многочлен. Тогда интеграл (2) преобразуется в сумму интегралов, в которых подынтегральное выражение будет представлять собой степенную функцию. В результате система из k интегральных уравнений легко преобразуется в систему из k линейных уравнений вида

$$\frac{\Delta I_k}{I_k}(T, t) = c_{0k}b_0(t) + c_{1k}b_1(t) + c_{2k}b_2(t) + c_{3k}b_3(t) + c_{4k}b_4(t) + c_{5k}b_5(t) + c_{6k}b_6(t), \quad (5)$$

где $c_{0k}, c_{1k}, \dots, c_{6k}$ — постоянные коэффициенты, характерные для канала k , которые находятся как

$$c_{0k} = a_{0k}h + \frac{1}{2}a_{1k}h^2 + \frac{1}{3}a_{2k}h^3 + \frac{1}{4}a_{3k}h^4 + \frac{1}{5}a_{4k}h^5 + \frac{1}{6}a_{5k}h^6 + \frac{1}{7}a_{6k}h^7,$$

$$c_{1k} = \frac{1}{2}a_{0k}h^2 + \frac{1}{3}a_{1k}h^3 + \frac{1}{4}a_{2k}h^4 + \frac{1}{5}a_{3k}h^5 + \frac{1}{6}a_{4k}h^6 + \frac{1}{7}a_{5k}h^7 + \frac{1}{8}a_{6k}h^8,$$

$$c_{2k} = \frac{1}{3}a_{0k}h^3 + \frac{1}{4}a_{1k}h^4 + \frac{1}{5}a_{2k}h^5 + \frac{1}{6}a_{3k}h^6 + \frac{1}{7}a_{4k}h^7 + \frac{1}{8}a_{5k}h^8 + \frac{1}{9}a_{6k}h^9,$$

$$c_{3k} = \frac{1}{4}a_{0k}h^4 + \frac{1}{5}a_{1k}h^5 + \frac{1}{6}a_{2k}h^6 + \frac{1}{7}a_{3k}h^7 + \frac{1}{8}a_{4k}h^8 + \frac{1}{9}a_{5k}h^9 + \frac{1}{10}a_{6k}h^{10},$$

$$c_{4k} = \frac{1}{5}a_{0k}h^5 + \frac{1}{6}a_{1k}h^6 + \frac{1}{7}a_{2k}h^7 + \frac{1}{8}a_{3k}h^8 + \frac{1}{9}a_{4k}h^9 + \frac{1}{10}a_{5k}h^{10} + \frac{1}{11}a_{6k}h^{11},$$

$$c_{5k} = \frac{1}{6}a_{0k}h^6 + \frac{1}{7}a_{1k}h^7 + \frac{1}{8}a_{2k}h^8 + \frac{1}{9}a_{3k}h^9 + \frac{1}{10}a_{4k}h^{10} + \frac{1}{11}a_{5k}h^{11} + \frac{1}{12}a_{6k}h^{12},$$

$$c_{6k} = \frac{1}{7}a_{0k}h^7 + \frac{1}{8}a_{1k}h^8 + \frac{1}{9}a_{2k}h^9 + \frac{1}{10}a_{3k}h^{10} + \frac{1}{11}a_{4k}h^{11} + \frac{1}{12}a_{5k}h^{12} + \frac{1}{13}a_{6k}h^{13}. \quad (6)$$

Здесь $a_{0k}, a_{1k}, \dots, a_{6k}$ — коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2, $h=0.95$ бар. Константы $c_{0k}, c_{1k}, \dots, c_{6k}$, характерные для каждого из k каналов телескопа и найденные согласно (6), приведены в табл. 5.

Высотное распределение вариаций температуры атмосферы для момента времени t описывается полиномом с коэффициентами $b_0(t), b_1(t), \dots, b_6(t)$, которые находятся из решения системы k линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (5). Для «хороших» СЛАУ, т. е. описываемых квадратной хорошо обусловленной матрицей A , единственно существует решение, которое с легкостью находится численно, например методом Гаусса. Однако при обработке экспериментальных данных матрица A либо не является квадратной (в случае несовместной, перепределенной системы), либо плохо обусловлена (погрешности коэффициентов матриц и левых частей —

Таблица 5

Параметры $c_{0k}, c_{1k}, \dots, c_{6k}$, каналов телескопа

θ	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
О.И.	-0.21181	-0.08269	-0.04933	-0.03491	-0.02703	-0.021559	-0.017915
0°	-0.273062	-0.10648	-0.063587	-0.045123	-0.034777	-0.027648	-0.022751
30°	-0.276809	-0.10887	-0.065543	-0.04667	-0.03614	-0.028973	-0.023917
40°	-0.271589	-0.108562	-0.064627	-0.045702	-0.035035	-0.028119	-0.023239
50°	-0.327214	-0.129324	-0.077364	-0.055101	-0.042372	-0.033943	-0.028067
60°	-0.2918065	-0.112311	-0.065629	-0.045944	-0.0351678	-0.028196	-0.0233705
67°	-0.286174	-0.084089	-0.042739	-0.028655	-0.021608	-0.017559	-0.014566
71°	-0.19585	-0.058676	-0.030347	-0.020796	-0.015917	-0.012999	-0.0109328

экспериментальных данных, а также погрешности округления). В результате при наличии шума СЛАУ с прямоугольной матрицей вовсе не имеют решения. Поэтому принято искать не точное решение (поскольку его просто нет), а псевдорешение. В этом случае решение СЛАУ заменяется задачей отыскания глобального (общего для всей системы) минимума функции невязки $f(x)=|Ax-b|$. Поскольку эта минимизируемая норма зависит от суммы квадратов компонент этого вектора, процедура поиска псевдорешения является реализацией процедуры метода наименьших квадратов (МНК) [Калиткин, 1978]. В результате получаем систему нормальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид

$$\begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} & a_{04} & a_{05} & a_{06} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{50} & a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{60} & a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0(t) \\ b_1(t) \\ b_2(t) \\ b_3(t) \\ b_4(t) \\ b_5(t) \\ b_6(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_0(t) \\ d_1(t) \\ d_2(t) \\ d_3(t) \\ d_4(t) \\ d_5(t) \\ d_6(t) \end{pmatrix} \quad (7)$$

или $AB(t)=D(t)$. Коэффициенты матрицы A , отражающие характеристики каналов регистрации интенсивности мюонов, находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{00} &= \sum_{k=1}^n c_{0k}^2, a_{01} = a_{10} = \sum_{k=1}^n c_{0k} c_{1k}, \\ a_{02} &= a_{20} = \sum_{k=1}^n c_{0k} c_{2k}, a_{03} = a_{30} = \sum_{k=1}^n c_{0k} c_{3k}, \\ a_{04} &= a_{40} = \sum_{k=1}^n c_{0k} c_{4k}, a_{05} = a_{50} = \sum_{k=1}^n c_{0k} c_{5k}, \\ a_{06} &= a_{60} = \sum_{k=1}^n c_{0k} c_{6k}, a_{11} = \sum_{k=1}^n c_{1k}^2, \\ a_{12} &= a_{21} = \sum_{k=1}^n c_{1k} c_{2k}, a_{13} = a_{31} = \sum_{k=1}^n c_{1k} c_{3k}, \\ a_{14} &= a_{41} = \sum_{k=1}^n c_{1k} c_{4k}, a_{15} = a_{51} = \sum_{k=1}^n c_{1k} c_{5k}, \\ a_{16} &= a_{61} = \sum_{k=1}^n c_{1k} c_{6k}, a_{22} = \sum_{k=1}^n c_{2k}^2, \\ a_{23} &= a_{32} = \sum_{k=1}^n c_{2k} c_{3k}, a_{24} = a_{42} = \sum_{k=1}^n c_{2k} c_{4k}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{25} &= a_{52} = \sum_{k=1}^n c_{2k} c_{5k}, a_{26} = a_{62} = \sum_{k=1}^n c_{2k} c_{6k}, \\ a_{33} &= \sum_{k=1}^n c_{3k}^2, a_{34} = a_{43} = \sum_{k=1}^n c_{3k} c_{4k}, \\ a_{35} &= a_{53} = \sum_{k=1}^n c_{3k} c_{5k}, a_{36} = a_{63} = \sum_{k=1}^n c_{3k} c_{6k}, \\ a_{44} &= \sum_{k=1}^n c_{4k}^2, a_{45} = a_{54} = \sum_{k=1}^n c_{4k} c_{5k}, \\ a_{46} &= a_{64} = \sum_{k=1}^n c_{4k} c_{6k}, a_{55} = \sum_{k=1}^n c_{5k}^2, \\ a_{56} &= a_{65} = \sum_{k=1}^n c_{5k} c_{6k}, a_{66} = \sum_{k=1}^n c_{6k}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Свободные члены D представляют собой

$$\begin{aligned} d_0(t) &= \sum_{k=1}^n c_{0k} J_k(t), d_1(t) = \sum_{k=1}^n c_{1k} J_k(t), \\ d_2(t) &= \sum_{k=1}^n c_{2k} J_k(t), d_3(t) = \sum_{k=1}^n c_{3k} J_k(t), \\ d_4(t) &= \sum_{k=1}^n c_{4k} J_k(t), d_5(t) = \sum_{k=1}^n c_{5k} J_k(t), \\ d_6(t) &= \sum_{k=1}^n c_{6k} J_k(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $J_k(t) = \frac{\Delta I_k}{I_k}(t)$ — наблюдаемые вариации интенсивности мюонов в каналах k .

Из решения системы уравнений (7) находим неизвестные параметры $b_0(t), b_1(t), \dots, b_6(t)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были использованы часовые данные непрерывных наблюдений интенсивности мюонов [<http://cosm-rays.ipgg.sbras.ru>] с помощью матричного мюонного телескопа [Янчуковский, 2006] в Новосибирске 2004–2011 гг. Данные интенсивности мюонов для каждого из зенитных углов были проинтегрированы по всем азимутальным направлениям. Таким образом, была получена информация о вариациях интенсивности по восьми каналам: для мюонов, регистрируемых без свинцового экрана (О.И.) и со свинцовым экраном под углами к зениту 0°, 30°, 40°, 50°, 60°, 67° и 71°. Чтобы выделить только температурную составляющую вариаций интенсивности мюонов,

исходные данные были исправлены за барометрический эффект и температурный эффект, обусловленный изменениями температуры приземного слоя (слоя переменной массы), а также были учтены вариации, вызванные изменениями потока первичных КЛ [Янчуковский, Кузьменко, 2018]. Поскольку с ростом зенитного угла статистика уменьшается, измерения в каналах будут неравноточные. Чтобы обеспечить переход к системе равновесных уравнений, данные сглаживались с помощью скользящего среднего, при котором шаг и кратность сглаживания выбирались исходя из распределения статистических весов каналов. Из решения системы уравнений (7) определялись неизвестные $b_0(t)$, $b_1(t)$, ..., $b_6(t)$. Затем находились вариации температуры на изобарах

$$\Delta T(h, t) = b_0(t) + b_1(t)h + b_2(t)h^2 + b_3(t)h^3 + b_4(t)h^4 + b_5(t)h^5 + b_6(t)h^6. \quad (10)$$

Полученные таким образом результаты показаны на рис. 6. Изменения температуры атмосферы на изобарах, найденные по данным о вариациях интенсивности мюонов, изображены сплошной линией. Точками показаны результаты прямых измерений — данные аэрологического зондирования на метеостанции Бугринская роща (Новосибирск). Метеостанция находится на расстоянии около 35–40 км от станции КЛ. Пуски зондов осуществлялись два раза в сутки. Слева указаны изобары, которым соответствуют выполненные измерения температуры, справа — средняя температура на изобаре. Масштаб изменений температуры одинаков для всех изобар и приведен сверху. В верхней части показаны вариации среднемассовой (средневзвешенной по массе) температуры атмосферы (ТСМ) за весь период

$$\Delta T_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}. \quad (11)$$

Здесь ΔT_i — изменения температуры слоя (изобары) i ; Δh_i — масса этого слоя.

Полученные результаты имеют удовлетворительное согласие с данными прямых измерений для всех сезонов. Несколько худшее согласие наблюдается для зимнего периода. Это объясняется, с одной стороны, тем, что вариации температуры на изобарах находятся как отклонения от среднегодового высотного распределения температуры, которое практически совпадает с высотным распределением средней температуры для сезонов весны и осени (что уменьшает ошибки вычислений). С другой стороны, худшее согласие результатов для зимнего периода вызвано низким качеством данных аэрологического зондирования, когда резко возрастающее число пропусков измерений оказывается статистически значимым. Приводимые же данные прямых измерений (аэрологического зондирования) в эти периоды часто представляют собой результат экстраполяции. При дальнейшем совершенствовании метода необходим более тщательный подход к формированию выборки (длительность и качество данных прямых измерений) и оценке распределения плот-

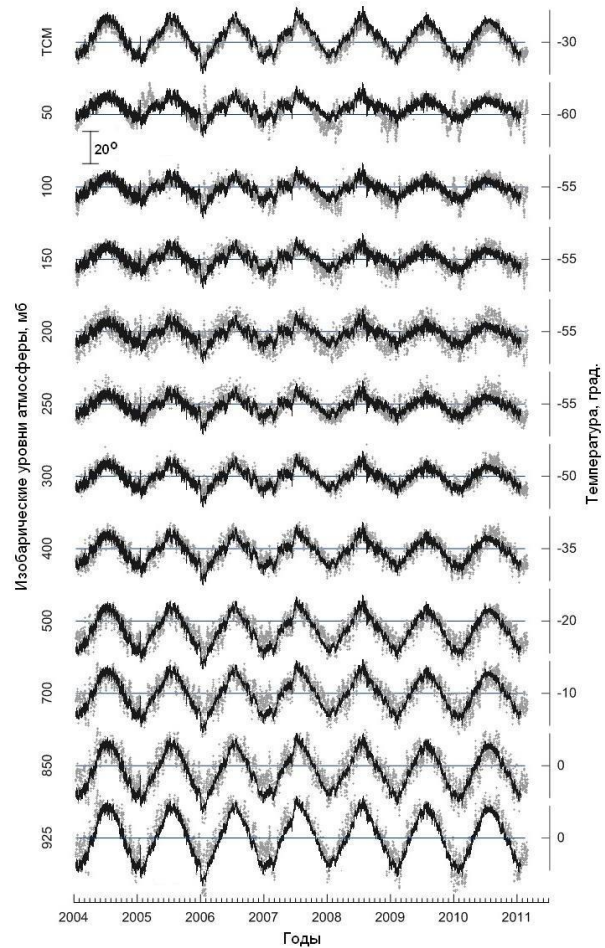


Рис. 6. Вариации температуры атмосферы на различных изобарических уровнях: сплошная линия — результат вычислений, точки — данные аэрологического зондирования

ности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере (весовой функции).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, непрерывные наблюдения вариаций интенсивности КЛ, проводимые на станциях КЛ, оснащенных мюонными телескопами, позволяют получать информацию о высотном распределении температуры атмосферы в реальном времени. При этом точность этой информации будет зависеть от числа каналов регистрации мюонов под различными углами к зениту. Для более точного описания высотного распределения температуры атмосферы следует использовать полином шестой степени, для чего требуется не менее семи направлений регистрации мюонов под различными углами к зениту. В случае наличия, предположим, только пяти каналов регистрации мюонов задача решается, но с привлечением полинома четвертой степени. Однако полученный при этом результат будет грубее.

В работе использованы экспериментальные данные УНУ-85 «Российская национальная сеть станций космических лучей».

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0013 «Проявление процессов глубинной геодинамики в геосферах Земли по результатам

мониторинга геомагнитного поля, ионосферы и космических лучей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дворников В.М., Крестьянников Ю.Я., Матюхин Ю.Г., Сергеев А.В. Информативность спектрографического метода // Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1979. Вып. 49. С. 115–123.

Дмитриева А.Н., Кокоулин Р.П., Петрухин А.А., Тимашов Д.А. Температурные коэффициенты для мюонов под различными зенитными углами // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 3. С. 371–374.

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

Дорман Л.И., Янке В.Г. К теории метеорологических эффектов космических лучей // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1971. Т. 35, № 1. С. 2556–2570.

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

Кузьменко В.С., Янчуковский В.Л. Распределение плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 4. С. 104–116. DOI: [10.12737/szf-34201710](https://doi.org/10.12737/szf-34201710).

Кузьмин А.И. Вариации космических лучей высоких энергий. М.: Наука, 1964. 125 с.

Осипенко А.С., Абунина А.А., Беркова М.Д. и др. Анализ температурного эффекта высокогорных детекторов космических лучей на основе базы данных мировой сети мюонных телескопов // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2015. Т. 79, № 5. С. 716–720. DOI: [10.7868/S0367676515050336](https://doi.org/10.7868/S0367676515050336).

Янчуковский В.Л. Телескоп космических лучей // Солнечно-земная физика. 2006. Вып. 9. С. 41–43.

Янчуковский В.Л. Многоканальный наблюдательный комплекс космических лучей // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 107–109.

Янчуковский В.Л., Кузьменко В.С. Атмосферные эффекты мюонной компоненты космических лучей // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 3. С. 95–102. DOI: [10.12737/szf-43201810](https://doi.org/10.12737/szf-43201810).

Yanchukovsky V.L., Kuz'menko V.S., Antsyz E.N. Results of cosmic ray monitoring with a multichannel complex // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51, N 7. P. 893–896.

Yanchukovsky V.L., Syunyakov S.A., Kuzmenko V.S. Variations in temperature at different isobaric levels of the atmosphere, according to data cosmic rays // Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2015. V. 79, N 5. P. 668–670. DOI: [10.3103/S1062873815050445](https://doi.org/10.3103/S1062873815050445).

URL: <https://ruc.noaa.gov/raobs> (дата обращения 20 марта 2019 г.).

URL: <http://cosm-rays.ipgg.sbras.ru> (дата обращения 20 марта 2019 г.).

REFERENCES

Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Petruhin A.A., Timashov D.A. Temperature coefficients for muons under different zenith angles. *Izvestiys RAN. Ser. fizicheskaya* [Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics]. 2009, vol. 73, no. 3, pp. 371–374. (In Russian).

Dorman L.I. *Ekspperimentalnye i teoreticheskie osnovy astrofiziki kosmicheskikh luchej* [Experimental and Theoretical Foundations of Astrophysics of Cosmic Rays]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 462 p. (In Russian).

Dorman L.I., Yanke V.G. On theory of meteorological effects of cosmic rays. *Izvestiya AN SSSR. Ser. fizicheskaya* [Bull. of the Academy of Sciences of USSR. Physics]. 1971, vol. 35, no. 12, pp. 2556–2570. (In Russian).

Dvornikov V.M., Krest'yannikov Yu.Ya, Matyukhin Yu.G., Sergeev A.V. Informativeness of the spectrographic method. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy, and Physics of the Sun]. 1979, iss. 49, pp. 115–123. (In Russian).

Kalitkin N.N. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 512 p. (In Russian).

Kuzmenko V.S., Yanchukovsky V.L. Distribution of temperature coefficient density for muons in the atmosphere. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 4, pp. 93–102. DOI: [10.12737/stp-34201710](https://doi.org/10.12737/stp-34201710).

Kuz'min A.I. *Variatsii kosmicheskikh luchej vysokikh energii* [Variations of High Energy Cosmic Rays] Moscow: Nauka Publ., 1964, 125 p. (In Russian).

Osipenko A.S., Abunina A.A., Berkova M.D., Barbashina N.S., Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., et al. Analyzing the temperature effect of high mountain cosmic ray detectors using the database of the global network of muon telescopes. *Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics.* 2015, vol. 79, no. 5, pp. 662–666. DOI: [10.3103/S1062873815050317](https://doi.org/10.3103/S1062873815050317).

Yanchukovsky V.L. *Teleskop kosmicheskikh luchej* [Cosmic ray telescope]. *Solar-Terr. Phys.* Novosibirsk: Nauka, 2006, iss. 9, pp. 41–43.

Yanchukovsky V.L. Multichannel observational complex of cosmic rays. *Solar-Terr. Phys.* 2010, iss. 16, pp. 107–109. (In Russian).

Yanchukovsky V.L., Kuz'menko V.S., Antsyz E.N. Results of cosmic ray monitoring with a multichannel complex. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011, vol. 51, no. 7, pp. 893–896.

Yanchukovsky V.L., Kuzmenko V. Atmospheric effects of the cosmic-ray mu-meson component. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 3, pp. 76–82. DOI: [10.12737/stp-43201810](https://doi.org/10.12737/stp-43201810).

Yanchukovsky V.L., Syunyakov S.A., Kuzmenko V.S. Variations in temperature at different isobaric levels of the atmosphere, according to data cosmic rays. *Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics.* 2015, vol. 79, no. 5, pp. 668–670. DOI: [10.3103/S1062873815050445](https://doi.org/10.3103/S1062873815050445).

URL: <https://ruc.noaa.gov/raobs> (accessed 20 March 2019).

URL: <http://cosm-rays.ipgg.sbras.ru> (accessed 20 March 2019).

Как цитировать эту статью

Янчуковский В.Л. Вариации интенсивности мюонов и температура атмосферы. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 1. С. 134–141. DOI: [10.12737/szf-61202013](https://doi.org/10.12737/szf-61202013).