

УДК 524.1:550.385

Повышение достоверности результата ПЛС-анализа при оценке температурного эффекта мюонов в атмосфере

В. Л. Янчуковский*, Р. З. Хисамов, М. А. Калюжная, В. С. Кузьменко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия;

e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
18.12.2026;

получена
после доработки
10.02.2026;

принята
к публикации
11.02.2026

Ключевые слова:

космические лучи,
атмосфера, мюоны,
температурный эффект,
распределение
плотности
температурных
коэффициентов

Знание функции распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере необходимо для корректного учета температурного эффекта в данных мюонных телескопов космических лучей. Распределение плотности температурных коэффициентов найдено с использованием информации, полученной в ходе непрерывных наблюдений интенсивности мюонов с помощью мюонных телескопов на поверхности и под землей на глубине 7, 20 и 40 м.в.э. в 2016–2018 гг., и измерения температуры на 17 изобарических уровнях атмосферы (по результатам аэрологического зондирования за этот же период). Анализ многомерных данных при исследовании температурного эффекта проведен с применением метода главных компонент и метода проекций на латентные структуры. Распределение плотности температурных коэффициентов найдены с учетом одной и двух главных компонент с последующим сопоставлением полученных результатов. При двух главных компонентах информативность увеличивается на ~4 % и составляет 97,4 % (основная доля вариаций исходной выборки приходится на первую главную компоненту, которая содержит 93,5 % информации), однако возрастает вероятность вклада шумов, который при одной ГК минимален. В процессе исследования показано, что при высоком уровне шума (при низком качестве исходных данных) с целью повышения достоверности конечного результата ПЛС-анализ целесообразно осуществлять при привлечении только одной главной компоненты.

Для цитирования

Янчуковский В. Л. и др. Повышение достоверности результата ПЛС-анализа при оценке температурного эффекта мюонов в атмосфере. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 134–143. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-134-143>.

Increasing the reliability of the results of PLS analysis in assessing the temperature effect of muons in the atmosphere

Valery L. Yanchukovsky*, Rashit Z. Khisamov,

Marina A. Kalyuzhnaya, Vasilii S. Kuz'menko

*A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia;

e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Article info

Received
18.12.2026;

received
in revised
10.02.2026;

accepted
11.02.2026

Key words:

cosmic rays,
atmosphere, muons,
temperature effect,
temperature coefficient
density distribution

Abstract

Knowledge of the temperature coefficient density distribution function for muons in the atmosphere is required to correctly account for the temperature effect in data from cosmic-ray muon telescopes. Temperature coefficient density distributions were found using continuous muon intensity observations obtained by muon telescopes at the surface and underground at depths of 7, 20, and 40 m.w.e. for the period from 2016 to 2018, and temperature data at 17 isobaric atmospheric levels obtained from upper-air soundings over the same period. Multivariate data analysis for the temperature effect has been conducted using principal component analysis and latent structure projection (LSP). Temperature coefficient density distributions are determined using one and two principal components, followed by a comparison of the results. With two principal components, the information content increases by ~4 % to 97.4 % (the majority of the original sample's variations are attributed to the first principal component, which contains 93.5 % of the information). However, the likelihood of noise contribution increases, while noise contribution is minimal with a single LC. The study has demonstrated that, in the presence of high noise levels (with low initial data quality), PLS analysis should be performed using only one principal component to increase the reliability of the final result.

For citation

Yanchukovsky, V. L. et al. 2026. Increasing the reliability of the results of PLS analysis in assessing the temperature effect of muons in the atmosphere. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 134–143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-134-143>.

Введение

Мюоны в атмосфере являются в основном результатом распада пионов, рожденных в ядерных взаимодействиях первичных протонов космических лучей в верхних слоях атмосферы (Мурзин и др., 1968). В области энергий, превышающих несколько сотен МэВ, мюоны являются релятивистскими и ультрарелятивистскими частицами. Потери энергии мюона на ионизацию в среднем составляют около 2 МэВ на 1 г/см² вещества, т. е. определяются количеством вещества n на его пути. Мюоны – нестабильные частицы со средним временем жизни $\tau_\mu^0 \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Более эффективно образование мюонов происходит в атмосфере на глубине с некоторой плотностью ρ . Длина пробега l_μ мюона с энергией E до распада обусловлена его временем жизни в атмосфере τ и равна

$$l_\mu = c\tau = c\tau_\mu^0 \frac{E}{mc^2}. \quad (1)$$

Предположим, частице необходимо пройти путь l до уровня ее регистрации у земной поверхности. Интенсивность мюонов на уровне регистрации будет определяться значениями параметров l , n , ρ . Изменения этих параметров вызывают временные вариации интенсивности мюонов (барометрический и температурный эффекты). В данном случае в качестве среды на пути мюона следует рассматривать атмосферу, параметры которой могут меняться во времени и вызывать вариации интенсивности мюонов. Регистрация мюонов будет наблюдаться при выполнении условия $l_\mu \geq l$. При возрастании давления количество вещества n на пути мюонов увеличивается, что приводит к возрастанию ионизационных потерь, а значит, и к уменьшению энергии E мюонов и длины пробега l_μ . Тогда для некоторой доли потока мюонов условие $l_\mu \geq l$ выполняться не будет. В то же время увеличение плотности ρ приводит к уменьшению относительной доли распада пионов с образованием мюонов. Оба фактора приводят к уменьшению регистрируемой интенсивности мюонов. И, наоборот, при уменьшении атмосферного давления происходит увеличение интенсивности мюонов (отрицательный барометрический эффект).

При изменении температуры происходит расширение или сжатие атмосферы, что приводит к изменению параметра l . Для некоторой доли потока мюонов условие $l_\mu \geq l$ не выполняется. Доля эта будет меняться с изменением l в зависимости от температуры (отрицательный температурный эффект).

Изменения давления (барометрический эффект) вызывают изменения длины пробега мюонов до распада l_μ , а изменения температуры атмосферы приводят к изменению расстояния l , которое необходимо пройти мюонам до регистрации (температурный эффект). Интегральный метод учета температурного эффекта значительно сложнее, поскольку он описывается многими параметрами, определяющими состояние атмосферы от уровня генерации до уровня регистрации мюонов. Связь интенсивности мюонов $\frac{\Delta I_k}{I_k}(T, t)$ с изменениями высотного профиля температуры атмосферы $\Delta T(h, t)$ во времени (Дорман, 1972) представим следующим образом:

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

где $w_k(h)$ – функция распределения плотности температурных коэффициентов.

Функция распределения $w_k(h)$ описывает связь интенсивности мюонов с высотным профилем температуры атмосферы и отражает интегральный температурный эффект интенсивности от всей атмосферы. Таким образом, исследование температурного эффекта сводится к определению функции распределения $w_k(h)$ (Yanchukovsky, 2023; Yanchukovsky et al., 2025), которая необходима при учете вариаций атмосферного происхождения в данных, полученных с помощью телескопов для наблюдения космических лучей (Дорман, 1975). Данные непрерывных наблюдений космических лучей высоких энергий с помощью подземного комплекса мюонных телескопов на газоразрядных и сцинтилляционных детекторах (Стародубцев и др., 2016) используются при решении задач солнечно-земной физики и астрофизики космических лучей. Это приводит к необходимости более точного знания функции распределения $w_k(h)$, которая определялась в ходе теоретических расчетов.

Значения плотности температурных коэффициентов, рассчитанные теоретически, использовать на практике сложно, поскольку все установки регистрации мюонов далеки от идентичности. Они имеют различные конструктивные особенности, экраны, апертуры углов и диаграммы направленности, различную энергетическую чувствительность (коэффициенты связи, приемные векторы). На практике для учета температурного эффекта, чтобы обойти эти трудности, были разработаны различные методы, например,

оригинальный метод скрещенных телескопов (Скритин и др., 1965). Впоследствии появились другие достаточно эффективные методы учета температурного эффекта: метод эффективного уровня генерации, метод эффективной температуры, метод среднемассовой температуры (Berkova et al., 2011.; Osipenko et al., 2015), с помощью которых возможно температурный эффект атмосферы выразить через один параметр, например, через среднемассовую температуру. Температурный коэффициент от среднемассовой температуры легко находится по экспериментальным данным для конкретной установки регистрации мюонов (Янчуковский и др., 2007; Зверев и др., 2019). Использование метода главных компонент (Айвазян и др., 1989) впервые позволило по экспериментальным данным и данным аэрологического зондирования проводить оценку функции $w_k(h)$ для конкретной экспериментальной установки. Дальнейшее повышение точности оценки функции $w_k(h)$ обеспечит возможность решения и другой задачи (обратной) – получение высотного профиля температуры атмосферы по результатам непрерывных наблюдений космических лучей (Yanchukovsky, 2020).

Исходные данные и методы анализа

В качестве исходных привлечены часовые данные непрерывной регистрации интенсивности мюонов на поверхности и под землей на глубине 7, 20 и 40 м.в.э. (Стародубцев и др., 2016) за период 2016–2018 гг.¹, а также часовые показатели температуры на 17 изобарических уровнях атмосферы за тот же период, взятые из базы данных² национальных центров экологического прогнозирования США (NCEP)³.

Анализ многомерных данных при исследовании температурного эффекта проводился с помощью метода главных компонент (МГК) (Айвазян и др., 1989; Айвазян, 2001). В качестве переменных рассматривается температура на 17 изобарических уровнях атмосферы. Так как эти переменные коррелированы между собой, в анализе были использованы методы проекций на латентные структуры (ПЛС) (Esbensen, 2002). Суть метода заключается в построении пространства из некоторого числа неявных параметров, ортогональных друг к другу, т. е. в преобразовании в новую систему координат (Esbensen, 2002). Новым началом координат является центр облака данных, который определяется путем центрирования исходных данных и называется нулевой главной компонентой (ГК). Первой ГК считается первая координата, выборочная дисперсия данных вдоль которой максимальна. Второй ГК является вторая координата, выборочная дисперсия данных вдоль которой максимальна при условии ортогональности первой координате. За k -ю ГК принимают k -ю координату, выборочная дисперсия данных вдоль которой максимальна при условии ее ортогональности к предыдущим координатам $k - 1$. Исходные данные предварительно следует представить в виде исходной матрицы переменных X размерностью $I \times J$. Затем вводятся новые переменные t_a ($a = 1, \dots, A$), представляющие собой линейную комбинацию исходных переменных x_j ($j = 1, \dots, J$):

$$t_a = p_{a1}x_1 + \dots + p_{aJ}x_J, \quad (3)$$

что позволяет преобразовать исходную матрицу X в произведение матриц T и P :

$$X = TP^t + E = \sum_{a=1}^A t_a p_a^t + E. \quad (4)$$

Матрицу T размерностью $I \times A$ называют матрицей счетов, матрицу P размерностью $J \times A$ – матрицей нагрузок, матрицу E размерностью $I \times J$ – матрицей остатков. Новые переменные t_a называются главными компонентами, а число столбцов t_a в T -матрице и число столбцов p_a в P -матрице называют числом ГК (A), которое намного меньше числа переменных J и числа образцов I . ПЛС-анализ представляет собой два МГК-анализа, осуществляемых для X и Y :

$$X = \sum_A TP^t + E, \quad Y = \sum_A UQ^t + F.$$

Здесь T и P – счета и нагрузки, составляющие X , а для Y они выражены через U и Q соответственно. ПЛС-декомпозиция проводится не в виде двух независимых операций МГК-анализа в разных пространствах, а с учетом связи пространств X и Y . При этом проекция строится так, чтобы максимизировать корреляцию между соответствующими векторами X -счетов t_a и Y -счетов u_a . Преобразование привело к значительному понижению размерности данных, а также к ортогональности новых переменных (главных компонент). Число ГК определяет грань между структурной частью, где матрица T содержит основную информацию исходной матрицы X , и шумом матрицы E .

Распределение плотности температурных коэффициентов было получено (Yanchukovsky et al., 2025) при выбранном числе главных компонент, равном 2. При $A = 2$ информативность составляет 97,4 %, причем основная доля вариаций исходной выборки приходится на первую главную компоненту, которая

¹ См.: URL.: <https://ikfia.ysn.ru/data/heclab/mt> ; URL.: <https://ikfia.ysn.ru/data/heclab/ipm>.

² URL.: <http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>.

³ URL.: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>.

содержит 93,5 % информации. При двух ГК информативность увеличивается менее, чем на 4 %, но при этом возрастает вероятность вклада шумов, который при одной ГК минимален (рис. 1).

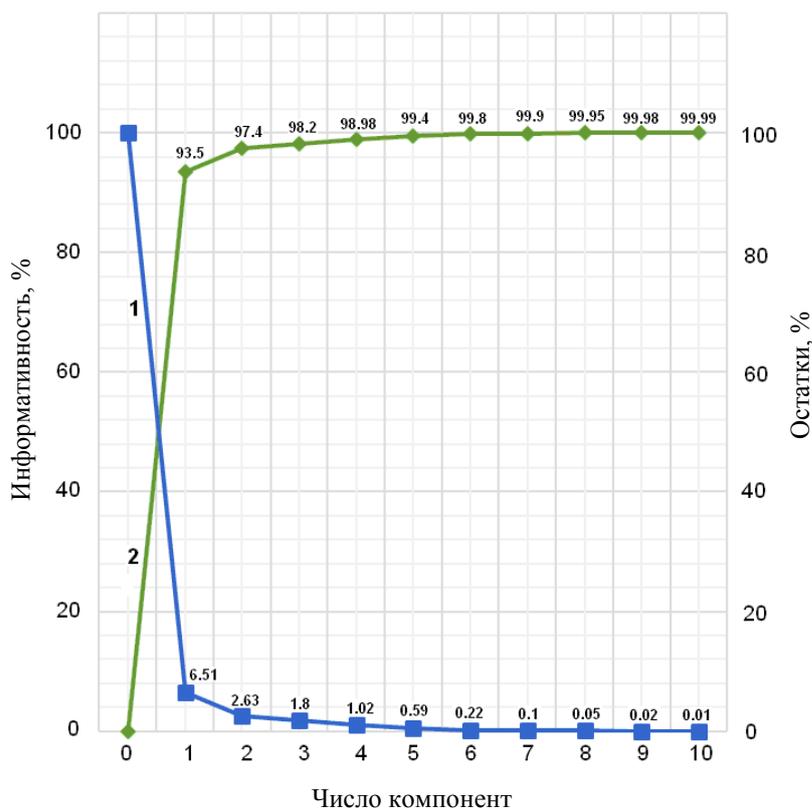


Рис. 1. Дисперсия остатков (кривая 1) и информативность преобразованных данных (кривая 2)
 Fig. 1. Dispersion of residuals (curve 1) and information content of transformed data (curve 2)

Результаты и обсуждение

При анализе, как и ранее (Yanchukovsky, 2023), использовалась программа The Unscrambler X⁴. Программа дает возможность вести ПЛС-анализ, используя несколько алгоритмов. Алгоритм Orthogonal Scores PLS не позволяет проводить обработку в случае, когда отсутствует несколько значений в рядах данных (Martens et al., 1991); алгоритм Wide-kernel PLS годится для обработки данных, содержащих большое число переменных, но незначительное количество образцов (Rannar et al., 1994); алгоритм Kernel PLS обеспечивает обработку данных при большом числе образцов (тысячи образцов) со значительным числом переменных (Lindgren et al., 1993; de Jong et al., 1994; Dayal et al., 1997). Для решения данной задачи оптимальным выбором является алгоритм Kernel PLS. Температурные коэффициенты α_i (% / °C) и плотности температурных коэффициентов w_i (% / °Catm) для мюонов, наблюдаемых на глубине 0, 7, 20 и 40 м.в.э., найденные с помощью ПЛС-анализа с использованием одной ГК, представлены в табл. 1–4 для направлений вертикаль (00), север и юг под углом к зениту 30° (N30, S30), а также под углом к зениту 60° (N60, S60).

Таблица 1. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на поверхности MT00

Table 1. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope on the MT00 surface

i	h_i , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-5}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-687	-711	-679	-758	-789	15	-4 350	-4 500	-4 300	-4 800	-5 002
2	20	-679	-697	-661	-747	-765	10	-4 299	-4 413	-4 186	-4 733	-4 846
3	30	-609	-571	-541	-612	-626	15	-3 855	-3 613	-3 428	-3 875	-3 968
4	50	-654	-672	-637	-720	-738	20	-3 108	-3 190	-3 027	-3 422	-3 504
5	70	-616	-632	-600	-678	-694	20	-2 925	-3 002	-2 848	-3 220	-3 297
6	100	-669	-687	-651	-736	-754	45	-1 412	-1 449	-1 375	-1 555	-1 592

⁴ URL.: <http://www.camo.com/rt/Products/Unscrambler/unscrambler.html>.

7	150	-650	-667	-633	-716	-733	50	-1 235	-1 268	-1 203	-1 360	-1 392
8	200	-443	-454	-431	-487	-499	50	-841	-863	-819	-926	-948
9	250	-718	-737	-699	-791	-810	50	-1 365	-1 401	-1 329	-1 502	-1 538
10	300	-1 366	-1 402	-1 330	-1 504	-1 540	75	-1 730	-1 776	-1 685	-1 905	-1 950
11	400	-1 935	-1 985	-1 884	-2 130	-2 181	100	-1 838	-1 886	-1 789	-2 023	-2 072
12	500	-2 106	-2 161	-2 050	-2 318	-2 373	100	-2 000	-2 053	-1 948	-2 202	-2 255
13	600	-2 163	-2 220	-2 106	-2 381	-2 438	100	-2 055	-2 109	-2 001	-2 262	-2 316
14	700	-2 258	-2 317	-2 198	-2 486	-2 545	150	-1 430	-1 468	-1 392	-1 574	-1 612
15	850	-2 798	-2 872	-2 724	-3 080	-3 154	100	-2 658	-2 728	-2 588	-2 926	-2 996
16	925	-3 527	-3 620	-3 435	-3 883	-3 976	50	-6 702	-6 879	-6 526	-7 378	-7 555

Таблица 2. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на глубине 7 м.в.э. МТ07

Table 2. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope at the depth of 7 m.w.e. МТ07

<i>i</i>	<i>h_i</i> , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-5}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-410	-443	-395	-514	-349	15	-2 595	-2 805	-2 501	-3 255	-2 211
2	20	-396	-428	-382	-502	-339	10	-2 506	-2 711	-2 419	-3 179	-2 146
3	30	-321	-347	-310	-407	-275	15	-2 033	-2 200	-1 963	-2 580	-1 741
4	50	-388	-420	-375	-493	-334	20	-1 844	-1 995	-1 780	-2 340	-1 579
5	70	-348	-377	-336	-442	-298	20	-1 655	-1 791	-1 598	-2 101	-1 418
6	100	-374	-405	-361	-474	-320	45	-790	-854	-762	-1 002	-676
7	150	-359	-388	-346	-455	-307	50	-681	-737	-658	-864	-583
8	200	-242	-262	-233	-307	-207	50	-459	-497	-443	-583	-394
9	250	-396	-429	-382	-503	-339	50	-753	-815	-727	-955	-645
10	300	-749	-811	-723	-951	-642	75	-949	-1 027	-916	-1 204	-813
11	400	-1 062	-1 149	-1 025	-1 348	-910	100	-1 009	-1 092	-974	-1 280	-864
12	500	-1 158	-1 253	-1 118	-1 469	-992	100	-1 101	-1 190	-1 062	-1 395	-942
13	600	-1 191	-1 289	-1 150	-1 511	-1 020	100	-1 132	-1 224	-1 092	-1 435	-969
14	700	-1 245	-1 347	-1 201	-1 579	-1 066	150	-788	-853	-761	-1 001	-675
15	850	-1 544	-1 671	-1 491	-1 959	-1 322	100	-1 467	-1 587	-1 336	-1 861	-1 256
16	925	-1 946	-2 106	-1 878	-2 469	-1 667	50	-3 698	-4 001	-3 569	-4 691	-3 166

Таблица 3. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на глубине 20 м.в.э. МТ20

Table 3. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope at the depth of 20 m.w.e. МТ20

<i>i</i>	<i>h_i</i> , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-5}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-269	-256	-267	-253	-269	15	-1 705	-1 621	-1 691	-1 603	-1 704
2	20	-256	-251	-258	-249	-264	10	-1 624	-1 591	-1 635	-1 576	-1 673
3	30	-210	-206	-211	-204	-216	15	-1 329	-1 303	-1 339	-1 291	-1 370
4	50	-256	-249	-259	-249	-264	20	-1 216	-1 181	-1 225	-1 182	-1 254
5	70	-232	-223	-234	-226	-240	20	-1 104	-1 060	-1 112	-1 073	-1 138
6	100	-253	-248	-254	-245	-260	45	-533	-523	-537	-518	-549
7	150	-245	-241	-247	-238	-253	50	-466	-457	-469	-453	-481
8	200	-167	-164	-168	-162	-172	50	-317	-311	-320	-309	-327
9	250	-271	-266	-273	-263	-279	50	-515	-505	-519	-501	-531
10	300	-516	-506	-519	-501	-531	75	-653	-641	-658	-635	-673
11	400	-731	-716	-736	-709	-753	100	-694	-681	-699	-674	-715
12	500	-795	-779	-801	-772	-819	100	-755	-741	-761	-733	-778
13	600	-817	-801	-823	-793	-842	100	-776	-761	-781	-754	-799
14	700	-853	-836	-859	-828	-878	150	-540	-529	-544	-524	-556
15	850	-1 057	-1 036	-1 064	-1 026	-1 089	100	-1 004	-984	-1 011	-975	-1 034
16	925	-1 332	-1 306	-1 341	-1 293	-1 372	50	-2 531	-2 481	-2 549	-2 458	-2 608

Таблица 4. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на глубине 40 м.в.э. МТ40

Table 4. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope at the depth of 40 m.w.e. МТ40

<i>i</i>	<i>h_i</i> , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-6}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-933	-906	-933	-861	-1 081	15	-591	-574	-591	-545	-685
2	20	-878	-853	-878	-813	-1 045	10	-556	-540	-556	-515	-662
3	30	-718	-698	-718	-665	-856	15	-455	-442	-455	-421	-542
4	50	-876	-850	-876	-810	-1 017	20	-416	-404	-416	-385	-483
5	70	-796	-773	-796	-737	-895	20	-378	-367	-378	-350	-425
6	100	-866	-839	-866	-801	-1 030	45	-183	-177	-183	-169	-217
7	150	-841	-815	-841	-778	-1 001	50	-160	-155	-160	-148	-190
8	200	-573	-555	-573	-530	-681	50	-109	-105	-109	-101	-129
9	250	-929	-901	-929	-860	-1 106	50	-176	-171	-176	-163	-210
10	300	-1 767	-1 714	-1 767	-1 636	-2 103	75	-224	-217	-224	-207	-266
11	400	-2 503	-2 427	-2 503	-2 317	-2 978	100	-238	-231	-238	-220	-283
12	500	-2 724	-2 641	-2 724	-2 521	-3 242	100	-259	-251	-259	-240	-308
13	600	-2 799	-2 714	-2 799	-2 590	-3 330	100	-266	-258	-266	-246	-316
14	700	-2 922	-2 832	-2 922	-2 704	-3 476	150	-185	-179	-185	-171	-220
15	850	-3 620	-3 510	-3 620	-3 350	-4 308	100	-344	-333	-344	-318	-409
16	925	-4 564	-4 425	-4 564	-4 224	-5 431	50	-867	-841	-867	-803	-1 032

Переход от α_i к w_i осуществляется посредством учета весового коэффициента $\Delta h_i / \sum_{i=1}^{17} \Delta h_i$, который отражает относительную массу слоя *i* атмосферы. Число ГК, равное 1 (*A* = 1), объясняет 93,5 % исходной вариации и доводит вклад шумов до минимума. Этим повышается способность выделить эффект на фоне шума, что повышает мощность теста. Интеграл (2) допускает применение теоремы о среднем, тогда

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

Здесь α_{sm} – температурный коэффициент от среднемассовой температуры атмосферы ΔT_{sm} , которая находится как $\Delta T_{sm} = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i / \sum_{i=1}^n \Delta h_i$, где ΔT_i – изменения температуры слоя *i* относительно среднего (или опорного) значения. Таким образом, интегральный температурный эффект можно представить в виде эффекта от среднемассовой температуры атмосферы. Тогда среднее значение w_i на интервале от 0 до 950 мб должно быть равно значению α_{cm} в пределах точности оценки коэффициентов. Результаты проверки с помощью метода ПЛС при *A* = 1 представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты проверки
 Table 5. Test results

Угол к зениту		0	N30	S30	N60	S60
МТ 00	$\overline{w_i}$	-0,237 ± 0,0088	-0,243 ± 0,0085	-0,231 ± 0,0078	-0,261 ± 0,0064	-0,267 ± 0,0059
	α_{cm}	-0,225 ± 0,0018	-0,230 ± 0,002	-0,21 ± 0,0019	-0,245 ± 0,004	-0,251 ± 0,0045
МТ 07	$\overline{w_i}$	-0,132 ± 0,005	-0,143 ± 0,0044	-0,127 ± 0,0043	-0,165 ± 0,0041	-0,113 ± 0,0039
	α_{cm}	-0,125 ± 0,0023	-0,134 ± 0,003	-0,120 ± 0,0031	-0,157 ± 0,0047	-0,107 ± 0,0029
МТ 20	$\overline{w_i}$	-0,0891 ± 0,0034	-0,0877 ± 0,003	-0,0898 ± 0,0028	-0,0866 ± 0,0027	-0,0919 ± 0,0024
	α_{cm}	-0,086 ± 0,0022	-0,084 ± 0,002	-0,087 ± 0,0022	-0,084 ± 0,0022	-0,088 ± 0,0022
МТ 40	$\overline{w_i}$	-0,0307 ± 0,003	-0,0296 ± 0,0025	-0,0307 ± 0,002	-0,0282 ± 0,0013	-0,0360 ± 0,0010
	α_{cm}	-0,029 ± 0,0007	-0,029 ± 0,001	-0,029 ± 0,0008	-0,027 ± 0,0013	-0,035 ± 0,0014

Наблюдается согласие средних значений $\overline{w_i}$, полученных с использованием ПЛС-анализа, с коэффициентом α_{cm} среднемассовой температуры атмосферы. Аналогичной проверке удовлетворяли и результаты, полученные ранее при двух ГК (*A* = 2) (Yanchukovsky, 2023; Yanchukovsky et al., 2025). Для

сопоставления полученных результатов на рис. 2 представлены распределения $w_i(h)$ для мюонов в атмосфере с вертикального направления, полученные с помощью методов ПЛС при $A = 1$ и $A = 2$.

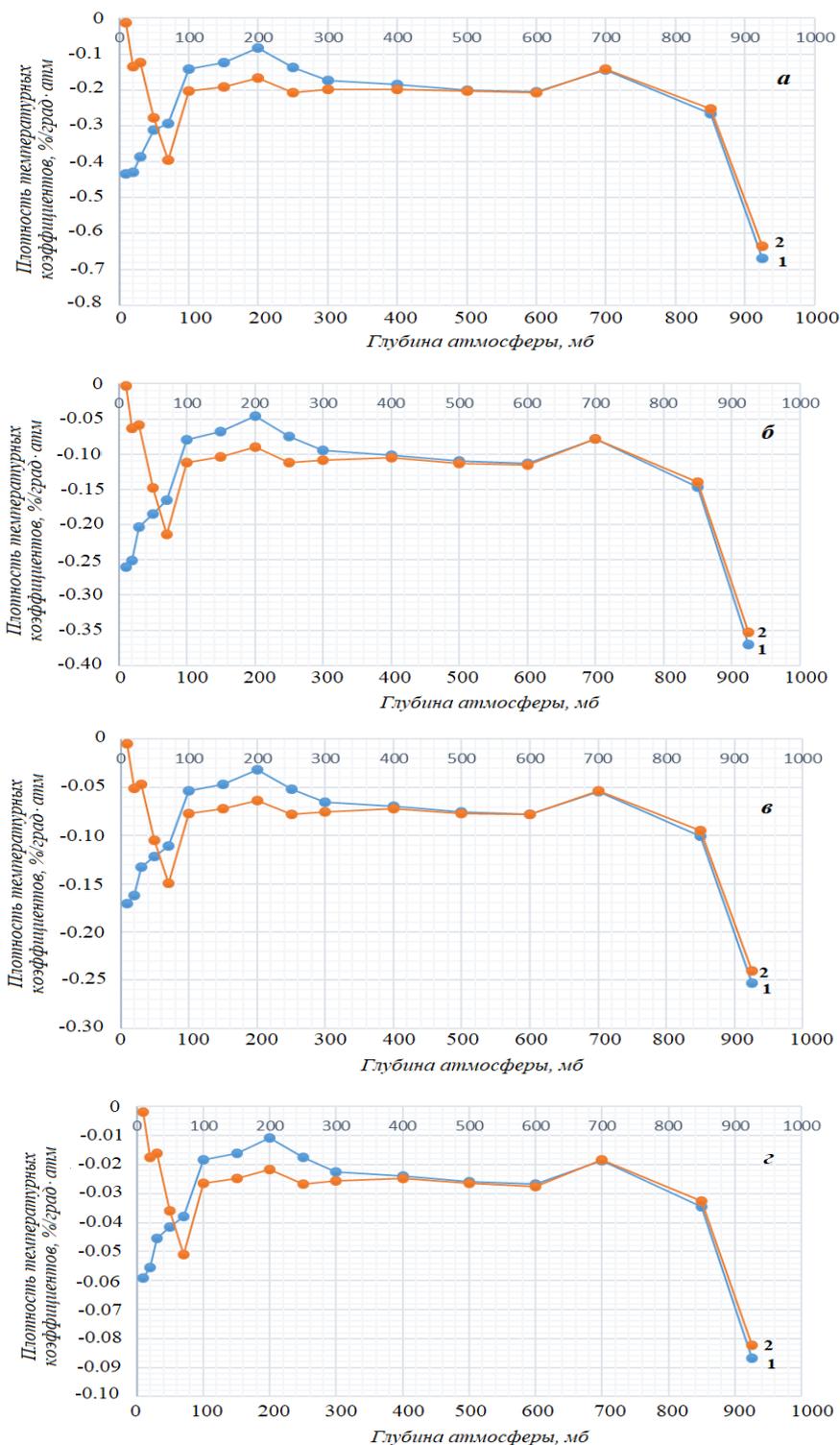


Рис. 2. Распределение плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых на поверхности (а) и глубине 7 (б), 20 (в) и 40 м.в.э. (г) с вертикальных направлений, найденные методами ПЛС

с привлечением одной (кривая 1) и двух (кривая 2) главных компонент
 Fig. 2. Distributions of the density of temperature coefficients for muons registered on the surface (а) and underground at the depth of 7 m.w.e. (б), 20 m.w.e. (в) and 40 m.w.e. (г) from the vertical directions, found by PLS methods using one (curve 1) and two (curve 2) principal components

Результаты, полученные при $A = 1$ и $A = 2$, согласуются с учетом широкой области атмосферы 300–950 мб и всех уровней наблюдений мюонов (0, 7, 20 и 40 м. в. э.) В то же время наблюдаются различия в характере распределений в области атмосферы ≤ 300 мб, обусловленные зашумленностью исходных данных (качеством данных). Измерения вариаций интенсивности $\frac{\Delta I_k}{I_k}(t)$ мюонов осуществлялось с точностью 0,05 %. Оценить ошибки при определении изменений температуры $\Delta T_i(t)$ по данным аэрологического зондирования затруднительно, так как аэрологическое зондирование осуществляется два раза в сутки и предполагает проведение измерений до высот 30 км, однако часто зонды не достигают и меньших высот. Число пропусков измерений температуры при этом возрастает с высотой и зависит от сезона. Наибольшее число пропусков происходит в зимний период. Данные прямых измерений температуры в эти периоды представляют собой результат экстраполяции (Дорман, 1972). Эффект от пропусков становится статистически значимым в области атмосферы менее 300 мб, т. е. на высотах более 9–10 км (рис. 2).

Заключение

В результате исследования выполнен анализ многомерных данных, полученных в ходе длительных наблюдений интенсивности мюонов с помощью подземного комплекса мюонных детекторов (г. Якутск), и данных аэрологического зондирования атмосферы при определении температурного эффекта мюонов. С использованием методов главных компонент найдено распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере.

При высоком уровне шума (т. е. при низком качестве исходных данных) с целью повышения достоверности конечного результата ПЛС-анализ целесообразно осуществлять с учетом только одной главной компоненты.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019). Результаты получены с использованием оборудования УНУ-85 "Российская национальная сеть станций космических лучей" (<http://www.ckr-rf.ru/usu/433536>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
- Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 2001. 403 с.
- Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 211 с.
- Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.
- Зверев А. С., Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. Учет температурного эффекта в данных измерений мюонных телескопов // Физика околоземного космического пространства: материалы Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (БШФФ-2019). Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2019. С. 151–153.
- Мурзин В. С., Сарычева Л. И. Космические лучи и их взаимодействие. М.: Атомиздат, 1968. 391 с.
- Скрипин Г. В., Кривошапкин П. А., Крымский Г. Ф. Изучение анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5, № 5. С. 817–822.
- Стародубцев С., Григорьев В., Гололобов П. Якутский спектрограф космических лучей им. А. И. Кузьмина: современное состояние // сб. тр. Всероссийской конференции "Гелиогеофизические исследования в Арктике", 19–23 сентября 2016 г., г. Мурманск. Мурманск: Полярный геофизический институт, 2016. С. 125–129.
- Янчуковский В. Л., Филимонов Г. Я., Хисамов Р. З. Атмосферные вариации интенсивности мюонов для различных зенитных углов регистрации // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, № 7. С. 1066–1068.
- Berkova M. D., Belov A. V., Eroshenko E. A., Yanke V. G. Temperature effect of the muon component and practical questions for in real time // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. Vol. 75, Iss. 6. P. 820–824.
- Dayal B. S., McGregor J. F. Improved PLS algorithms // Journal of Chemometrics. 1997. Vol. 11. P. 73–65. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-128X\(199701\)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-128X(199701)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#).
- De Jong S., Ter Braak C. Comments on the PLS kernel algorithm // Journal of Chemometrics. 1994. Vol. 8. P. 169–174.
- Esbensen K. Multivariate data analysis in practice: An introduction to multivariate data analysis and experimental design. Oslo, Norway: Camo Process AS, 2002. 598 p.
- Lindgren F., Geladi P., Wold S. The kernel algorithm for PLS // Journal of Chemometrics. 1993. Vol. 7. P. 45–59.

- Martens H., Naes T. *Multivariate calibration*. Chichester, UK : John Wiley and Sons, 1991.
- Osipenko A. S., Abunina A. A., Berkova M. D., Barbashina N. S. [et al.]. Analyzing the temperature effect of high mountain cosmic ray detectors using the database of the global network of muon telescopes // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015. Vol. 79, Iss. 5. P. 662–666. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873815050317>.
- Rannar S., Lindgren F., Geladi P., Wold S. A PLS kernel algorithm for data sets with many variables and fewer objects. Part 1: Theory and algorithm // *Journal of Chemometrics*. 1994. Vol. 8. P. 111–125.
- Yanchukovsky V. L. Muon intensity variations and atmospheric temperature // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020. Vol. 6, Iss. 1. P. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-61202013>.
- Yanchukovsky V. L. Temperature effect of muons detected underground in Yakutsk using telescopes on gas-discharge counters // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2023. Vol. 9, Iss. 2. P. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-92202307>.
- Yanchukovsky V. L., Khisamov R. Z. Temperature effect of muons detected underground using scintillation detectors // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2025. Vol. 11, Iss. 1. P. 98–108. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-111202511>. EDN: WIHSJQ.

References

- Ayvazyan, S. A., Bukhtaber, V. M., Enyukov, I. S., Meshalkin, L. D. 1989. *Applied statistics. Classification and dimensionality reduction*. Moscow. (In Russ.)
- Ayvazyan, S. A. 2001. *Applied statistics and fundamentals of econometrics*. Moscow. (In Russ.)
- Dorman, L. I. 1972. *Meteorological effects of cosmic rays*. Moscow. (In Russ.)
- Dorman, L. I. 1975. *Experimental and theoretical foundations of cosmic ray astrophysics*. Moscow. (In Russ.)
- Zverev, A. S., Grigor'ev, V. G., Starodubtsev, S. A. 2019. Taking into account the temperature effect in the measurement data of muon telescopes. *Physics of Near-Earth Space. Section B. In Baikal school of fundamental physics*. Irkutsk, pp. 151–153. (In Russ.)
- Murzin, V. S., Sarycheva, K. I. 1968. *Cosmic rays and their interactions*. Moscow. (In Russ.)
- Skripin, G. V., Krivoshepkin, P. A., Krymsky, G. F. 1965. Study of cosmic ray anisotropy by the crossed telescope method. *Geomagnetism and Aeronomy*, 5(5), pp. 817–822. (In Russ.)
- Starodubcev, S., Grigor'ev, V., Gololobov, P. 2016. The Yakutsk cosmic ray spectrograph named after A. I. Kuzmin: Current status. In coll. of Proceedings of the All-Russian Conference *Heliogeophysical Research in the Arctic*. Murmansk, 19–23 September, 2016. Murmansk, pp. 125–129. (In Russ.)
- Yanchukovsky, V. L., Filimonov, G. Ya., Khisamov, R. Z. 2007. Atmospheric variations of muon intensity for different zenith angles of registration. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*, 71(7), pp. 1066–1068. (In Russ.)
- Berkova, M. D., Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Yanke, V. G. 2011. Temperature effect of the muon component and practical questions for in real time. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 75(6), pp. 820–824.
- Dayal, B. S., McGregor, J. F. 1997. Improved PLS algorithms. *Journal of Chemometrics*, 11, pp. 73–65. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-128X\(199701\)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-128X(199701)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#).
- De Jong, S., Ter Braak, C. 1994. Comments on the PLS kernel algorithm. *Journal of Chemometrics*, 8, pp. 169–174.
- Esbensen, K. 2002. *Multivariate data analysis in practice: An introduction to multivariate data analysis and experimental design*. Oslo.
- Lindgren, F., Geladi, P., Wold, S. 1993. The kernel algorithm for PLS. *Journal of Chemometrics*, 7, pp. 45–59.
- Martens, H., Naes, T. 1991. *Multivariate calibration*. Chichester.
- Osipenko, A. S., Abunina, A. A., Berkova, M. D., Barbashina, N. S. et al. 2015. Analyzing the temperature effect of high mountain cosmic ray detectors using the database of the global network of muon telescopes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 79(5), pp. 662–666. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873815050317>.
- Rannar, S., Lindgren, F., Geladi, P., Wold, S. 1994. A PLS kernel algorithm for data sets with many variables and fewer objects. Part 1: Theory and algorithm. *Journal of Chemometrics*, 8, pp. 111–125.
- Yanchukovsky, V. L. 2020. Muon intensity variations and atmospheric temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 6(1), pp. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-61202013>.
- Yanchukovsky, V. L. 2023. Temperature effect of muons detected underground in Yakutsk using telescopes on gas-discharge counters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 9(2), pp. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-92202307>.
- Yanchukovsky, V. L., Khisamov, R. Z. 2025. Temperature effect of muons detected underground using scintillation detectors. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 11(1), pp. 98–108. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-111202511>. EDN: WIHSJQ.

Сведения об авторах

Янчуковский Валерий Леонидович – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Valery L. Yanchukovsky – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS,
Dr Sci. (Phys.&Math.), Leading Researcher;
e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Хисамов Рашид Замалтдинович – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, вед. инженер;
e-mail: khisamovrz@ipgg.sbras.ru

Rashit Z. Khisamov – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Leading Engineer;
e-mail: khisamovrz@ipgg.sbras.ru

Калюжная Марина Анатольевна – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, инженер;
e-mail: kalyuzhnayama@ipgg.sbras.ru

Marina A. Kalyuzhnaya – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Engineer;
e-mail: kalyuzhnayama@ipgg.sbras.ru

Кузьменко Василий Сергеевич – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, техник;
e-mail: KuzmenkoVS@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3355-3179>

Vasiliy S. Kuz'menko – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Engineer;
e-mail: KuzmenkoVS@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3355-3179>