
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ МЮОНОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПОД ЗЕМЛЕЙ В ЯКУТСКЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕСКОПОВ НА ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СЧЕТЧИКАХ

TEMPERATURE EFFECT OF MUONS REGISTERED UNDER THE GROUND IN YAKUTSK BY TELESCOPES ON GAS-DISCHARGE COUNTERS

В.Л. Янчуковский*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru***V.L. Yanchukovsky***A.A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics
SB RAS,
Novosibirsk, Russia, YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. Якутский спектрограф космических лучей включает комплекс мюонных телескопов на газоразрядных и сцинтилляционных счетчиках, расположенных на поверхности земли и под землей на глубинах 7, 20 и 40 м водного эквивалента. По данным непрерывных наблюдений с помощью мюонных телескопов на газоразрядных счетчиках и высотным профилям температуры атмосферы над Якутском за период с января 2016 г. по декабрь 2018 г. рассчитаны распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых на поверхности и на различных глубинах под землей. При этом были использованы методы многофакторной регрессии и главных компонент. Полученные результаты сопоставлены с результатами теоретических расчетов, выполненных ранее. Использование полученных результатов позволяет корректно учитывать температурный эффект в данных комплекса мюонных телескопов на газоразрядных счетчиках.

Ключевые слова: космические лучи, атмосфера, мюоны, телескоп, температурный эффект.

Abstract. The Yakutsk spectrograph of cosmic rays includes a complex of muon telescopes based on gas-discharge and scintillation counters located on the surface and under the ground at depths of 7, 20, and 40 m.w.e. Using continuous observations made by muon telescopes on gas-discharge counters and data on the altitude profile of the atmospheric temperature over Yakutsk for the period from January 2016 to December 2018, we have calculated density distributions of temperature coefficients for muons detected on the surface and at various depths under the ground. To do this, we employed multivariate regression methods and principal component methods. The results obtained are compared with the results of earlier theoretical calculations. The results make it possible to correctly take into account the temperature effect in the data from the complex of muon telescopes on gas-discharge counters.

Keywords: cosmic rays, atmosphere, muons, telescope, temperature effect.

ВВЕДЕНИЕ

Вариации интенсивности космических лучей (КЛ) атмосферного происхождения вызваны изменением параметров атмосферы (давление, температура, влажность, перераспределение масс) [Дорман, 1972]. Вклад перечисленных параметров в атмосферную вариацию КЛ для разных компонент вторичных КЛ неодинаков. Для мезонной компоненты, которую составляют нестабильные частицы, определяющим является температурный эффект, хотя присутствует и небольшой барометрический. Для эффективного использования данных мюонных телескопов следует корректно учитывать вклад атмосферных вариаций [Янчуковский, Кузьменко, 2018], для чего первоначально следует оценить величину воздействия различных параметров атмосферы на интенсивность мюонов. Барометрический эффект интенсивности мюонов определяется давлением на уровне наблюдения, поэтому находится и учитывается достаточно просто. Температурная вариация интенсивности мюонов зависит от многих параметров, которые характеризуют температурный режим атмосферы от слоя генерации до уровня регистрации

мюонов. Интегральный метод учета температурного эффекта [Дорман, 1957] практически свободен от недостатков, поскольку предполагает учет всего температурного разреза атмосферы и учитывает распределение масс, которое полностью и однозначно контролируется температурным разрезом атмосферы от уровня наблюдения до ее границы. Для реализации интегрального метода необходимы регулярные данные аэрологического зондирования и распределение плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере. Плотности температурных коэффициентов для мюонов были получены ранее с помощью теоретических расчетов многими авторами [Дорман, Янке, 1971; Berkova et al., 2008; Дмитриева и др., 2009; Кузьменко, Янчуковский, 2017]. В том числе был выполнен расчет для новосибирского мюонного телескопа-годоскопа и якутского подземного комплекса мюонных телескопов [Кузьменко, Янчуковский, 2017]. Результаты теоретических расчетов для коррекции данных наблюдений следует использовать с осторожностью, поскольку они выполняются с теми или иными приближениями. Эффективное использование интегрального метода [Дорман,

1972] предполагает знание распределения плотности температурных коэффициентов для конкретной экспериментальной установки.

Оценка плотности температурных коэффициентов по данным наблюдений также затруднена, поскольку изменения температуры различных слоев атмосферы коррелированы. Поэтому для определения температурных коэффициентов по результатам непрерывных наблюдений для комплекса подземных мюонных детекторов в Якутске были использованы различные методы анализа данных.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Спектрограф космических лучей им. А.И. Кузьмина в Якутске [Стародубцев и др., 2016; Герасимова и др., 2021] включает нейтронный монитор 24NM-64 и комплекс мюонных детекторов, расположенных на поверхности земли и под землей на уровнях 7, 20 и 40 м водного эквивалента (м в.э.) и обеспечивающих регистрацию мюонов с направленной вертикаль, N30, S30, N60 и S60. Высота над уровнем моря станции КЛ «Якутск» (61.59° N, 129.41° E) 95 м; жесткость геомагнитного обрезания 1.65 ГВ.

В работе были использованы исходные (некорректированные) часовые данные непрерывных наблюдений комплекса мюонных детекторов на газоразрядных счетчиках, нейтронного монитора [<https://ikfia.ysn.ru/data/hecrclab/mt/>; <https://ikfia.ysn.ru/data/hecrclab/ipm/>], а также данные по атмосферному давлению за период с января 2016 г. по декабрь 2018 г. Высотные профили температуры атмосферы (за каждый час) над Якутском взяты из базы данных [<http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin/>], которая содержит результаты Национального центра экологического прогнозирования США (NCEP) [<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>].

С целью визуального контроля исходных данных были построены графики для всех каналов регистрации и графики отношений идентичных каналов (30N/30S, 60N/60S). Расхождений не выявлено, следовательно, оценка трендов не проводилась. Обнаруженные выбросы были удалены, а имеющиеся пробелы в исходных часовых данных (29 и 30 сентября 2016 г., а также 30 октября 2018 г.) заполнены средними значениями, вычисленными по четырем значениям как до, так и после каждого пробела. По данным нейтронного монитора в Якутске за период с января 2016 г. по декабрь 2018 г. методом парной корреляции сделана оценка барометрического коэффициента: -0.73 ± 0.004 %/мб, тогда как по данным [<https://ikfia.ysn.ru/data/hecrclab/ipm/>] барометрический коэффициент составляет 0.723 %/мб. В дальнейшем для нейтронного монитора в Якутске будет использовано новое значение барометрического коэффициента.

Все исходные данные приведены к среднесуточным значениям, общее число которых составило:

- для телескопа на поверхности (MT00) — 1077;
- для телескопа на уровне 7 м в.э. (MT07) — 1033;
- для телескопа на уровне 20 м в.э. (MT20) — 1077;

- для телескопа на уровне 40 м в.э. (MT40) — 1077.

Затем были найдены средние значения за весь рассматриваемый временной интервал для каждого канала комплекса, относительно которых оценивались вариации интенсивности (в %). Переменные (давление, приземная и среднемассовая температуры и температуры на 16 изобарах) были представлены как отклонения (изменения) относительно средних значений этих переменных за тот же временной интервал (с января 2016 г. по декабрь 2018 г.). На рис. 1 показаны исходные данные для четырех уровней регистрации мюонов.

В табл. 1 приведены некоторые параметры исходных данных.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Многофакторная регрессия

Наблюдаемая вариация интенсивности мюонов складывается из вариаций, вызванных изменениями атмосферного давления, температуры приземного слоя, интегральным температурным эффектом атмосферы и вариациями первичных космических лучей. Уравнение для вариаций интенсивности мюонов представим в виде линейного уравнения многофакторной регрессии

$$\delta J_{\mu}(t) = \beta \Delta h(t) + \alpha_{np} \Delta T_{np}(t) [h(t) - 950] + \alpha_{cm} \Delta T_{cm}(t) + \gamma \delta J_n(t), \quad (1)$$

где $\delta J_{\mu}(t) = \frac{J_{\mu}(t) - \bar{J}_{\mu}}{\bar{J}_{\mu}} \cdot 100$ — наблюдаемая вариация (в %) интенсивности мюонов (результатирующий фактор y); $\Delta h = h(t) - h_0$ — изменения атмосферного

давления (фактор x_1); $\Delta T_{np}(t) = T_{np}(t) - \bar{T}_{np}$ — изменения температуры слоя переменной массы (фактор x_2); $\Delta T_{cm}(t) = T_{cm}(t) - \bar{T}_{cm}$ — изменения среднемассовой температуры атмосферы (фактор x_3);

$\delta J_n(t) = \frac{J_n(t) - \bar{J}_n}{\bar{J}_n}$ — вариации интенсивности

нейтронной компоненты (данные нейтронного монитора в Якутске), исправленные на изменения атмосферного давления (фактор x_4). В выражении (1) присутствуют также коэффициенты регрессии: α_{np} — температурный коэффициент для приземной температуры; α_{cm} — температурный коэффициент для среднемассовой температуры атмосферы; β — барометрический коэффициент; γ — коэффициент регрессии с данными нейтронного монитора, исправленными на вариации атмосферного давления и отражающими первичные вариации КЛ. Коэффициенты многофакторной регрессии (МФР) в выражении (1) находились, как ранее в работе [Янчуковский, Кузьменко, 2018], с использованием метода представления уравнения регрессии в стандартизованном масштабе [Горлач, 2006] и метода наименьших квадратов [Корн, Корн, 1984]. Найденные таким образом коэффициенты регрессии представлены в табл. 2.

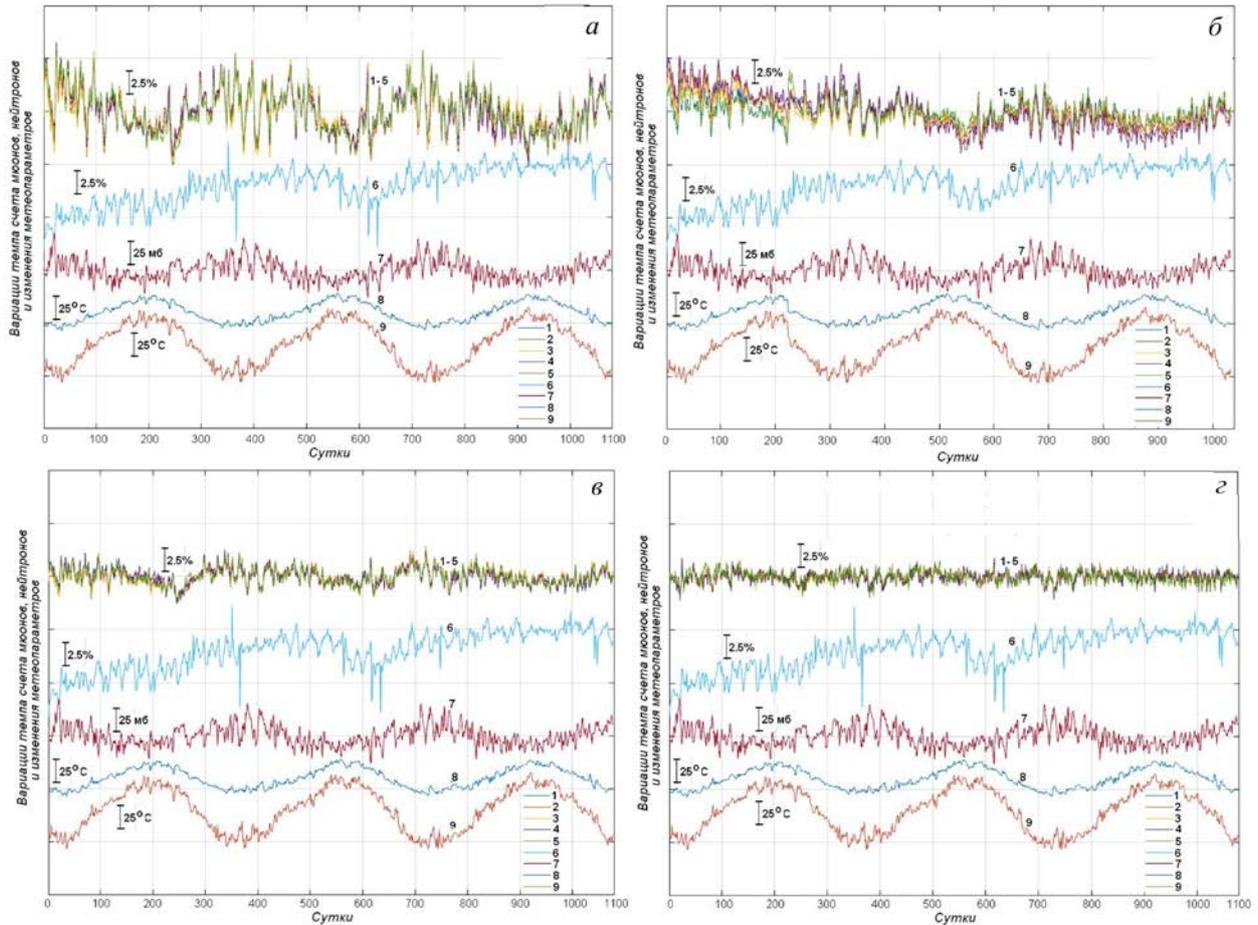


Рис. 1. Вариации темпа счета мюонов на поверхности (а) и под землей на глубинах 7 (б), 20 (в) и 40 м в.э. (г) с направлений вертикаль (кривая 1), N30 (кривая 2), S30 (кривая 3), N60 (кривая 4), S60 (кривая 5) и нейтронов NM (кривая 6), а также изменения атмосферного давления (кривая 7), среднемассовой температуры атмосферы (кривая 8) и температуры приземного слоя (кривая 9) за период с января 2016 г. по декабрь 2018 г.

Таблица 1

Характеристика исходных данных

Каналы регистрации		0	N30	S30	N60	S60	
Средне-суточные значения темпа счета	ч ⁻¹	MT00	4300.97	2494.61	2489.94	1563.26	1524.43
		MT07	4171.44	2391.73	2443.97	1725.92	1550.17
		MT20	4053.07	1207.58	1245.89	816.11	910.11
		MT40	3587.53	2251.81	2107.88	399.11	367.85
	мин ⁻¹	NM	1701.97				
Пересчетный фактор		MT00	256	128	128	16	16
		MT07	128	64	64	8	8
		MT20	64	64	64	8	8
		MT40	32	16	16	8	8
		NM	8				
Статистическая ошибка, %		MT00	0.019	0.036	0.036	0.129	0.130
		MT07	0.028	0.052	0.052	0.174	0.183
		MT20	0.04	0.073	0.072	0.252	0.239
		MT40	0.06	0.107	0.111	0.361	0.376
		NM	0.022				

Средние значения метеопараметров за весь период составили:

- для атмосферного давления 1002.33 мб;
- для среднемассовой температуры –30.86 °С;
- для температуры слоя переменной массы (приземного слоя) –5.67 °С.

Таблица 2

Коэффициенты регрессии для каналов телескопов МТ00, МТ07, МТ20 и МТ40

Коэффициент	МТ	0	N30	S30	N60	S60
β , %/мб	00	-0.189 ± 0.0027	-0.187 ± 0.003	-0.191 ± 0.0034	-0.164 ± 0.004	-0.175 ± 0.006
	07	-0.109 ± 0.0033	-0.117 ± 0.004	-0.109 ± 0.0038	-0.117 ± 0.0045	-0.093 ± 0.0032
	20	-0.076 ± 0.0018	-0.074 ± 0.002	-0.078 ± 0.0023	-0.069 ± 0.0024	-0.075 ± 0.003
	40	-0.053 ± 0.001	-0.052 ± 0.001	-0.052 ± 0.001	-0.046 ± 0.0013	-0.048 ± 0.0014
$\alpha_{см}$, %/°C	00	-0.225 ± 0.0018	-0.230 ± 0.002	-0.219 ± 0.0019	-0.245 ± 0.004	-0.251 ± 0.0045
	07	-0.125 ± 0.0023	-0.134 ± 0.003	-0.120 ± 0.0031	-0.157 ± 0.0047	-0.107 ± 0.0029
	20	-0.086 ± 0.0022	-0.084 ± 0.002	-0.087 ± 0.0022	-0.084 ± 0.0022	-0.088 ± 0.0022
	40	-0.029 ± 0.0007	-0.029 ± 0.001	-0.029 ± 0.0008	-0.027 ± 0.0013	-0.035 ± 0.0014
γ	00	0.368 ± 0.008	0.370 ± 0.009	0.353 ± 0.009	0.330 ± 0.016	0.300 ± 0.017
	07	0.289 ± 0.0082	0.289 ± 0.009	0.261 ± 0.0096	0.201 ± 0.028	0.156 ± 0.034
	20	0.192 ± 0.0089	0.218 ± 0.017	0.174 ± 0.017	0.137 ± 0.057	0.175 ± 0.067
	40	0.123 ± 0.0092	0.113 ± 0.018	0.112 ± 0.018	0.080 ± 0.062	0.089 ± 0.062
$\alpha_{пр} 10^{-4}$, %/°C		-3.18 ± 0.32	-3.57 ± 0.41	-3.41 ± 0.43	-3.61 ± 0.68	-3.70 ± 0.7

Коэффициенты регрессии γ уточнялись в периоды больших форбуш-понижений КЛ, которые наблюдались в рассматриваемом интервале времени (в июле и сентябре 2017 г.). Температурные коэффициенты для слоя переменной массы $\alpha_{пр}$ уточнялись с помощью метода парной корреляции между $\Delta T_{пр}(t)$ и левой частью выражения

$$\frac{\delta J_{пр}(t)}{h(t) - 950} = \frac{\delta J_{\mu}(t) - \beta \Delta h(t) - \gamma \delta J_n(t) - \alpha_{см} \Delta T_{см}(t)}{h(t) - 950} = \alpha_{пр} \Delta T_{пр}(t) \quad (2)$$

Для ряда непрерывных данных с начала 2016 г. по конец 2018 г. коэффициент регрессии $\alpha_{пр}$ составил для вертикали $-3.18 \cdot 10^{-4}$ при коэффициенте корреляции –

$$0.2907, \text{ для } \frac{\delta J_{пр}(t)}{h(t) - 950} \quad \sigma = 0.0219, \text{ а для } \Delta T_{пр}(t) \quad \sigma = 20.0053.$$

Найденные коэффициенты β , $\alpha_{пр}$, $\alpha_{см}$, γ позволяют выделить в наблюдаемых вариациях интенсивности мюонов $\delta J_{\mu}(t)$ интегральный температурный эффект (температурную составляющую):

$$\alpha_{см} \Delta T_{см}(t) = \delta J_{\mu}(t) - \beta \Delta h(t) - \alpha_{пр} \Delta T_{пр}(t) - \gamma \delta J_n(t). \quad (3)$$

Интегральный температурный эффект обусловлен

изменениями температуры атмосферы на 16 изобарах:

$$\alpha_{см} \Delta T_{см}(t) = \sum_{i=1}^{16} \alpha_i \Delta T_i(t). \quad (4)$$

Здесь $\Delta T_i(t) = T_i(t) - \bar{T}_i$ — изменения температуры атмосферы на i -й изобаре; α_i — коэффициент регрессии или температурный коэффициент для i -й изобары.

Температурные коэффициенты α_i в рамках МФР находились путем представления уравнений многофакторной регрессии в стандартизованном масштабе с последующим решением системы линейных уравнений и использованием метода наименьших квадратов [Янчуковский, Кузьменко, 2018]. Температурные коэффициенты, полученные с помощью МФР для пяти направлений мюонного телескопа МТ00, приведены в табл. 3.

При использовании метода наименьших квадратов точность оценки температурных коэффициентов составила $2.5 \cdot 10^{-5}$. При переходе к плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов учитывается весовой коэффициент, обусловленный относительной массой каждого слоя атмосферы:

$$\frac{\Delta h_i}{\sum_{i=1}^{16} \Delta h_i}.$$

На рис. 2 приведены распределения плотности температурных коэффициентов, найденные методом МФР для мюонов, регистрируемых телескопом МТ00 на поверхности.

Таблица 3

Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа МТ00 (метод МФР)

i	h_i , мб	00 α_i 10^{-4}	N30 α_i 10^{-4}	S30 α_i 10^{-4}	N60 α_i 10^{-4}	S60 α_i 10^{-4}	Δh_i , мб	00 w_i 10^{-3}	N30 w_i 10^{-3}	S30 w_i 10^{-3}	N60 w_i 10^{-3}	S60 w_i 10^{-3}
1	925	-197	-203	-201	-233	-264	50	-375	-387	-382	-444	-502
2	850	-319	-326	-322	-374	-424	100	-303	-310	-306	-356	-403
3	700	-331	-344	-339	-393	-445	150	-211	-218	-215	-249	-282
4	600	-218	-225	-221	-258	-291	100	-207	-214	-211	-245	-277
5	500	-240	-247	-244	-283	-320	100	-228	-235	-232	-269	-304
6	400	-231	-238	-239	-272	-308	100	-220	-226	-227	-259	-293
7	300	-172	-176	-174	-202	-229	75	-218	-223	-220	-256	-290
8	250	-116	-119	-118	-137	-155	50	-221	-227	-224	-261	-295
9	200	-113	-119	-118	-137	-155	50	-221	-226	-224	-260	-294
10	150	-112	-116	-114	-133	-150	50	-214	-220	-217	-253	-285
11	100	-105	-108	-108	-125	-142	45	-223	-229	-228	-265	-299
12	70	-47	-48	-48	-56	-62	20	-222	-228	-227	-264	-296
13	50	-48	-50	-49	-57	-64	20	-231	-237	-235	-272	-307
14	30	-34	-36	-35	-41	-46	15	-218	-225	-224	-260	-291
15	20	-20	-19	-19	-22	-25	10	-188	-185	-183	-213	-239
16	10	-17	-18	-21	-24	-27	15	-110	-118	-135	-157	-176

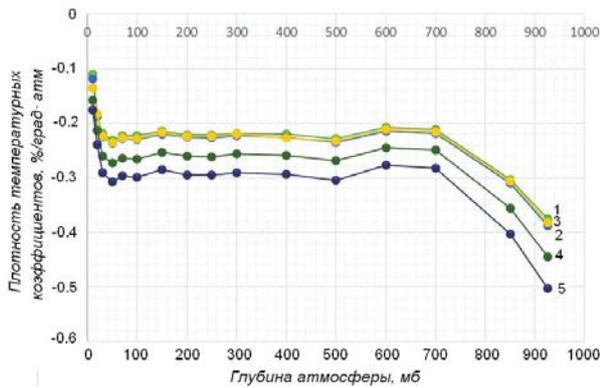


Рис. 2. Распределение плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых телескопом МТ00 с вертикали (кривая 1), под углом к вертикали в 30° с направлений N (кривая 2) и S (кривая 3), а также под углом в 60° с направлений N (кривая 4) и S (кривая 5)

РЕГРЕССИЯ НА ГЛАВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

При исследовании температурного эффекта мюонов, регистрируемых якутским комплексом подземных детекторов, использовались многофакторная регрессия (МФР) и метод главных компонент [Айвазян и др., 1989]. При рассмотрении регрессии на главные компоненты (РГК) [Jolliffe, 2002; Gorban et al., 2007] привлекались методы проекций на латентные структуры (ПЛС) [Эбенсен, 2005; Померанцев, 2014]. Это вызвано тем, что переменные (температуры на 16 изобарах) следует рассматривать как коррелированные факторы. Для построения системы линейных уравнений в пространстве главных компонент (ГК) использовался метод ПЛС.

Идея методов как РГК, так и ПЛС заключается в построении пространства N неявных параметров,

имеющих между собой нулевые коэффициенты корреляции, таким образом, что доли информативности исходных данных распределяются на каждом из них от большего к меньшему, что в сумме дает 100 % информации исходной выборки.

На основании анализа расчетных значений для мер информативности вкладов каждой компоненты делается оценка числа ГК, вариации исходных данных на которые содержат основную информацию. Согласно этой оценке строятся матрицы перехода в пространство пониженной размерности. Для построения этого пространства необходимо такое ортогональное преобразование в новую систему координат, для которого были бы верны следующие условия:

- выборочная дисперсия данных вдоль первой координаты максимальна (эту координату называют первой главной компонентой);
- выборочная дисперсия данных вдоль второй координаты максимальна при условии ортогональности первой координате (вторая главная компонента);
- выборочная дисперсия данных вдоль значений k -й координаты максимальна при условии ортогональности первым $k-1$ координатам.

Как правило, основная доля вариаций исходной выборки сосредоточивается на первой координате. Вариации, связанные со следующим параметром, сосредоточиваются на второй координате и т. д. Построение подобного пространства неявных параметров производится с условием максимизации связи откликов и входных данных. Используя полученный базис, несложно получить модифицированное представление исходной регрессии, после чего, с учетом рассчитанных значений информативности для каждой новой координаты, определить оптимальную размерность данных, отвечающую заданной точности.

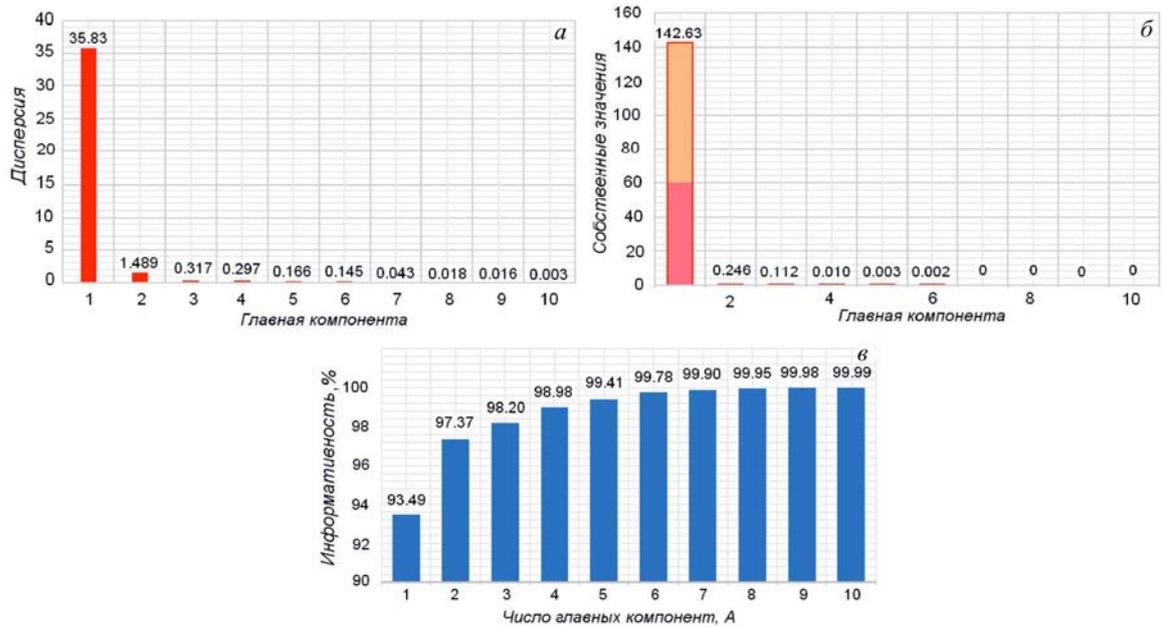


Рис. 3. Информативность преобразованных данных при увеличении числа главных компонент: а — дисперсия векторов ГК; б — собственные значения ГК; в — мера информативности преобразованных данных при увеличении числа ГК

Путем решения серии регрессий на модифицированных данных пониженной размерности находятся коэффициенты связи откликов с входными данными. Имея набор откликов и применив к ним то же преобразование, которое использовалось на обучающей выборке, можно получить набор модифицированных откликов. По коэффициентам регрессии и модифицированным откликам восстанавливаются модифицированные входные данные пониженной размерности.

Применяя к полученным данным обратное преобразование, вычисляем исходные входные данные.

Использование методов МГК, ПЛС 1 и ПЛС 2 для решения подобных задач было нами подробно рассмотрено ранее [Кузьменко, Янчуковский, 2015]. При сопоставлении результатов, полученных разными методами, сделан вывод, что лучший результат обеспечивается методом ПЛС 2. Программа The Unscrambler X [https://www.aspentech.com/ru/products/apm/aspens-unscrambler] позволяет считать методом ПЛС 2 по четырем алгоритмам. Было показано также [Янчуковский, Кузьменко, 2018], что для подобных задач алгоритм KERNEL PLS [Lindgren et al., 1993; de Jong, Ter Braak, 1994; Dayal, McGregor, 1997] является оптимальным, поскольку лучше других алгоритмов подходит для большого количества образцов — в нашем случае тысячи образцов с несколькими переменными (число образцов означает здесь число значений в рядах данных для каждой переменной).

На рис. 3 представлены результаты расчета значений дисперсий для выбранных векторов ГК, собственных значений векторов ГК и меры информативности преобразованных данных при увеличении числа ГК.

Показано, что проблема мультиколлинеарности и уменьшения размерности матрицы входных данных может быть снята переходом в пространство главных компонент. Исходя из расчетных значений

мер информативности вкладов каждой компоненты, делается оценка числа ГК, вариации исходных данных в которых содержат основную информацию (в данном случае оптимальное число ГК равно двум). На основе этой оценки строятся матрицы перехода в пространство пониженной размерности. Для уточнения выбора числа ГК используется выделенная температурная составляющая вариации $\alpha_{cm}\Delta T_{cm}$ для мюонного телескопа на поверхности с направления вертикаль.

На рис. 4 приведены распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере, найденные методом ПЛС-2 при различном числе главных компонент.

При максимальном числе ГК, равном общему числу переменных (температура на 16 изобарах), результат (кривая 5) полностью совпадает с результатом (кривая 6), полученным методом МФР. Одна

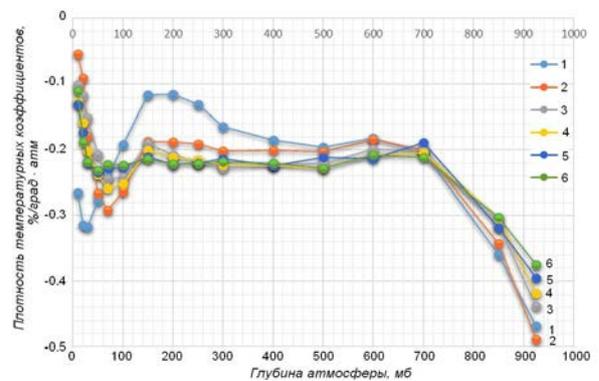


Рис. 4. Распределения плотности температурных коэффициентов для телескопа МТ00 «Вертикаль», найденные при использовании различного числа главных компонент: одной ГК — кривая 1; двух ГК — кривая 2; трех ГК — кривая 3; пяти ГК — кривая 4; 16 ГК — кривая 5; кривая 6 — результат, полученный методом МФР

Таблица 4

Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа МТ00

i	h_i , мб	00 α_i 10^{-4}	N30 α_i 10^{-4}	S30 α_i 10^{-4}	N60 α_i 10^{-4}	S60 α_i 10^{-4}	Δh_i , мб	00 w_i 10^{-3}	N30 w_i 10^{-3}	S30 w_i 10^{-3}	N60 w_i 10^{-3}	S60 w_i 10^{-3}
1	10	-8	-8	-8	-9	-9	15	-54	-53	-51	-58	-59
2	20	-10	-10	-9	-11	-11	10	-91	-94	-89	-101	-103
3	30	-28	-29	-28	-31	-32	15	-179	-184	-175	-197	-202
4	50	-56	-57	-54	-62	-63	20	-266	-273	-259	-292	-299
5	70	-61	-63	-60	-68	-69	20	-292	-300	-284	-321	-329
6	100	-125	-128	-121	-137	-140	45	-263	-270	-256	-290	-296
7	150	-99	-101	-96	-109	-116	50	-187	-192	-183	-206	-220
8	200	-99	-102	-97	-109	-112	50	-188	-193	-184	-207	-212
9	250	-101	-103	-98	-111	-113	50	-191	-196	-186	-210	-215
10	300	-160	-162	-153	-173	-178	75	-202	-204	-193	-218	-224
11	400	-211	-213	-202	-229	-234	100	-201	-203	-192	-217	-223
12	500	-214	-217	-206	-232	-239	100	-203	-206	-195	-221	-227
13	600	-194	-199	-188	-213	-219	100	-184	-189	-179	-202	-208
14	700	-317	-326	-309	-349	-359	150	-200	-205	-195	-220	-226
15	850	-361	-370	-351	-397	-406	100	-343	-352	-334	-377	-386
16	925	-257	-306	-251	-283	-290	50	-489	-502	-476	-538	-551

Таблица 5

Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа МТ07

i	h_i , мб	00 α_i 10^{-4}	N30 α_i 10^{-4}	S30 α_i 10^{-4}	N60 α_i 10^{-4}	S60 α_i 10^{-4}	Δh_i , мб	00 w_i 10^{-3}	N30 w_i 10^{-3}	S30 w_i 10^{-3}	N60 w_i 10^{-3}	S60 w_i 10^{-3}
1	10	-4	-4	-3	-4	-3	15	-23	-24	-22	-28	-21
2	20	-5	-5	-4	-6	-4	10	-42	-45	-40	-53	-39
3	30	-14	-15	-14	-18	-13	15	-90	-97	-87	-114	-80
4	50	-29	-32	-28	-37	-26	20	-140	-152	-135	-178	-123
5	70	-33	-36	-32	-42	-28	20	-158	-171	-152	-200	-135
6	100	-68	-73	-65	-86	-58	45	-143	-155	-138	-182	-123
7	150	-53	-58	-52	-68	-46	50	-102	-110	-98	-129	-87
8	200	-54	-58	-52	-68	-46	50	-102	-110	-98	-129	-87
9	250	-54	-59	-53	-69	-47	50	-103	-112	-100	-131	-89
10	300	-86	-93	-83	-109	-74	75	-109	-118	-105	-138	-93
11	400	-115	-124	-111	-146	-98	100	-109	-118	-105	-138	-93
12	500	-117	-126	-113	-148	-100	100	-111	-120	-107	-141	-95
13	600	-107	-116	-104	-136	-92	100	-102	-110	-98	-129	-87
14	700	-175	-190	-169	-222	-150	150	-111	-120	-107	-141	-95
15	850	-200	-216	-193	-254	-171	100	-190	-205	-183	-241	-163
16	925	-133	-154	-137	-181	-122	50	-271	-293	-261	-343	-232

главная компонента содержит 93 % информации, которая при двух ГК увеличивается всего на 4 %, а при трех ГК — на 0.8 % (см. рис. 3) При дальнейшем увеличении числа ГК информативность увеличивается незначительно, тогда как вероятность вклада шумов возрастает. При большом числе главных компонент метод ПЛС-2 теряет свои преимущества перед методом МФР: полученные результаты оказываются практически одинаковыми (см. рис. 4). Это подтверждает, что в данной задаче следует использовать две главных компоненты. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов, полученные методом ПЛС-2 для мюонных телескопов на поверхности (МТ00) и под землей на глубинах

7 (МТ07), 20 (МТ20) и 40 м в.э. (МТ40), приведены в табл. 4, 5, 6 и 7 соответственно.

Распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере, регистрируемых телескопами на поверхности и под землей, показаны на рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ

Интегральный температурный эффект мюонов в атмосфере, найденный с учетом распределения плотности температурных коэффициентов и с использованием коэффициента для среднемассовой температуры, должен быть одинаков в пределах, обеспеченных точностью оценки коэффициентов. Исходя

Таблица 6

Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа МТ00

i	h_i , мб	00 α_i 10^{-5}	N30 α_i 10^{-5}	S30 α_i 10^{-5}	N60 α_i 10^{-5}	S60 α_i 10^{-5}	Δh_i , мб	00 w_i 10^{-3}	N30 w_i 10^{-3}	S30 w_i 10^{-3}	N60 w_i 10^{-3}	S60 w_i 10^{-3}
1	10	-31	-31	-31	-30	-32	15	-20	-19	-20	-19	-20
2	20	-36	-36	-36	-35	-37	10	-34	-34	-35	-33	-35
3	30	-107	-105	-108	-104	-110	15	-68	-66	-68	-66	-70
4	50	-211	-207	-213	-205	-218	20	-100	-98	-101	-97	-103
5	70	-232	-228	-234	-225	-239	20	-110	-108	-111	-107	-114
6	100	-471	-462	-474	-457	-485	45	-99	-97	-100	-96	-102
7	150	-373	-365	-375	-362	-384	50	-71	-69	-71	-69	-73
8	200	-374	-367	-377	-364	-386	50	-71	-70	-72	-69	-73
9	250	-379	-372	-382	-368	-391	50	-72	-71	-73	-70	-74
10	300	-593	-581	-597	-575	-610	75	-75	-74	-76	-73	-77
11	400	-786	-770	-792	-763	-810	100	-75	-73	-75	-72	-77
12	500	-797	-782	-803	-775	-821	100	-76	-74	-76	-74	-78
13	600	-733	-718	-744	-710	-754	100	-70	-68	-71	-67	-72
14	700	-1194	-1170	-1203	-1159	-1268	150	-76	-74	-76	-73	-80
15	850	-1363	-1336	-1366	-1324	-1374	100	-129	-127	-130	-126	-130
16	925	-882	-864	-888	-856	-892	50	-167	-164	-169	-163	-169

Таблица 7

Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа МТ40

i	h_i , мб	00 α_i 10^{-5}	N30 α_i 10^{-5}	S30 α_i 10^{-5}	N60 α_i 10^{-5}	S60 α_i 10^{-5}	Δh_i , мб	00 w_i 10^{-4}	N30 w_i 10^{-4}	S30 w_i 10^{-4}	N60 w_i 10^{-4}	S60 w_i 10^{-4}
1	10	-11	-10	-10	-10	-13	15	-68	-66	-67	-62	-80
2	20	-12	-12	-12	-11	-15	10	-119	-115	-118	-109	-140
3	30	-37	-35	-37	-34	-44	15	-232	-225	-232	-215	-276
4	50	-72	-70	-72	-67	-86	20	-344	-333	-344	-319	-409
5	70	-78	-77	-80	-74	-95	20	-370	-366	-378	-350	-450
6	100	-161	-156	-161	-149	-192	45	-341	-330	-341	-315	-405
7	150	-128	-124	-128	-118	-152	50	-243	-235	-243	-225	-289
8	200	-128	-124	-128	-118	-153	50	-244	-236	-244	-226	-290
9	250	-130	-126	-130	-120	-155	50	-247	-239	-247	-229	-294
10	300	-203	-197	-203	-188	-242	75	-257	-249	-257	-238	-306
11	400	-269	-261	-269	-249	-320	100	-256	-248	-256	-237	-304
12	500	-276	-261	-275	-254	-325	100	-262	-248	-261	-241	-309
13	600	-253	-268	-253	-233	-298	100	-240	-255	-240	-221	-283
14	700	-412	-361	-412	-379	-486	150	-261	-229	-261	-240	-308
15	850	-466	-453	-467	-433	-556	100	-443	-430	-444	-411	-528
16	925	-333	-323	-333	-308	-449	50	-632	-613	-633	-586	-853

из этого, среднее значение плотности температурного коэффициента на интервале от 0 до 950 мб должно соответствовать коэффициенту для средне-массовой температуры. Результаты проверки для методов МФР и ПЛС-2 представлены в табл. 8.

На рис. 6 для сравнения показаны распределения плотности температурных коэффициентов, полученных с использованием методов МФР и ПЛС-2, для направления вертикаль мюонных телескопов МТ00 в Якутске и в Новосибирске [Янчуковский, Кузьменко, 2018].

При оценке α_i и w_i для новосибирского мюонного телескопа были использованы данные аэрологического зондирования метеостанции «Бугринская роща» (Новосибирск). Данные зондирования содержат много

пропусков, особенно в зимний период для больших высот, и представлены только для 11 изобар с периодичностью зондирования два раза в сутки. Порог геомагнитного обрезания для станции космических лучей (СКЛ) «Новосибирск» составляет 2.91 ГэВ, а для СКЛ «Якутск» — 1.65 ГэВ. Телескоп МТ00 в Якутске отличается по конструкции от мюонного телескопа в Новосибирске, не имеет экрана и обладает более широкой диаграммой направленности. Тем не менее мы наблюдаем согласие полученных результатов.

Ранее нами [Кузьменко, Янчуковский, 2017] был выполнен расчет ожидаемых значений плотности температурных коэффициентов для комплекса подземных мюонных телескопов в Якутске. Сравним полученные результаты с результатами расчетов на рис. 7,

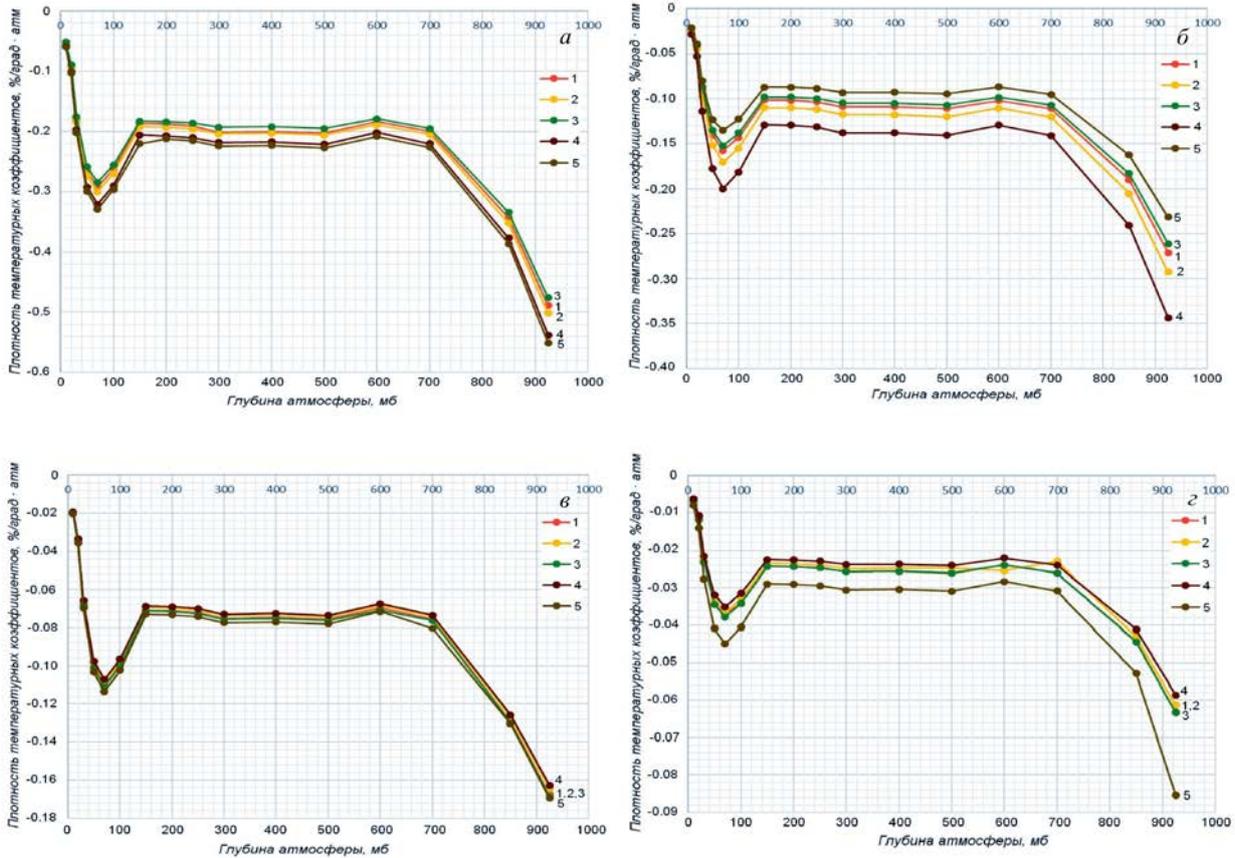


Рис. 5. Распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых на поверхности (а) и под землей на глубинах 7 (б), 20 (в) и 40 м в.э. (г) с направлений вертикаль (кривая 1), N30 (кривая 2), S30 (кривая 3), N60 (кривая 4), S60 (кривая 5)

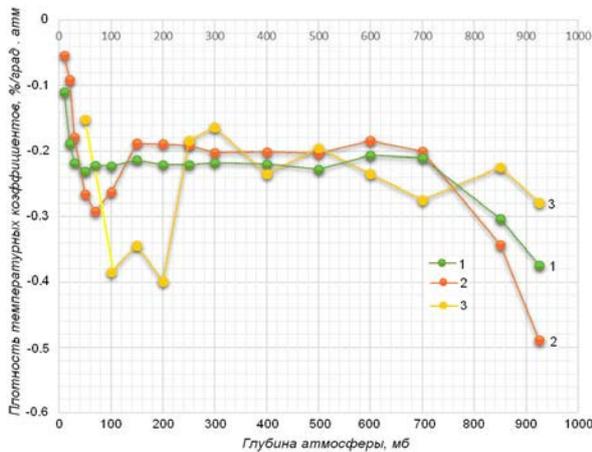


Рис. 6. Распределение плотности температурных коэффициентов в атмосфере для направлений вертикаль мюонного телескопа МТ00 в Якутске (кривая 1 — метод МФР; кривая 2 — метод ПЛС-2) и мюонного телескопа в Новосибирске (кривая 3)

где для зенитных углов 30° и 60° приведены значения, найденные как средние для направлений N30, S30 и N60, S60. На рис. 7 наблюдается удовлетворительное согласие полученных результатов с расчетными.

Полученные распределения плотности температурных коэффициентов для различных зенитных углов регистрации на каждом из уровней наблюдения различаются незначительно (кривые 1, 2, 3 на рис. 6).

Обратившись к исходным данным (рис. 1), нетрудно заметить, что амплитуды вариаций темпа счета мюонов с различных направлений мало различаются, а для уровня 20 м в.э. различий практически не наблюдается. Основной причиной этого являются геометрические параметры телескопов [Проект..., 2004; Grigoryev et al., 2011; Стародубцев и др., 2013, 2016], в которых апертуры для направления вертикаль и направлений под углом к вертикали перекрываются, а для зенитного угла в 30° перекрываются полностью. При этом апертуры телескопов имеют также зависимость от азимутального угла. Другой причиной является принцип построения системы отбора событий [Проект..., 2004], где счетчики попарно объединены в лотки (включены на один усилитель-дискриминатор). Далее в системе отбора событий (в схемах совпадений) сигналы от каждого из этих счетчиков рассматриваются автономно, причем разрешающее время в этих схемах совпадений выбрано неоправданно большое [Проект..., 2004], что приводит к большому вкладу случайных совпадений.

На рис. 8 показаны распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых с вертикали на различных уровнях под землей. Зависимость плотности температурных коэффициентов от глубины регистрации мюонов под землей проявляется отчетливо.

При регистрации мюонов с направления вертикаль происходит уменьшение в несколько раз отри-

Таблица 8

Результаты проверки для методов МФР и ПЛС-2

		00		N30		S30		N60		S60	
		МФР	ПЛС	МФР	ПЛС	МФР	ПЛС	МФР	ПЛС	МФР	ПЛС
MT00	$\overline{w_i}$	-0.226	-0.221	-0.232	-0.226	-0.231	-0.215	-0.268	-0.242	-0.302	-0.249
	α_{CM}	-0.225 ± 0.0018		-0.230 ± 0.002		-0.21 ± 0.0019		-0.245 ± 0.004		-0.251 ± 0.0045	
MT07	$\overline{w_i}$	-0.132	-0.119	-0.153	-0.129	-0.122	-0.115	-0.161	-0.151	-0.108	-0.103
	α_{CM}	-0.125 ± 0.0023		-0.134 ± 0.003		-0.120 ± 0.0031		-0.157 ± 0.0047		-0.107 ± 0.0029	
MT20	$\overline{w_i}$	-0.085	-0.082	-0.083	-0.081	-0.086	-0.083	-0.083	-0.080	-0.088	-0.085
	α_{CM}	-0.086 ± 0.0022		-0.084 ± 0.002		-0.087 ± 0.0022		-0.084 ± 0.0022		-0.088 ± 0.0022	
MT40	$\overline{w_i}$	-0.029	-0.029	-0.028	-0.028	-0.029	-0.029	-0.027	-0.027	-0.035	-0.035
	α_{CM}	-0.029 ± 0.0007		-0.029 ± 0.001		-0.029 ± 0.0008		-0.027 ± 0.0013		-0.035 ± 0.0014	

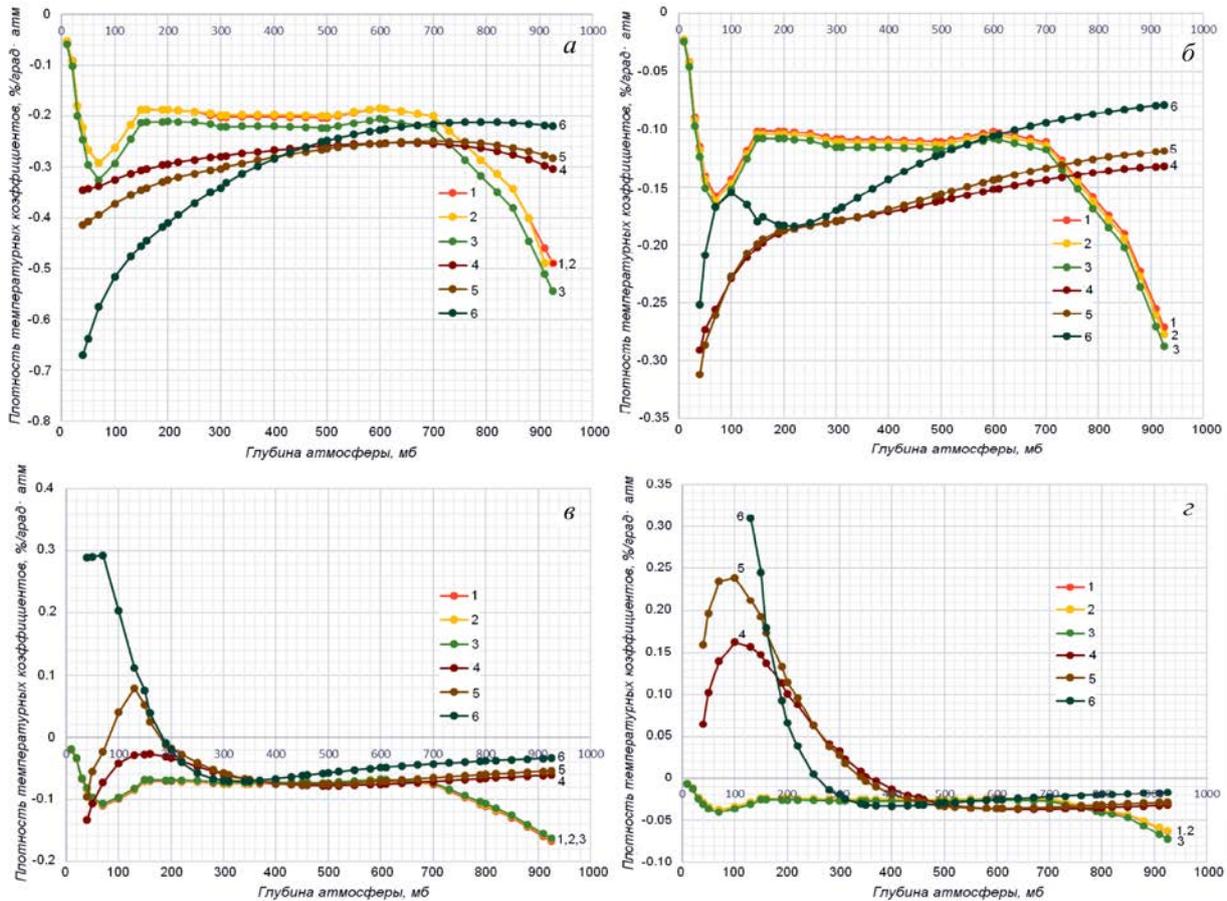


Рис. 7. Распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых под зенитными углами 0 (кривая 1), 30 (кривая 2) и 60 (кривая 3) градусов, полученных по данным непрерывных наблюдений, а также с помощью расчетов для углов 0 (кривая 4), 30 (кривая 5) и 60 (кривая 6) градусов на поверхности (а) и под землей на глубинах 7 (б), 20 (в) и 40 м в.э. (г) соответственно

цательного температурного эффекта мюонов с возрастанием глубины под землей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием данных непрерывных наблюдений мюонов и данных измерений температуры атмосферы на различных высотах найдены распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых на поверхности земли и под землей. Экспериментальная оценка распреде-

ления плотности температурных коэффициентов обычно затруднена, поскольку вариации температуры различных слоев атмосферы коррелированы. Поэтому были использованы различные методы факторного анализа. Выполнена сравнительная оценка результатов различных методов анализа. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами расчетов.

Полученные распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере позволяют учитывать существующий температурный

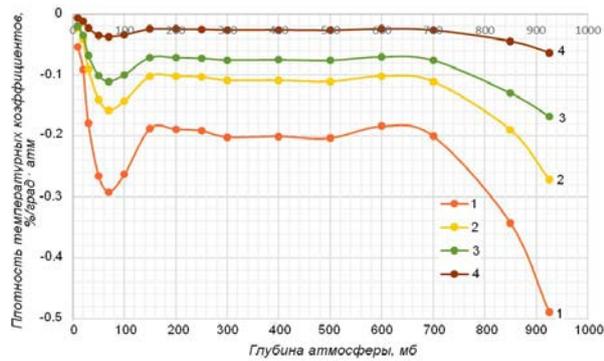


Рис. 8. Распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых с вертикали на поверхности (кривая 1) и под землей на глубинах 7 (кривая 2), 20 (кривая 3) и 40 м в.э. (кривая 4)

эффект мюонов, регистрируемых под землей. Наблюдается ярко выраженная зависимость температурного эффекта мюонов от глубины их регистрации под землей, что дает возможность диагностики термобарического режима атмосферы с помощью космических лучей.

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.ckp-rf.ru/usu/433536/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г. и др. Мюонный телескоп на сцинтилляционных счетчиках. *Приборы и техника эксперимента*. 2021. № 4. С. 65–73. DOI: [10.31857/S0032816221040042](https://doi.org/10.31857/S0032816221040042).
- Горлач Б.А. Математика. М: Наука, 2006. 911 с.
- Дмитриева А.Н., Кокоулин Р.П., Петрухин А.А., Тимашов Д.А. Температурные коэффициенты для мюонов под различными зенитными углами. *Известия РАН. Серия физическая*. 2009. Т. 73, № 3. С. 371–374.
- Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гостехиздат, 1957. 285 с.
- Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 212 с.
- Дорман Л.И., Янке В.Г. К теории метеорологических эффектов космических лучей. *Известия АН СССР. Серия физическая*. 1971. Т. 35, № 12. С. 2556–2570.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831 с.
- Кузьменко В.С., Янчуковский В.Л. Определение плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере. *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 2. С. 91–96. DOI: [10.12737/10403](https://doi.org/10.12737/10403).
- 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).

Померанцев А.Л. Хемометрика в Excel: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2014. 435 с.

Проект модернизации «Спектрограф космических лучей». Якутск: ИКФИА СО РАН, 2004. 37 с.

Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Исаков Д.Д. и др. Модернизация Якутского спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина. *Физика Солнца и околоземного пространства. Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова*. Иркутск, 2013. Секция III. 2013. С. 289–293.

Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю. Якутский спектрограф космических лучей им. А.И. Кузьмина: современное состояние. *Сборник трудов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19–23 сентября 2016 г., Мурманск*. Полярный геофизический институт, 2016. С. 125–129.

Эсбенсен К. *Анализ многомерных данных. Избранные главы*. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 160 с.

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).

Berkova M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. Temperature effect of the muon component of cosmic ray and practical possibilities of its accounting. *Proceedings of the 21st ECRC*. 2008. P. 123–126.

Dayal B.S., McGregor J.F. Improved PLS Algorithms. *J. Chemometrics*. 1997. Vol. 11. P. 73–85. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-128X\(199701\)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-128X(199701)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-%23).

de Jong S., Ter Braak C. Comments on the PLS kernel algorithm. *J. Chemometrics*. 1994. Vol. 8. P. 169–174.

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Krymsky G.F., et al. Modern Yakutsk Cosmic Ray Spectrograph after A.I. Kuzmin. *Proc. 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing*. 2011. Vol. 11. P. 252–255. DOI: [10.7529/ICRC2011/V11/0360](https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V11/0360).

Lindgren F., Geladi P., Wold S. The kernel algorithm for PLS. *J. Chemometrics*. 1993. Vol. 7. P. 45–59. DOI: [10.1002/chem.1180070104](https://doi.org/10.1002/chem.1180070104).

Gorban A.N., Kegl B., Wunsch D., Zinovyev A.Y. *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction*. Springer, 2007. 340 p. (Lecture Notes in Computational Science and Engineering, vol. 58).

Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. New York: Springer, 2002. 488 p. (Springer Series in Statistics).

URL: <https://ikfia.ysn.ru/data/heclab/mt> (дата обращения 10 февраля 2023 г.).

URL: <https://ikfia.ysn.ru/data/heclab/ipm> (дата обращения 10 февраля 2023 г.).

URL: <http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin> (дата обращения 10 февраля 2023 г.; доступ для зарегистрированных пользователей).

URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs> (дата обращения 10 февраля 2023 г.).

URL: <https://www.aspentech.com/ru/products/apm/aspenscrambler> (дата обращения 10 февраля 2023 г.).

URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/433536/> (дата обращения 10 февраля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Янчуковский В.Л. Температурный эффект мюонов, регистрируемых под землей в Якутске с помощью телескопов на газоразрядных счетчиках. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 60–70. DOI: [10.12737/szf-92202307](https://doi.org/10.12737/szf-92202307).