

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРОВ ТАШКЕНТ И АЛМА-АТА

П.Г. Кобелев¹, Ю.Б. Хамраев², В.Г. Янке¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской Академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия kobelev@izmiran.ru

² Узбекско-Финский пединститут, Самарканд, Узбекистан

EXPERIMENTAL EVALUATION OF BAROMETRIC EFFECT OF THE NEUTRON COMPONENT OF COSMIC RAYS ACCORDING TO THE TASHKENT AND ALMA-ATA DETECTORS

P.G. Kobelev¹, Y.B. Hamraev², V.G. Yanke¹

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Troitsk, Russia, kobelev@izmiran.ru

² Uzbek-Finnish Pedagogical Institute

Аннотация. Целью работы является оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей для низкоширотных станций Ташкент и Алма-Ата, включая периоды максимально высокой солнечной активности. Разработанная методика применима для обработки данных любых детекторов Мировой сети нейтронных супермониторов. В результате получены среднегодовые барометрические коэффициенты нейтронной компоненты на станциях Ташкент и Алма-Ата.

Ключевые слова: Нейтронный монитор, барометрический эффект.

Abstract. The purpose of this work is to assess the barometric effect of the neutron component of cosmic rays for the low-latitude stations Tashkent and Alma-Ata, including periods of maximum solar activity. The developed technique is applicable for processing data from any detectors of the World Network of Neutron Supermonitors. As a result, the average annual barometric coefficients of the neutron component at the Tashkent and Alma-Ata stations were obtained.

Keywords: Neutron monitor, barometric effect.

ВВЕДЕНИЕ

При мониторинге космического излучения одновременно наблюдаются вариации различных типов — атмосферного, магнитосферного и первичного происхождения [Дорман, 1957]. Современный подход состоит в формировании полной модели вариаций, учитывающей все типы вариаций, характерных для рассматриваемого детектора. Для нейтронных детекторов в модель входят вариации первичного и атмосферного происхождения [Дорман, 1957]. На интенсивность нейтронной компоненты в основном влияют барометрический эффект и эффект влажности воздуха. Отрицательный барометрический эффект обусловлен поглощением нейтронной компоненты в атмосфере. Отрицательный эффект влажности обусловлен замедлением нейтронов ядрами водорода водяного пара в толще атмосферы и переходом нейтронов в область энергии ниже порогового значения нейтронного супермонитора [Natton, Carmichael, 1964]. В настоящее время в большинстве случаев коррекция данных нейтронных супермониторов ограничивается только поправкой на барометрический эффект. В работе [Янчуковский и др., 2024] исследовался вклад влажности воздуха в приближении приземного слоя с постоянной влажностью в изменения интенсивности нейтронной компоненты.

Целью данной работы является оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей на примере станций Ташкент и Алма-Ата. Работа базировалась на часовых данных непрерывного мониторинга нейтронной компоненты

за период 1975–1992 гг. на станции Ташкент и 1973–2023 гг. на станции Алма-Ата и на данных локальных метеостанций.

В настоящей работе невозможно было учесть влияние влажности воздуха даже в приближении приземного слоя, поскольку для станций Алма-Ата и Ташкент отсутствуют данные о влажности воздуха и приземной температуры в рассматриваемый период.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И КОРРЕКЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Измеренную нейтронным супермонитором скорость счета необходимо исправить на барометрический и на эффект влажности воздуха. Для оценки исправленной скорости счета детектора N_C необходимо измеренную скорость счета N_U детектора привести к среднему атмосферному давлению P_0 и к стандартным атмосферным условиям (20° С, 50 %) при которых значение абсолютной влажности воздуха равно $H_0 = 8.7 \text{ г/м}^3$. При известном барометрическом коэффициенте $\beta > 0$ и коэффициенте влажности $\varepsilon > 0$, исправленная на эти эффекты скорость счета равна

$$N_C^i = N_U^i \exp[-\beta(P_0 - P^i)] \times [1 - \varepsilon(H_0 - H^i)] / (I_E^i / I_{Base}^i). \quad (1)$$

В последнем выражении P^i и H^i часовые значения атмосферного давления на уровне наблюдения и эффективные значения абсолютной влажности воздуха, учитывающее высотное распределение влажности в атмосфере [Zreda et al., 2012; Kobelev et al., 2021]. Из данных наблюдений следует также

исключить ожидаемые для данного детектора вариации космических лучей первичного происхождения, что отражает последний множитель уравнения (1), который, по определению, связан с ожидаемыми вариациями v_E первичного происхождения как $(I_E/I_{Base})^{-1} = (1 + v_E)^{-1} \cong (1 - v_E)$. Ожидаемые вариации связаны через вариации опорного детектора как $v_E = \delta v_S$. Логарифмируя выражение (1) и раскладывая в ряд Тейлора-Маклорена по малому параметру z логарифмы $\ln(1 \pm z) \cong \pm z$, мы приходим к линейному выражению

$$\ln N_U = \ln N_C + \beta(P_0 - P) + \varepsilon(H_0 - H) + \delta v_S, \quad (2)$$

т.е. поправки вычитаются из вариаций неисправленной скорости счета детектора. В итоге получаем систему линейных уравнений регрессии. Число уравнений определяется длиной исследуемого ряда данных и на практике достигает 10^4 . В качестве опорного детектора для детекторов Ташкент и Алма-Ата можно привлечь нейтронный монитор Рим.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные параметры рассматриваемых нейтронных детекторов Ташкент и горной станции Алма-Ата и параметры опорного детектора приведены в табл. 1. Мы располагаем полным набором данных (неисправленные и давление) только для 1991–1992 гг.

Таблица 1.

Основные параметры нейтронных детекторов

	λ°	φ°	Rc (1987), GV	h, м	P_0 , mb	N , pps
Ташкент	41.20	69.37	7.199	565	960	132
Алма-Ата	43.25	76.92	6.428	3340	675	1335

Нами построена многофакторная модель вариаций космических лучей (2) для оценок и объяснения роли привлекаемых факторов β и δ и для исследования их взаимосвязи. Результат приведен ниже в табл.2 и табл.3.

Таблица 2.

Корреляционная матрица для нейтронных супермониторов Алма-Ата (вверх) и Ташкент (низ).

	P	v_S	N_u
P	1	0.096	0.574
v_S		1	0.849
N_u			1

	P	v_S	N_u
P	1	-0.372	0.512
v_S		1	0.588
N_u			1

Результат регрессионного анализа для нейтронных супермониторов Алма-Ата и Ташкент.

	N , pps	R^2	σ_ε , %	$a_0 \pm 1$	$\beta \pm 0.016$, %/hPa	$\mu \pm 1$, г/см ²	$\delta \pm 0.014$, %/%	cond
Алма-Ата	1335	0.966	1.16	1223	0.668	155	1.126	125
Ташкент	132	0.967	0.98	117	0.686	151	1.096	213

Как следует из табл. 2, что ожидаемо, не наблюдается (<0.5) взаимной корреляции между исследуемыми параметрами P и v .

При проведении регрессионного анализа установлены коэффициент детерминации и коэффициенты регрессии линейной системы уравнений (2) и их ошибки. Результат сведен в табл. 3. Качество модели, например, для Ташкента характеризует параметр $R^2=0.972$, откуда следует, что 97 % вариаций объясняется построенным регрессионным уравнением, и только 3 % объясняется неучтенными нами факторами и ошибками. Коэффициенты регрессии также приведены в табл. 3.

В табл. 3 приведено число обусловленности cond, которое выступает в качестве теста на мультиколлинеарность системы уравнений (в нашем случае 16000 уравнений) и определяет чувствительность выходной функции к изменениям на входе; в идеальном случае $\text{cond}=1$, в нашей практике несколько сотен. Также в ней приведен пробег для поглощения $\mu=1/\beta$.

На рис. 1 приведены диаграммы рассеяния для среднесуточных значений параметров. В верхней части рисунка показаны зависимости освобожденной от первичных вариаций скорости счета от атмосферного давления, в нижней части – исправленные на атмосферное давление зависимости скорости счета от первичных вариаций. Статистическая точность детектора выше статистики Алма-Ата по сравнению со станцией Ташкент. Однако построенная модель для станции Алма-Ата работает несколько хуже. Следовательно, в модели не были учтены некоторые факторы. Возможно, что это эффект снега в осенне-весенний период, коррекция которого требует специального подхода [Кобелев и др., 2022].

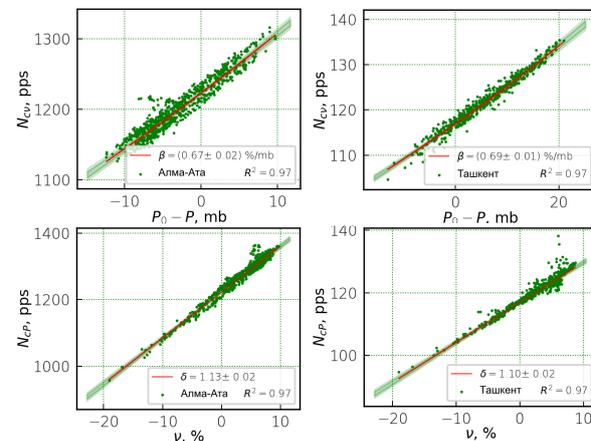


Рис. 1. Диаграммы рассеяния, формируемые при анализе данных детекторов Алма-Ата (слева) и Ташкент (справа) для периода 1991–1992 гг.

Таблица 3.

ВЫВОДЫ

1) Разработана линейная трехпараметрическая модель вариаций космических лучей, учитывающая все характерные для нейтронной компоненты типы вариаций.

2) Барометрический коэффициент определяется с хорошей точностью и для Ташкента равен 0.666 ± 0.016 %/hPa. Коэффициент вклада первичных вариаций близок к единице и равен 1.096 ± 0.014 %/‰.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гос-техиздат, 1957. с. 285.

Кобелев П.Г., Трефилова Л.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Метод коррекции данных нейтронных мониторов на эффект снега // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62, № 6. Р. 737–742. <https://doi.org/10.31857/S0016794022060086>

Янчуковский В.Л., Калужная М.А., Хисамов Р.З. Интенсивность нейтронной компоненты космических лучей и влажность воздуха. Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 1. С. 37–43. <https://doi.org/10.12737/szf-101202405>.

Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 Neutron monitor. Canadian Journal of Physics. 1964. V. 42. P. 2443–2472. <https://doi.org/10.1139/p64-222>

Kobelev P.G., Dorman L.I., Trefilova L.A., Belov S.M., Yanke V.G. Monitoring of the thickness of the snow cover based on the neutron component data of cosmic rays // Proc. 37th ICRC. Berlin. PoS(ICRC2021)282. 2021. <https://pos.sissa.it/395/282/pdf>

Zreda, M., W. J. Shuttleworth, X. Xeng, C. Zweck, D. Desilets, T. E. Franz, R. Rosolem, and P. A. Ferre (2012), COSMOS: The Cosmic-ray Soil Moisture Observing System, Hydrol. Earth Syst. Sci. 9, 4505–4551. 2012. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-4505-2012> .