

**АНАЛИЗ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ СРЕДНЕШИРОТНЫХ СТАНЦИЙ****ANALYSIS OF METEOROLOGICAL EFFECTS OF COSMIC RAY
NEUTRON COMPONENT BASED ON DATA FROM MIDLATITUDE STATIONS****П.Г. Кобелев***Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, kobelev@izmiran.ru***Ю.Б. Хамраев***Узбекско-Финский пединститут,
Самарканд, Узбекистан, yu-hamrayev@mail.ru***В.Г. Янке***Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, yanke@izmiran.ru***P.G. Kobelev***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere
and Radiowave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, kobelev@izmiran.ru***Yu.B. Hamraev***Uzbekistan-Finland Pedagogical Institute,
Samarkand, Uzbekistan, yu-hamrayev@mail.ru***V.G. Yanke***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere
and Radiowave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, yanke@izmiran.ru*

Аннотация. Для исследования вариаций космических лучей эффективными являются прецизионные нейтронные мониторы, обеспечивающие непрерывный мониторинг со статистической точностью $\sim 0.15\%$ /ч, поэтому вклады других источников ошибок не должны превышать вклад этой статистической ошибки. К таким возможным источникам, в первую очередь, относятся изменения давления и влажности. Целью работы является оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей для низкоширотных станций «Ташкент» и «Алма-Ата» (горная), включая периоды максимальной высокой солнечной активности. Разработанная на основе многофакторного корреляционного анализа методика применима для обработки данных любых детекторов мировой сети нейтронных мониторов. В результате получены среднегодовые барометрические коэффициенты нейтронной компоненты на ст. «Ташкент» и «Алма-Ата». Для среднеширотной станции «Москва» оценен также эффект влажности. В результате исследования можно сделать вывод, что рассматриваемый подход позволяет эффективно решить поставленную задачу.

Ключевые слова: нейтронный монитор, барометрический коэффициент, жесткость обрезания.

Abstract. Precision neutron monitors providing continuous monitoring with a statistical accuracy of $\sim 0.15\%$ /hr are effective for studying cosmic ray variations; therefore, contributions from other error sources should not exceed the contribution of this statistical error. Such possible sources primarily include changes in atmospheric pressure and humidity. The aim of the work is to estimate the barometric effect of the neutron component of cosmic rays for the low-latitude stations Tashkent and Alma-Ata (mountain), including periods of maximum solar activity. The technique developed on the basis of multifactor correlation analysis is applicable to processing data from any detectors of the worldwide network of neutron monitors. As a result, we have obtained annual average barometric coefficients of the neutron component at the stations Tashkent and Alma-Ata. The humidity effect was also estimated for the mid-latitude station Moscow. The study draws the conclusion that the approach considered can effectively solve the problem.

Keywords: neutron monitor, barometric coefficient, cutoff rigidity.

ВВЕДЕНИЕ

При мониторинге космического излучения одновременно наблюдаются вариации различного происхождения — атмосферные, магнитосферные и гелиосферные [Дорман, 1957]. Амплитуды этих вариаций имеют один порядок. Действительно, атмосферные (барометрический) вариации — до $\sim 20\%$, магнитосферные — до $\sim 5\%$, гелиосферные (форбуш-понижение) — до $\sim 20\%$. Один из подходов при исследовании вариаций космических лучей (КЛ) одного типа состоит в подборе периодов, в которых вариациями других типов можно пренебречь. Такой подход во многом субъективен, поскольку отбор данных

для исследований вариаций КЛ часто приходится проводить интуитивно. Кроме того, изменения метеорологических параметров на низкоширотных станциях существенно меньше (например, атмосферное давление варьирует ~ 5 мб), чем на высокоширотных станциях (до ~ 40 мб). В таких случаях при построении математических моделей вариаций КЛ требуется использовать более длинные ряды данных для обеспечения требуемой точности.

Другой подход состоит в формировании модели вариаций КЛ в атмосфере, в которой учитываются все характерные для рассматриваемого детектора типы вариаций и исключаются другие типы. В нашем

случае — вариации гелиосферного и магнитосферного происхождения. Для нейтронной компоненты в математическую модель атмосферных вариаций включаются те, которые обусловлены барометрическим эффектом и эффектом влажности воздуха. В особых случаях, включаются также вариации, обусловленные незначительным (температурный коэффициент составляет $<0.01\%$ / °C) температурным эффектом. Отрицательный барометрический эффект обусловлен поглощением нейтронной компоненты в атмосфере, отрицательный эффект влажности — замедлением нейтронов ядрами водорода водяного пара в толще атмосферы и переходом нейтронов в область энергий ниже энергетического порога регистрации нейтронного монитора (НМ) [Natton et al., 1964].

Работ по оценке атмосферных эффектов КЛ выполнено много — для каждого нового детектора проводилась оценка эффектов с определением соответствующих коэффициентов [Simpson, 1957; Carmichael, Bergovitch, 1969]. Далее отметим несколько работ, в которых исследовалась зависимость барометрического эффекта от эффективной энергии частиц при широтных измерениях и уровня солнечной активности, а также работ, в которых была выполнена оценка вклада изменений абсолютной влажности воздуха в наблюдаемые вариации нейтронной компоненты.

В работах [Дорман, 1972; Moraal et al., 1989; Iucci et al., 2000; Nuntiyakul et al., 2014] по данным морских широтных измерений исследована зависимость барометрического эффекта от жесткости геомагнитного обрезания по маршруту следования судна. В [Янчуковский и др., 1976; Янчуковский, Филимонов, 1997; Yanchukovsky, Philimonov, 1997; Kobelev, Belov, 2011] для 22–23-го циклов солнечной активности для ряда станций вычислен временной ход барометрического коэффициента нейтронной компоненты КЛ. При анализе данных для определения барометрического коэффициента исключались первичные вариации КЛ, что позволило привлечь непрерывный ряд данных за весь исследуемый период. В [Paschalis et al., 2013] дано описание метода и созданного онлайн-приложения для расчета барометрического коэффициента для НМ мировой сети [<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/data/nm-barometric-coefficient>]. В настоящее время во всех случаях коррекция данных НМ ограничивается только поправкой на барометрический эффект. В [Янчуковский и др., 2024] исследовался вклад влажности воздуха в приближении приземного слоя, хотя эффект влажности распределенный и в этом приближении для получения высотного распределения влажности задача может быть решена с привлечением модели атмосферы. Сделанные оценки эффекта влажности свидетельствуют о необходимости его регулярного учета при обработке данных НМ.

Барометрические коэффициенты для НМ «Ташкент» и «Алма-Ата», которые ранее использовались для всего периода наблюдений, составляют 0.71 и 0.72 %/мб соответственно, а точность — не хуже $\pm 0.01\%$ /мб. Период, для которого были определены коэффициенты, достоверно установить невозможно, поскольку в базах данных [<https://www.nmdb.eu/>

station/] он не указывается, но барометрические коэффициенты, как правило, вычислялись для минимума солнечной активности.

Целью настоящей работы является оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты КЛ на примере низкоширотных станций «Ташкент» и «Алма-Ата», включая период очень высокой солнечной активности. К сожалению, в работе невозможно учесть влияние влажности воздуха даже в приближении приземного слоя, поскольку для ст. «Алма-Ата» и «Ташкент» отсутствуют данные по влажности и приземной температуре воздуха в рассматриваемый период. Другой задачей является оценка эффекта влажности для ст. «Москва», для которой имеются данные метеорологического мониторинга. Это позволит провести верхнюю оценку вклада эффекта влажности для станций с резко континентальным климатом.

МЕТОД АНАЛИЗА И КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ НА АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Измеренную нейтронным детектором скорость счета необходимо исправить на барометрический эффект и эффект влажности воздуха. Третий эффект атмосферного происхождения (температурный) для нейтронной компоненты практически отсутствует. Действительно, обусловленные температурным эффектом вариации нейтронной компоненты, состоящей преимущественно из стабильных частиц, более чем на два порядка (температурный коэффициент менее 0.01% / °C) меньше вариаций КЛ, обусловленных барометрическим эффектом [Дорман, 1957; Belov et al., 1995].

Для оценки исправленной скорости счета детектора N_c необходимо измеренную скорость счета N_u детектора привести к среднему атмосферному давлению P_0 и среднему значению абсолютной влажности воздуха H_0 (для температуры $20\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 50% $H_0=8.7\text{ г/м}^3$). При известном барометрическом коэффициенте $\beta>0$ и коэффициенте влажности $\varepsilon>0$ исправленная на эти эффекты скорость счета

$$N_c = N_u \exp[-\beta(P_0 - P)] \times [1 - \varepsilon(H_0 - H_2)]. \quad (1)$$

Здесь N_c , N_u , P и H_2 — часовые значения скоростей счета, атмосферного давления на уровне наблюдения и эффективные значения абсолютной влажности воздуха, учитывающие высотное распределение влажности в атмосфере [Zreda et al., 2012; Kobelev et al., 2021]. В (1) для переменных N_c , N_u , P и H_2 индекс времени опущен.

Относительная влажность воздуха h_2 (на высоте 2 м) определяется экспериментально, а абсолютная [Калинин, 2023]

$$H_2(t) = h_2(t) H_0(t),$$

где $h_2(t)$ — измеренная относительная влажность воздуха (%) при температуре воздуха $t_2\text{ }^\circ\text{C}$, а $H_0(t)$ — максимальная абсолютная влажность воздуха при данной температуре

$$H_0(t) = \frac{18.02P_{100}}{8.314(273.15 + t_2)} \left[\text{г/м}^3 \right].$$

Здесь давление насыщенного до 100 % пара P_{100} определяется формулой Бака [Buck, 1981]

$$P_{100} = 6.112 \exp\left(\frac{17.67t_2}{t_2 + 243.5}\right) \left[\text{мб} \right].$$

Если барометрический коэффициент β и коэффициент влажности ε для введения поправок необходимо еще предварительно определить по наблюдаемым вариациям скорости счета N_u , то из данных наблюдений следует исключить также ожидаемые для данного детектора вариации КЛ первичного происхождения, что можно сделать для системы уравнений

$$N_c = N_u \exp[-\beta(P_0 - P)] \times \left[1 - \varepsilon(H_0 - H_2) \right] / (I_E / I_{\text{base}}). \quad (2)$$

Второй множитель учитывает экспоненциальное поглощение частиц, третий — линейное изменение потока частиц в зависимости от абсолютной влажности воздуха, четвертый — учет первичных вариаций КЛ.

В последнем выражении I_E / I_{base} — относительная скорость счета опорного детектора относительно базового периода, которая, по определению, связана с ожидаемыми вариациями v_E первичного происхождения как $(I_E / I_{\text{base}})^{-1} = (1 + v_E)^{-1} \cong (1 - v_E)$. В приближении нулевой гармоники ожидаемые на данном детекторе амплитуды вариаций v_E пропорциональны вариациям КЛ ближайшего опорного детектора v_s , т. е. $v_E = \delta v_s$. Коэффициент $\delta = C_0 / C_s$ (коэффициент ожидаемых вариаций КЛ) определяется отношением приемных коэффициентов рассматриваемого и опорного НМ [Kobelev et al., 2021], т. е., зная вариации опорного детектора v_s можно в приближении нулевой гармоники получить ожидаемые вариации $v = \delta v_s$. При этом нет необходимости вычислять приемные коэффициенты, требуется только экспериментально определить коэффициент δ , обходя проблему задания спектра вариаций КЛ. Тогда

$$N_c = N_u \exp[-\beta(P_0 - P)] \times \left[1 - \varepsilon(H_0 - H_2) \right] \times (1 - \delta v_s) = N_u f_P f_H f_v. \quad (3)$$

Логарифмируя выражение (3) и раскладывая в ряд Тейлора—Маклорена по малому параметру z логарифмы $\ln(1 \pm z) \cong \pm z$, мы переходим к линейному выражению

$$\ln N_c = \ln N_u - \beta(P_0 - P) - \varepsilon(H_0 - H_2) - \delta v_s, \quad (4)$$

т. е. поправки вычитаются из вариаций неисправленной скорости счета детектора. В итоге получаем систему линейных уравнений регрессии относительно параметров $a_0 = \ln N_c$, β , ε и δ

$$\ln N_u = \ln N_c + \beta(P_0 - P) + \varepsilon(H_0 - H_2) + \delta v_s + \sigma_\varepsilon, \quad (5)$$

где σ_ε — случайная ошибка уравнения регрессии. Число уравнений определяется длиной исследуемого ряда данных и на практике достигает 10^4 . В качестве опорного детектора для детекторов «Ташкент» и «Алма-Ата» был использован НМ «Рим». Коррекцию данных для известных β и ε следует провести на основе выражения (1). Если же необходимо определить β , ε и δ , задача решается на основе уравнений регрессии (5).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе привлекались:

1. Данные НМ 18-NM-64 ст. «Ташкент», «Алма-Ата» и опорной станции «Рим» [<http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm>] и данные атмосферного давления локальных метеостанций. Жесткость геомагнитного обрезания близка для всех детекторов и дана в табл. 1 [<https://crst.izmiran.ru/cutoff>].
2. Данные НМ 24-NM-64 ст. «Москва» и данные опорной станции «Новосибирск» [<http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm>] для оценки роли эффекта влажности. Данные приземной температуры и относительной влажности воздуха получены с метеостанции Vaisala WXT530 [<http://www.awsgroup-msk.cugms.ru:27416/aws-group.rmp/>], расположенной в ИЗМИРАН.

Основные параметры рассматриваемых нейтронных детекторов «Ташкент» (Институт геологии и сейсмологии Республики Узбекистан) и горной станции «Алма-Ата» (Институт ионосферы Республики Казахстан) и параметры опорного детектора даны в табл. 1. Период работы НМ «Алма-Ата» — с 1973 г. по настоящее время, но данные по давлению доступны только с 1991 г. Период работы НМ «Ташкент» — 1976–1992 гг., но, к сожалению, данные по давлению имеются только для 1991–1992 гг. Таким образом, мы располагаем полным набором данных (неисправленные и давление) для рассматриваемых станций только для 1991–1992 гг. Однако этот период очень интересен максимальной с начала космической эры активностью Солнца. В табл. 1 приведены также параметры опорного НМ для оценки ожидаемых вариаций КЛ. Данные всех детекторов доступны в архиве данных [<http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm>]. Входными данными модели атмосферных вариаций являются N_u (левая шкала) и P (правая шкала), которые показаны на рис. 1, а, б.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами построена многофакторная модель атмосферных вариаций КЛ (5) для оценок и объяснения роли привлекаемых факторов β , ε и δ и их взаимосвязи. Однако из-за отсутствия данных по влажности воздуха для ст. «Ташкент» и «Алма-Ата» рассматривалась только двухфакторная модель. Результат приведен в табл. 2, 3.

Как следует из табл. 2, взаимной корреляции между исследуемыми параметрами P и v не наблюдается (<0.3), что ожидаемо.

При проведении регрессионного анализа установлены коэффициент детерминации и коэффициенты

Таблица 1

Основные параметры нейтронных детекторов

	λ°	φ°	R_c (1987), ГВ	h , м	P_0 , мб	N , c^{-1}
«Ташкент»	41.20	69.37	7.199	565	960	132
«Алма-Ата»	43.25	76.92	6.428	3340	675	1335
«Рим»	41.90	12.52	6.236	60	1009	131

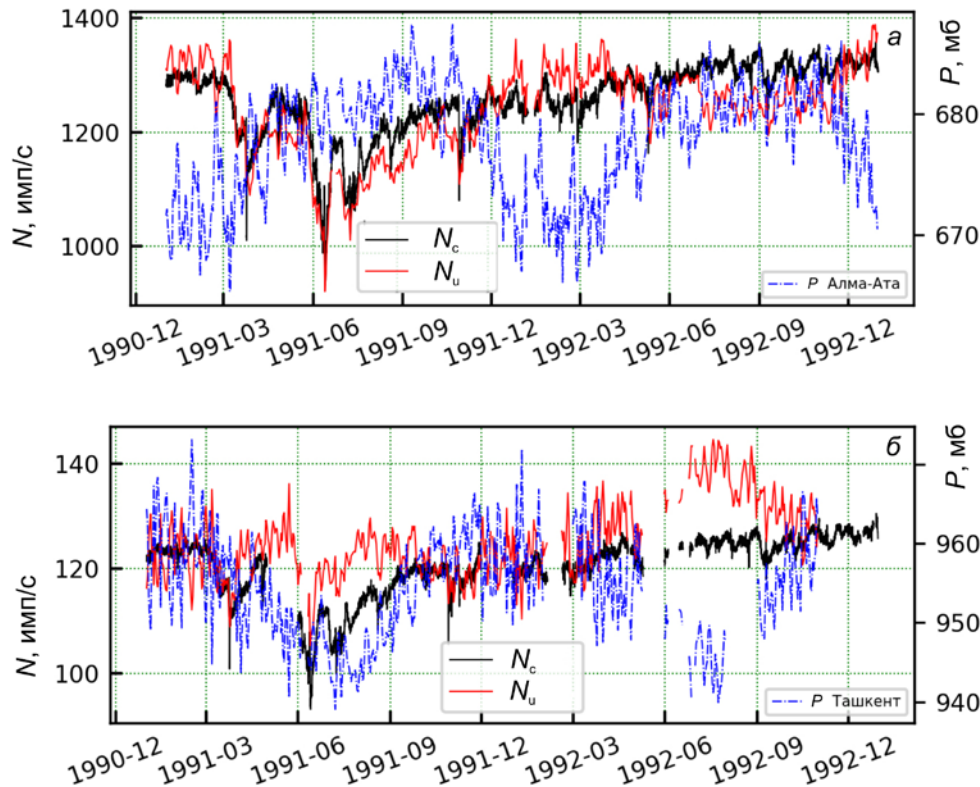


Рис. 1. Временные изменения измеренной N_u и скорректированной на барометрический эффект N_c (левая шкала) скорости счета и изменения атмосферного давления (правая шкала) на ст. «Алма-Ата» (а) и «Ташкент» (б) для 1991–1992 гг. Корректировка на барометрический эффект проводилась авторами данных по собственным барометрическим коэффициентам

Таблица 2

Корреляционная матрица для нейтронных мониторов

ст. «Алма-Ата»			ст. «Ташкент»		
	P	N_u		P	N_u
P	1	0.096	P	1	-0.372
v_s		0.849	v_s		0.588
N_u		1	N_u		1

Таблица 3

Результат регрессионного анализа для нейтронных мониторов «Алма-Ата» и «Ташкент»

	N , c^{-1}	R^2	σ_e , %	$a_0 \pm 1$	$\beta \pm 0.016$, %/мб	$\mu \pm 1$, 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

регрессии линейной системы уравнений (5) и их ошибки. Результат сведен в табл. 3. Качество модели характеризует параметр R^2 ; для Ташкента коэффициент регрессии $R^2=0.972$, т. е. 97 % вариаций КЛ объясняется построенным регрессионным уравнением и только 3 % объясняется неучтенными нами

факторами и ошибками. Коэффициенты регрессии также даны в табл. 3.

В табл. 3 приведено число обусловленности $cond$, которое выступает в качестве теста на мультиколлинеарность системы уравнений и определяет чувствительность выходной функции к изменениям на входе

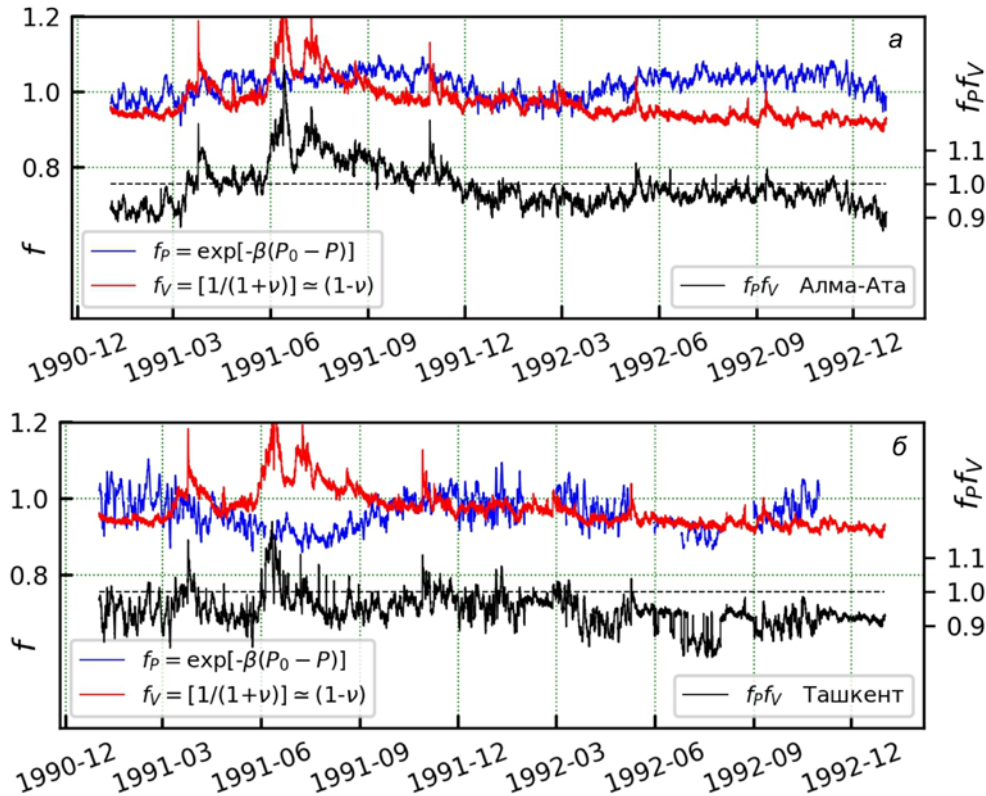


Рис. 2. Временное изменение корректирующих множителей уравнения (3) для ст. «Алма-Ата» (а) и «Ташкент» (б)

(при возмущении правой части уравнения на δX , левая часть изменится не более $\delta Y = cond \delta X$). В идеальном случае $cond=1$, в нашей практике — несколько сотен, что является показателем достаточно хорошей обусловленности системы. Также приведен пробег для поглощения, определяемый как $\mu = 1/\beta$.

На рис. 2 приведены корректирующие множители уравнения (3) для ст. «Алма-Ата» и «Ташкент» для 1991–1992 гг. Корректирующие множители атмосферного давления f_p и первичных вариаций КЛ f_v меняются в пределах 0.9–1.1, выходя за них только при больших изменениях атмосферного давления или при больших значениях первичных вариаций КЛ.

На рис. 3 показаны диаграммы рассеяния для среднесуточных значений параметров. Вверху показаны зависимости освоенной от первичных вариаций скорости счета от атмосферного давления, внизу — исправленные на атмосферное давление зависимости скорости счета от первичных вариаций КЛ. В каждом случае кроме облака рассеяния показаны также линии регрессии и соответствующие коридоры ошибок шириной 1σ и 2σ . Изменения скорости счета антикоррелируют с изменениями атмосферного давления, при этом полагаем $\beta > 0$, а знак определяет множитель $P_0 - P$.

Статистика детектора «Алма-Ата» лучше, чем ст. «Ташкент», однако построенная модель атмосферных вариаций для ст. «Алма-Ата» работает несколько хуже. Следовательно, в модели не были учтены некоторые факторы. Это, возможно, эффект влажности воздуха, который на горных станциях может быть значительным. Последнее подтверждается табл. 3,

из которой следует, что среднеквадратичная ошибка модели σ_e в 1.5 раза больше для ст. «Алма-Ата». Однако возможно также, что это эффект снега в осенне-весенний период, коррекция которого требует специального подхода [Кобелев и др., 2022]. На диаграмме рассеяния рис. 3 это проявляется в виде регулярного ухода группы точек далеко за пределы 3σ .

На нижних панелях показаны зависимости исправленных на атмосферное давление скоростей счета детекторов от первичных вариаций КЛ. Видно, что коэффициент регрессии в обоих случаях $\delta \sim 1$, что свидетельствует о сильном влиянии независимой переменной ν (вариации опорного детектора, обусловленные первичными вариациями) и характеризует степень значимости этого фактора для повышения точности модели.

На рис. 4 приведены гистограммы скоростей счета детекторов для двух рассматриваемых станций, которые позволяют наглядно представить тенденции изменения измеряемых параметров и зрительно оценить закон их распределения. Распределение N_u может иметь любую форму, поскольку оно обычно сильно модулировано. Видно, что распределение исправленной на атмосферное давление скорости счета N_{cP} более узкое. Следует ожидать, что распределение скорости счета $N_{cP\nu}$, скорректированной на все типы вариаций КЛ, заложенные в модели, в остатке имеет форму нормального распределения. Это хорошо видно на правых панелях рис. 3. Для высокогорного НМ «Алма-Ата» (см. рис. 4, а) гистограмма скорости счета $N_{cP\nu}$, исправленная на атмосферное давление и первичные вариации КЛ, незначительно смещена влево, что связано с влиянием

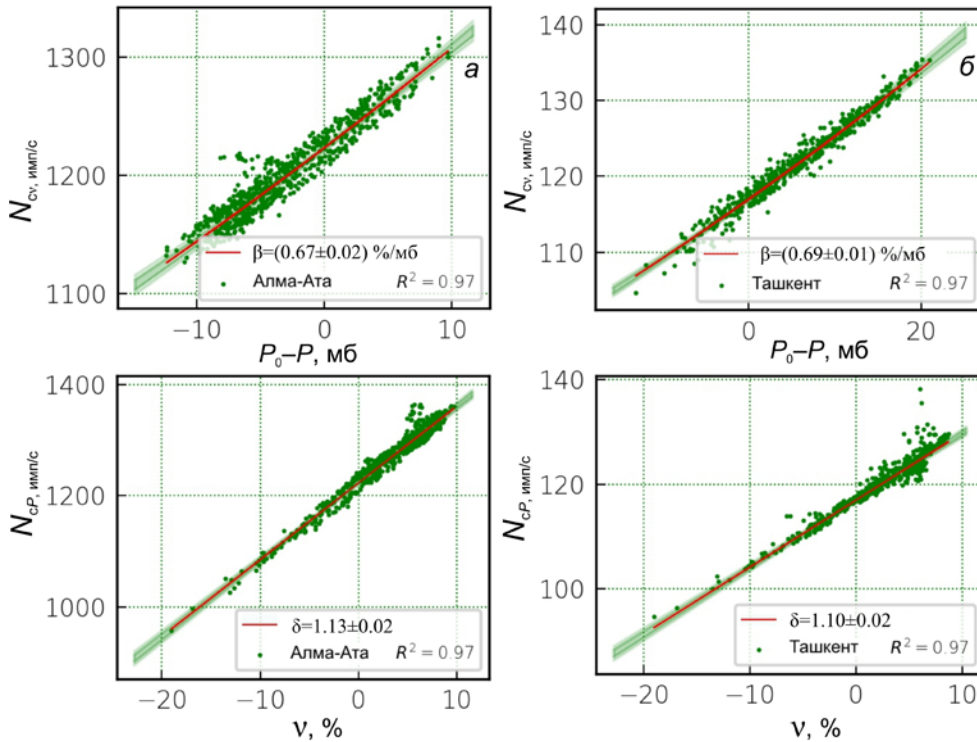


Рис. 3. Диаграммы рассеяния, формируемые при анализе данных детекторов «Алма-Ата» (а) и «Ташкент» (б) для 1991–1992 гг.

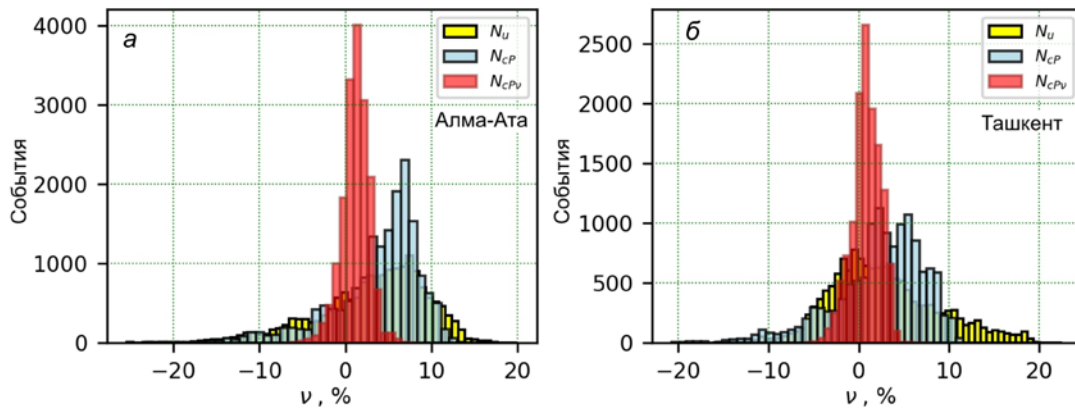


Рис. 4. Гистограммы распределений амплитуд вариаций КЛ для нейтронного монитора «Алма-Ата» (а) и «Ташкент» (б) по данным за 1991–1992 гг.

снега в зимний период, не учитываемым в модели (5) [Кобелев и др., 2022].

Как следует из табл. 2, ширина распределения $N_{срv}$ составляет 2.7 % для ст. «Ташкент» и 4.2 % — для ст. «Алма-Ата».

На рис. 5 проводится сравнение ожидаемых и скорректированных на барометрический эффект вариаций КЛ для детекторов «Алма-Ата» и «Ташкент» для 1991–1992 гг.

Выше мы отмечали, что из-за отсутствия данных измерений влажности в Ташкенте и Алма-Ате при оценке атмосферных эффектов не учитывался эффект влажности. Приведем оценку эффекта влажности воздуха в приближении приземного слоя по данным НМ «Москва» и опорного детектора «Новосибирск». На рис. 6 по данным метеостанции показана относительная влажность воздуха h_2 , приземная температура воздуха t_2 и рассчитанная на их основе

абсолютная влажность воздуха H_2 . Для 2021–2022 гг. для модели (5) получены следующие коэффициенты регрессии: барометрический коэффициент $\beta = (0.743 \pm 0.017) \text{ \% / мб}$, влажностный коэффициент $\varepsilon = (0.035 \pm 0.002 \text{ \% / г/м}^3$ и коэффициент ожидаемых вариаций КЛ $\delta = (0.361 \pm 0.005)$ при высоком коэффициенте детерминации $R^2 = 0.993$. Корреляционная матрица дана в табл. 4. Как следует из табл. 4, взаимной корреляции между исследуемыми параметрами P , H_2 и v также не наблюдается (< 0.3). Ожидаемый барометрический эффект 30 % при перепадах атмосферного давления $\Delta P = 40$ мб, максимально ожидаемый эффект влажности 1.6 % при годовом перепаде абсолютной влажности $\Delta H_2 = 40 \text{ г/м}^3$ ($\Delta t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta h = 80 \text{ \%}$).

Можно сделать вывод, что полученный результат для эффекта влажности согласуется с результатами работы [Янчуковский и др., 2024] для средне-

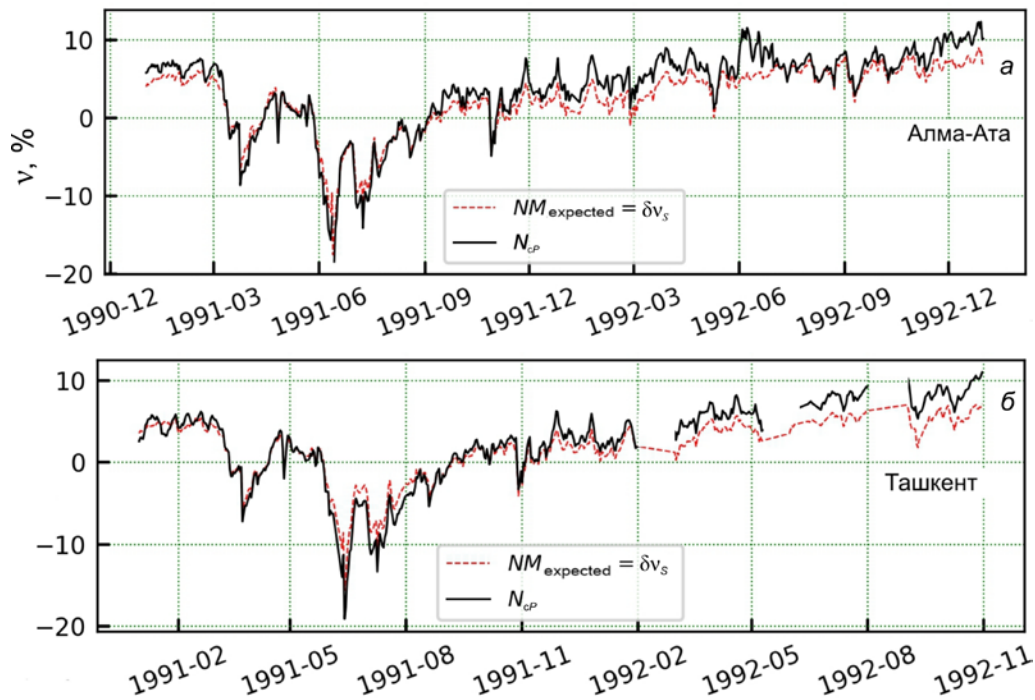


Рис. 5. Сравнение временных изменений ожидаемых (по данным опорной ст. «Рим») и исправленных на барометрический эффект наблюдаемых вариаций нейтронной компоненты для нейтронных мониторов «Алма-Ата» и «Ташкент»

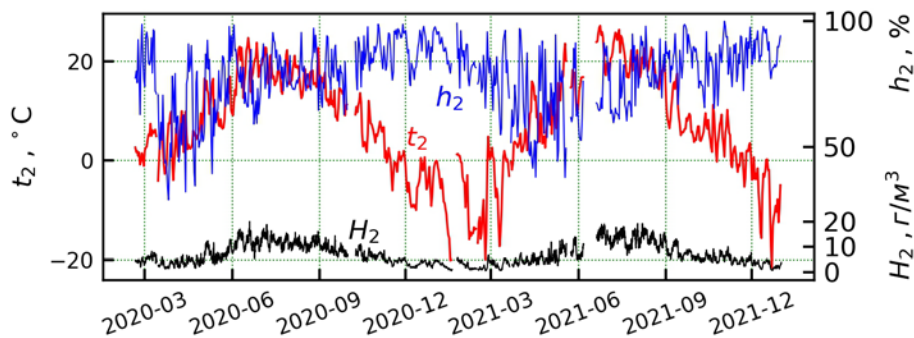


Рис. 6. Временные изменения относительной влажности воздуха h_2 , приземной температуры воздуха t_2 и вычисленной на их основе абсолютной влажности воздуха H_2

Таблица 4

Корреляционная матрица для нейтронного монитора «Москва»

	P	H_2	v	N
P	1	-0.121	0.001	0.993
H_2		1	0.104	-0.111
v			1	0.059
N				1

широтной станции и для одного и того же периода времени.

ВЫВОДЫ

Предложена формула для трехпараметрической модели вариаций КЛ в атмосфере, включающей геиосферные вариации КЛ и вариации атмосферного происхождения (барометрический эффект и эффект влажности воздуха).

Из-за отсутствия данных по влажности воздуха для низкоширотных станций «Ташкент» и «Алма-Ата» для периода высокой солнечной активности 1991–1992 гг. определялся только барометрический коэффициент с поправками на первичные вариации КЛ. Барометрический коэффициент для Ташкента равен 0.686 ± 0.016 %/мб. Коэффициент вклада первичных вариаций КЛ близок к единице и равен 1.096 ± 0.014 , поскольку использовалась опорная станция «Рим» с близкими характеристиками. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.97$. Барометрический коэффициент для Алма-Аты для того же периода равен 0.668 ± 0.016 %/мб. Несмотря на лучшую статистику, модель атмосферных вариаций, построенная для горной станции «Алма-Ата», работает несколько хуже. Это, в первую очередь, обусловлено эффектом снега.

В рамках трехпараметрической модели вариаций КЛ в атмосфере барометрический коэффициент и коэффициент влажности для среднеширотной станции «Москва» для 2021–2022 гг. составляют $\beta = (0.743 \pm 0.017)$ %/мб, $\epsilon = (0.034 \pm 0.002)$ %/г/м³,

что находится в хорошем согласии с результатами работы [Янчуковский и др., 2024].

Поскольку эффект влажности существенен, для его учета было бы полезно оснастить все станции КЛ метеостанциями с датчиками влажности и температуры.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций КЛ [http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf] и NMDB проекта [www.nmdb.eu].

Работа проводится в рамках УНУ «Российская национальная наземная сеть станций КЛ (Сеть СКЛ)» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дорман Л.И. *Вариации космических лучей*. М.: Гостехиздат, 1957. 285 с.

Дорман Л.И. *Метеорологические эффекты космических лучей*. М.: Наука, 1972. 211 с.

Калинин Н.А. *Физическая метеорология*. Пермь: Пермский государственный университет, 2023. 257 с.

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. С. 737–742. DOI: [10.31857/S0016794022060086](https://doi.org/10.31857/S0016794022060086).

Янчуковский В.Л., Филимонов Г.Я. Барометрический эффект вторичных космических лучей. *Известия РАН. Сер. физ.* 1997. Т. 61, № 6. С. 1159–1161.

Янчуковский В.Л., Борисов В.Л., Красавин В.В. Измерения нуклонной компоненты с помощью экспедиционного супермонитора. *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1976. Т. 40, № 3. С. 668–670.

Янчуковский В.Л., Калюжная М.А., Хисамов Р.З. Интенсивность нейтронной компоненты космических лучей и влажность воздуха. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 1. С. 37–43. DOI: [10.12737/szf-101202405](https://doi.org/10.12737/szf-101202405).

Belov A.V., Dorman L.I., Gushchina R.T., Yanke V.G. Temporal and latitude dependence of the temperature effect for neutron component of cosmic rays. *Proc. 24th ICRC. Rome*. 1995. Vol. 4. P. 1141–1144.

Buck Arden L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1981. Vol. 20, iss. 12. P. 1527–1532. DOI: [10.1175/1520-0450\(1981\)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2).

Carmichael H., Bercovitch M. Analysis of IQSY CR survey measurements. *Canadian Journal of Physics*. 1969. Vol. 47. P. 2073–2093. DOI: [10.1139/p69-261](https://doi.org/10.1139/p69-261).

Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor. *Canadian J. Phys.* 1964. Vol. 42. P. 2443–2472. DOI: [10.1139/p64-222](https://doi.org/10.1139/p64-222).

Iucci N., Villorosi G., Dorman L.I., Parisi M. Cosmic ray survey to Antarctica and coupling functions for neutron component near solar minimum (1996–1997) II. Determination of meteorological effects. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, iss. A9. P. 21035–21045. DOI: [10.1029/2000JA900050](https://doi.org/10.1029/2000JA900050).

Kobelev P., Belov A., Mavromichalaki E., et al. Variations of barometric coefficients of the neutron component in the 22–23 cycles of solar activity. *Proc. 32nd ICRC. Beijing*. 2011. Vol. 11. P. 382–385. DOI: [10.7529/ICRC2011/V11/0654](https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V11/0654).

Kobelev P.G., Dorman L.I., Trefilova L.A., et al. Monitoring of the thickness of the snow cover based on the neutron component data of cosmic rays. *Proc. 37th ICRC. Berlin*. 2021. DOI: [10.22323/1.395.0282](https://doi.org/10.22323/1.395.0282).

Moraal H., Potgieter M.S., Stoker P.H., Van der Wait A.J. Neutron monitor latitude survey of cosmic ray intensity during the 1986–87 solar minimum. *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. P. 1459–1464. DOI: [10.1029/JA094iA02p01459](https://doi.org/10.1029/JA094iA02p01459).

Nuntiyakul W., Evenson P., Ruffolo D., et al. Latitude survey investigation of galactic cosmic ray solar modulation during 1994–2007. *Astrophys. J.* 2014. Vol. 795, no. 1. DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/11](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/11).

Paschalis P., Mavromichalaki H., Yanke V., et al. Online application for barometric coefficient calculation of the NMDB stations. *New Astronomy*. 2013. Vol. 19. P. 10–18. DOI: [10.1016/j.newast.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.newast.2012.08.003).

Simpson J.A. Cosmic-radiation neutron intensity monitor. *Annals of the International Geophysical Year*. 1957. Vol. 4. P. 351–373. DOI: [10.1016/B978-1-4832-1304-0.50020-8](https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1304-0.50020-8).

Yanchukovsky V.L., Philimonov G.J. Barometric Effect of Cosmic Rays a Function of Several Variables. *Proc. 25th International Cosmic Ray Conference. Durban*. 1997. Vol. 2. P. 445–448.

Zreda M., Shuttleworth W.J., Xeng X., et al. COSMOS: The Cosmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012. Vol. 9. P. 4505–4551. DOI: [10.5194/hessd-9-4505-2012](https://doi.org/10.5194/hessd-9-4505-2012).

URL: <http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/data/nm-barometric-coefficient> (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/> (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: <http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm> (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: <https://crst.izmiran.ru/cutoff> (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: <http://www.awsgroup-msk.cugms.ru:27416/aws-group.rmp/>, логин/pw: izmiran/IzmiRAN_27001 (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: www.nmdb.eu/ (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536> (дата обращения 8 ноября 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Кобелев П.Г., Хамраев Ю.Б., Янке В.Г. Анализ метеорологических эффектов нейтронной компоненты космических лучей по данным среднеширотных станций. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 4. С. 106–113. DOI: [10.12737/szf-104202411](https://doi.org/10.12737/szf-104202411).