
ИНТЕНСИВНОСТЬ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

INTENSITY OF THE NEUTRON COMPONENT OF COSMIC RAYS AND AIR HUMIDITY

В.Л. Янчуковский

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

М.А. Калюжная

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

Р.З. Хисамов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, khisamovrz@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*

M.A. Kalyuzhnaya

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

R.Z. Khisamov

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

Аннотация. В настоящее время коррекция данных нейтронных мониторов осуществляется только на барометрический эффект. Однако нельзя исключить также воздействие изменений влажности воздуха на интенсивность нейтронной компоненты космических лучей (КЛ), регистрируемой нейтронными мониторами. В связи с этим были выполнены непрерывные измерения влажности и температуры воздуха при наблюдениях за вариациями интенсивности КЛ с помощью нейтронного монитора в Новосибирске. Анализ результатов наблюдений метеорологических параметров и интенсивности КЛ в Новосибирске, а также данных мировой сети нейтронных мониторов позволил выявить вариации интенсивности нейтронной компоненты, вызванные изменениями влажности воздуха. Сделанные оценки эффекта влажности свидетельствуют о необходимости его регулярного учета в данных нейтронного монитора. Для этого наряду с измерениями атмосферного давления следует проводить регулярные измерения влажности и температуры воздуха.

Ключевые слова: космические лучи, атмосфера, нейтроны, монитор, влажность воздуха.

Abstract. Neutron monitor data is currently corrected only for the barometric effect. We cannot, however, exclude that changes in air humidity affect the intensity of the cosmic-ray neutron component recorded by neutron monitors. In this regard, we have carried out continuous measurements of air humidity and temperature when observing variations in the cosmic ray intensity with a neutron monitor in Novosibirsk. Analysis of the results of observations of meteorological parameters and cosmic ray intensity in Novosibirsk, as well as data from the global network of neutron monitors, made it possible to identify neutron component intensity variations caused by changes in air humidity. The estimated humidity effect indicates the need to regularly take it into account in the neutron monitor data. To do this, along with atmospheric pressure, regular measurements of humidity and air temperature should be performed.

Keywords: cosmic rays, atmosphere, neutrons, monitor, air humidity.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения параметров атмосферы [Дорман, 1957] вызывают изменения интегральной кратности генерации частиц вторичных компонент космических лучей (КЛ). Атмосферные вариации КЛ обуславливаются в основном барометрическим и температурным эффектами. Для различных вторичных компонент вклад указанных эффектов не одинаков. Для нейтронной компоненты, состоящей преимущественно из стабильных частиц, температурный эффект практически отсутствует, поскольку только незначительная часть нейтронов может порождаться нестабильными частицами. На интенсивности нейтронной компоненты в основном сказывается легко учитываемый

барометрический эффект. В настоящее время коррекция данных нейтронных мониторов осуществляется только на барометрический эффект. Однако следует заметить, что в результате измерений, проведенных более полувека назад [Hendrick, Edge, 1966], было обнаружено влияние влажности на интенсивность нейтронов космических лучей у земной поверхности. К сожалению, обнаруженный эффект отнесли к ряду шумов при измерениях. Дорман [1972] также указывает на существование эффекта влажности для нейтронной компоненты КЛ.

Нейтроны, образующиеся в атмосфере в результате неупругих взаимодействий КЛ с ядрами атомов воздуха, подвергаются упругим столкновениям, в ре-

зультате чего теряют энергию и в конечном счете поглощаются. Логарифмические потери энергии нейтронов при упругих столкновениях с ядрами обратно пропорциональны атомному весу элемента [Бекурц, Виртц, 1968]. По мере увеличения атомного веса число столкновений увеличивается, а потери энергии уменьшаются. Водород, безусловно, является самым эффективным поглотителем. Для замедления быстрых нейтронов до теплового уровня требуется минимальное число столкновений (порядка 18) с ядром водорода [Бекурц, Виртц, 1968]. Основным источником атомов водорода в воздухе является водяной пар. Если химический состав воздуха практически не меняется, при отсутствии вариаций потока первичных КЛ скорость производства нейтронов в атмосфере будет почти постоянна. Однако даже при отсутствии изменений атмосферного давления колебания содержания водяного пара в воздухе вызовут изменения интенсивности регистрируемой нейтронной компоненты. Этот эффект достигает нескольких процентов [Zreda et al., 2012] при значительных изменениях парциального давления водяного пара (разница между сухим и влажным воздухом). Плотность потока нейтронов в различных областях энергий у земной поверхности обратно пропорциональна влажности воздуха и почвы [Desilets et al., 2010]. Для удобства рассмотрения энергетический спектр нейтронов целесообразно разделить на несколько энергетических диапазонов:

- диапазон энергий <1 эВ — область тепловых и надтепловых нейтронов, энергетический спектр которых — это спектр Максвелла;
- диапазон энергий 1 эВ – 50 КэВ — область нейтронов резонансных энергий, плотность которых распределена по энергиям по закону $E^{3/2}$, т. е. плавно возрастает с уменьшением энергии и спектр Ферми переходит в максвелловский спектр тепловых нейтронов;
- диапазон энергий 50 КэВ – 1 МэВ — область нейтронов промежуточных энергий, энергетический спектр которых определяется не только процессами замедления, но и спектром нейтронов испарения со средней энергией 1 МэВ;
- диапазон 1 МэВ – 10 ГэВ — область быстрых и релятивистских нейтронов, энергетический спектр которых описывается степенной функцией.

При исследовании состояния и распределения влаги у земной поверхности основной анализируемой информацией является интенсивность регистрируемых нейтронов. Однако энергетический спектр нейтронов содержит дополнительные сведения о состоянии и распределении влаги. Одновременные измерения тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов могут позволить отличить снегопад от дождя, как это было сделано в [Desilets et al., 2010]. Наблюдаемая реакция естественного потока нейтронов на изменения влажности в настоящее время стала широко использоваться при организации сетей непрерывных наблюдений за средней влажностью почвы [https://blog.secnrs.ru/2022/12/на-конференции-cop27-магатэ-уделило-особо/; https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/59-3; https://www.iaea.org/

ru/newscenter/news/kosmicheskie-luchi-pomogayut-izmerit-uroven-vlazhnosti-pochvy; Zreda et al., 2008]. Для этих целей разрабатываются передвижные и стационарные зонды влажности почвы с помощью космических лучей [https://ru-ecology.info/post/103688904160015/; Zreda et al., 2012].

Нейтронная компонента на станциях КЛ наблюдается с помощью нейтронных мониторов [Hatton, Carmichael, 1964] — детекторов локальной генерации нейтронов, в которых в качестве конденсирующего вещества используется свинец, а замедлителем нейтронов, образованных в свинце, является полиэтилен. Наличие локального генератора нейтронов и замедлителя в мониторах позволяет существенно уменьшить вклад нейтронов, образованных и замедлившихся в атмосфере и окружающих предметах [Дорман, 1975]. Однако не гарантировано, что этот вклад исключен полностью.

Станции КЛ мировой сети, оснащенные нейтронными мониторами, находятся в различных условиях. В пунктах размещения станций КЛ влажность воздуха определяется, с одной стороны, уровнем осадков и температурой, а с другой, такими факторами, как эффективность стока, уровень и вид растительности, характеристики почв и др. Поэтому для определения эффекта влажности в данных нейтронных мониторов необходимо проводить непрерывные измерения влажности воздуха непосредственно в пункте наблюдения КЛ.

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Непрерывный мониторинг влажности и температуры воздуха проводится в Новосибирске с 14 октября 2021 г. Измерения осуществляются с интервалом 15 мин. Измерения проводятся с использованием микропроцессорного измерителя (датчика влажности и температуры) ДВТ-03.RS [https://relsib.com/category/datchiki-vlazhnosti-i-temperatury-dvt-03]. Достоинствами ДВТ-03.RS являются: высокая точность измерения, взаимозаменяемый чувствительный элемент, стойкость к повышенной влажности, расширенный диапазон температуры измерения. Основные характеристики измерителя:

- диапазон измерения: $-40 \dots +100$ °С, $0 \dots 98$ % отн. влаж.;
- точность измерения: от ± 2.5 % отн. влаж., от ± 0.4 °С температура;
- улучшенная временная стабильность;
- стандартный цифровой протокол связи RS 485 Modbus;
- программа-конфигуратор содержит встроенную программу регистрации параметров в виде таблицы или графика.

Измеритель влажности и температуры воздуха помещен в метеорологической будке Селянинова в пяти метрах от здания станции КЛ.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Результаты прямых измерений представлены относительной влажностью в процентах и температу-

рой в градусах Цельсия. Перейдем к абсолютной влажности. Поведение водяного пара [Амелин, 1972] можно приближенно представить как поведение идеального газа, которое описывается уравнением Менделеева—Клапейрона

$$PV = nRT. \quad (1)$$

Здесь P и V — давление и объем водяного пара, соответственно; R — газовая постоянная; T — измеренная температура; n — количество водяного пара в молях ($n = m/M$), молекулярный вес воды 18.02. Давление насыщенного пара $P_{\text{нас}}$ [гПа] (когда относительная влажность $h = 100\%$) как функция температуры T [°C] дается выражением Магнуса—Тетенса:

$$P_{\text{нас}} = 6.112 \exp\left[\frac{(17.67 T)}{(T + 243.5)}\right]. \quad (2)$$

При переходе к давлению P при любом значении относительной влажности достаточно выражение для $P_{\text{нас}}$ умножить на коэффициент ($h/100$). Тогда абсолютная влажность H [г/м³] — масса воды [г] в единице объема [м³] воздуха:

$$H = \frac{6.112 \exp\left[\frac{(17.67 T)}{(T + 243.5)}\right] 2.1674h}{(273.15 + T)}, \quad (3)$$

где T — текущая температура [°C]; h — относительная влажность [%].

Измерения атмосферного давления, как и измерения темпа счета нейтронного монитора КЛ, проводились ежеминутно. Для непрерывных измерений абсолютного давления воздуха используется барометр сетевого типа БРС-1М с допускаемой погрешностью измерений ± 33 Па. Барометр может выдавать информацию по интерфейсу RS232 в периодическом режиме (через каждые 250 ... 300 мс) или по запросу со скоростью 1200 бод.

Результаты непрерывных измерений температуры, влажности и давления за длительный период представлены на рис. 1.

Рассматривались данные непрерывных наблюдений КЛ с помощью нейтронных мониторов на десяти станциях мировой сети. Основные характеристики станций КЛ представлены в таблице.

Использовались значения темпа счета I , исправленные на изменения атмосферного давления, за период с 14 октября 2021 г. по 30 сентября 2023 г. Все исходные данные приведены к среднесуточным значениям. Для каждого нейтронного монитора за весь рассматриваемый временной интервал были найдены средние значения \bar{I} , относительно которых оцени-

вались вариации интенсивности $\delta I = \frac{I - \bar{I}}{\bar{I}} 100\%$.

Данные десяти нейтронных мониторов за этот период представлены на рис. 2.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ВЛАЖНОСТИ

Станции КЛ, данные которых используются, размещены в обоих полушариях, значительно разнесены по долготе и находятся в различных климатических зонах. При усреднении данных этих станций будет минимизирован вклад эффекта влажности на фоне выделенной первичной составляющей вари-

аций КЛ, т. е. вариации КЛ за счет модуляции первичных КЛ за пределами земной атмосферы и магнитосферы, которая будет соответствовать средним широтам. Действительно, суточный ход влажности воздуха наблюдается по местному времени. Следовательно, усреднение данных станций КЛ, разнесенных по долготе, приведет к уменьшению вклада изменений влажности воздуха в течение суток. А использование данных наблюдений в разных пунктах Северного и Южного полушарий уменьшит вклад сезонных изменений влажности воздуха (зима—лето) в усредненные данные нейтронных мониторов. Первичная составляющая вариаций КЛ наблюдается одновременно по мировому времени на всех станциях мировой сети. Поэтому усреднение данных станций мировой сети будет надежно выделять первичную составляющую вариаций КЛ, минимизируя при этом вклады различных метеоэффектов, включая изменения влажности. Полученные в результате усреднения данных всех станций (за исключением данных ст. «Новосибирск») вариации приведены на рис. 3, на котором показаны также изменения абсолютной влажности воздуха и вариации темпа счета нейтронного монитора в Новосибирске, исправленные на изменения атмосферного давления. Здесь же на рисунке представлена разность

$$\delta I_{\text{NVBK}}(t) - \bar{\delta I}(t),$$

где $\bar{\delta I}(t) = \frac{1}{n} \sum_k \delta I_k(t)$, а $\delta I_k(t)$ — вариации темпа счета станции k .

На рис. 3 наблюдаются изменения во времени разности $\delta I_{\text{NVBK}} - \bar{\delta I}$ (кривая 3), которые происходят строго в противофазе с изменениями абсолютной влажности ΔH (кривая 4). Разность $\delta I_{\text{NVBK}} - \bar{\delta I}$ содержит информацию о влажности воздуха, поскольку оказывается коррелированной с изменениями абсолютной влажности ΔH (кривая 4) на всем рассматриваемом временном интервале. Чтобы оценить эффект влажности, воспользуемся исходными данными по темпу счета нейтронного монитора «Новосибирск», не корректированными на атмосферное давление. Вариации темпа счета монитора, обусловленные изменениями атмосферного давления и влажности воздуха, а также первичной составляющей вариаций КЛ, представим в виде уравнения линейной регрессии

$$\delta I_{\text{NVBK}}(t) = \alpha \Delta H(t) + \beta \Delta P(t) + \gamma \bar{\delta I}(t), \quad (4)$$

где $\delta I_{\text{NVBK}}(t) = \frac{I_{\text{NVBK}}(t) - \bar{I}_{\text{NVBK}}}{\bar{I}_{\text{NVBK}}} \cdot 100\%$ — наблюдае-

мые вариации темпа счета нейтронного монитора «Новосибирск» (результатирующий фактор y); $\Delta H(t) = H(t) - \bar{H}$ — изменения влажности воздуха (фактор x_1); $\Delta P(t) = P(t) - \bar{P}$ — изменения атмосферного давления (фактор x_2); $\bar{\delta I}(t)$ — усредненная вариация темпа счета девяти нейтронных мониторов мировой сети (фактор x_3).

Параметры станций КЛ мировой сети

| № | Cosmic Ray Station | Coordinates | Altitude, m | Instrument | Geomagnetic cutoff rigidity, GV | Links |
|----|-----------------------------|-----------------------|-------------|------------|---------------------------------|--|
| 1 | Athens, Greece | 37.97°N 23.78° E | 260 | 6-NM-64 | 8.53 (2000 г.) | https://www.nmdb.eu/station/athn/ |
| 2 | Hermanus, South Africa | 34.43° S 19.23° E | 26 | 12-NM-64 | 4.58 (1965) | https://www.nmdb.eu/station/hrms/ |
| 3 | Irkutsk, Russia | 52.47° N 104.03° E | 475 | 18-NM-64 | 3.56 (1965 г.) | https://www.nmdb.eu/station/irkt/ |
| 4 | Kiel, Germany | 54.34°N 10.12° E | 54 | 18-NM-64 | 2.36 (2000 г.) | https://www.nmdb.eu/station/kiel/ |
| 5 | Moscow, Russia | 55.47° N 37.32° E | 200 | 24-NM-64 | 2.43 (1965 г.) | http://cr0.izmiran.ru/mosc/ https://www.nmdb.eu/station/mosc/ |
| 6 | Novosibirsk, Russia | 54.8° N 83.00° E | 163 | 24-NM-64 | 2.91 (1965 г.) | https://www.nmdb.eu/station/nvbk/ |
| 7 | Oulu, Finland | 65.05° N 25.47° E | 15 | 9-NM-64 | ~0.8 (1965 г.) | https://www.nmdb.eu/station/oulu/ |
| 8 | Potchefstroom, South Africa | 26.68° S 27.09° E | 1351 | 15-МГТ | 6.98 (1965 г.) | https://www.nmdb.eu/station_informatio n/PTFM_2018-07-01.html |
| 9 | Sanae IV, Antarctica | 71.67° S 02.85° W | 856 | 6-NM-64 | 0.73 (1965 г.) | https://www.nmdb.eu/station/snae/ |
| 10 | Yakutsk, Russia | 62.01° N 129.43° E | 105 | 24-NM-64 | 1.65 (1965 г.) | https://www.nmdb.eu/station/yktk/ |

В скобках (в таблице) указана эпоха, к которой относится значение эффективной жесткости обрезания.

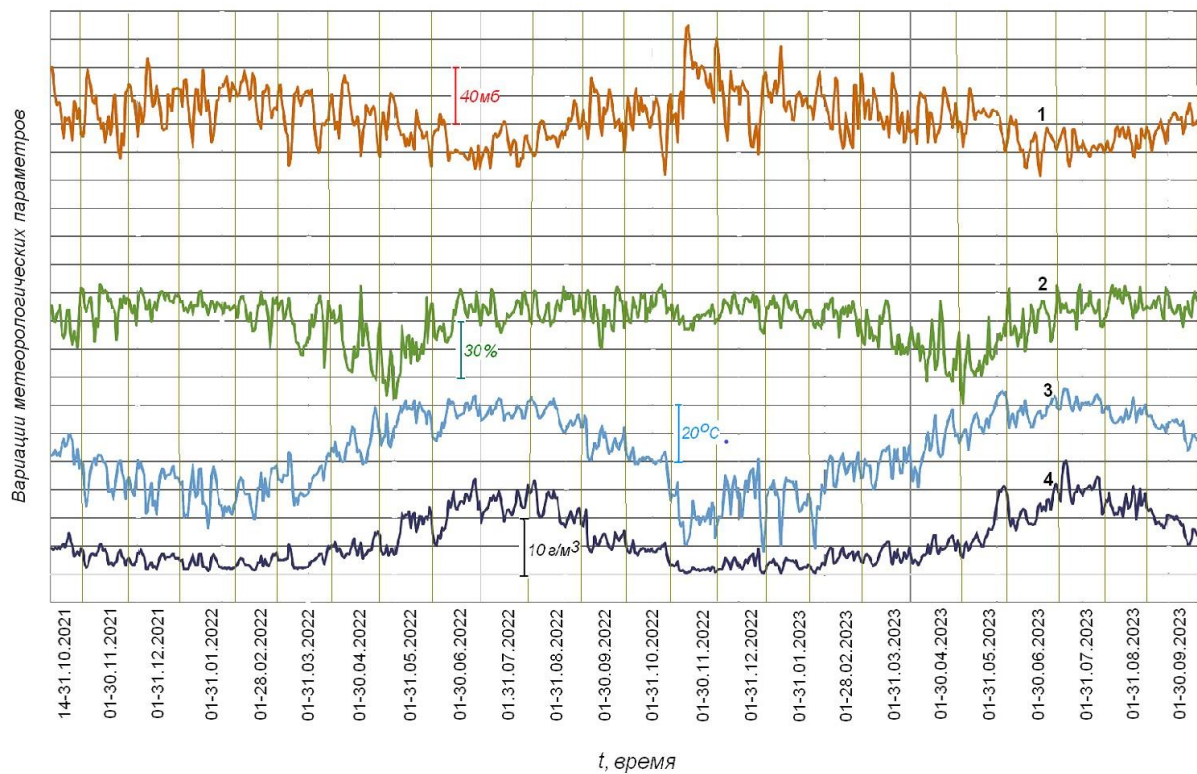


Рис. 1. Среднесуточные значения атмосферного давления (кривая 1), относительной влажности (кривая 2), температуры (кривая 3) и абсолютной влажности (кривая 4) в Новосибирске за период с 14 октября 2021 г. по 30 сентября 2023 г.

В выражении (4) α — коэффициент влажности; β — барометрический коэффициент; γ — коэффициент регрессии с усредненными данными девяти нейтронных мониторов, исправленными на вариации атмосферного давления и отражающими первичные вариации КЛ. Для определения значений α , β и γ был привлечен метод наименьших квадратов, который для уравнений линейной регрессии сводится к решению системы нормальных уравнений [Корн, Корн, 1984]. Для многофакторной регрессии мы пользовались также уравнением регрессии в стандартизованном масштабе [Горлач, 2006]. Оба метода дали ана-

логичный результат. Получены следующие значения: $\alpha = -0.160 \pm 0.007$ %/г/м³; $\beta = -0.713 \pm 0.0041$ %/мб; $\gamma = 0.958 \pm 0.006$. Совокупный коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между всеми переменными, $\rho = 0.961$. Используя барометрический коэффициент β и коэффициент влажности α , определим вариации темпа счета нейтронного монитора, вызванные изменениями атмосферного давления и абсолютной влажности воздуха, и исключим их из наблюдаемых вариаций δI_{NVBK} за рассматриваемый период. Полученный результат показан на рис. 4.

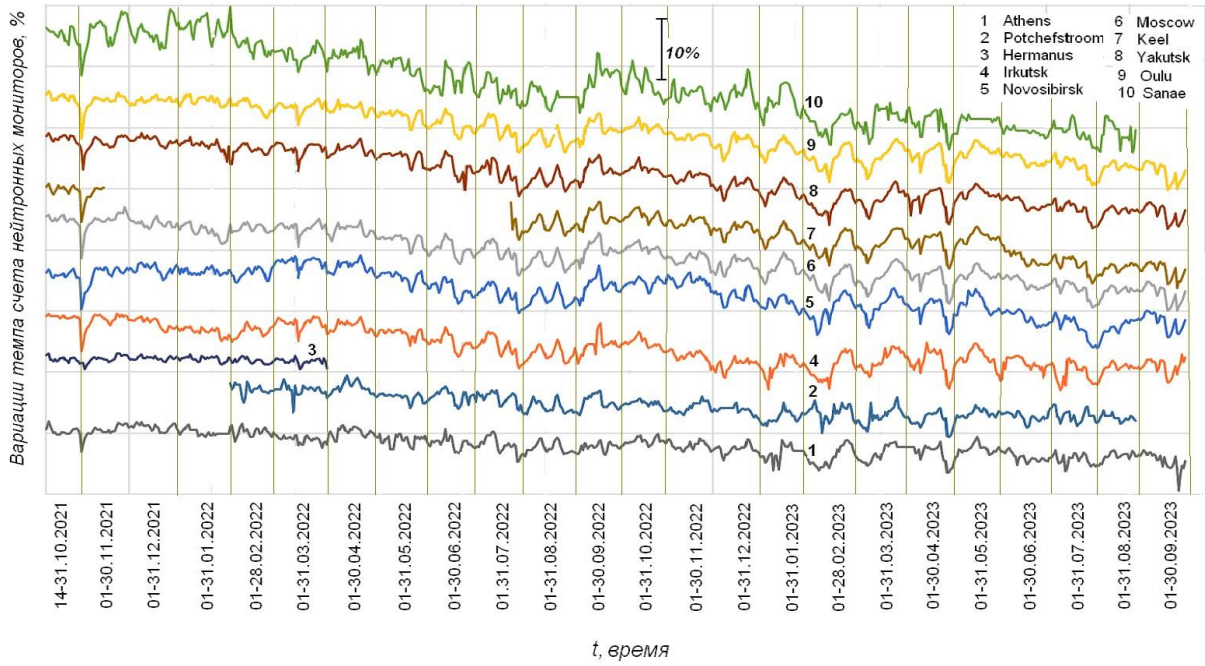


Рис. 2. Вариации темпа счета десяти нейтронных мониторов мировой сети станций КЛ в период с 14 октября 2021 г. по 30 сентября 2023 г.

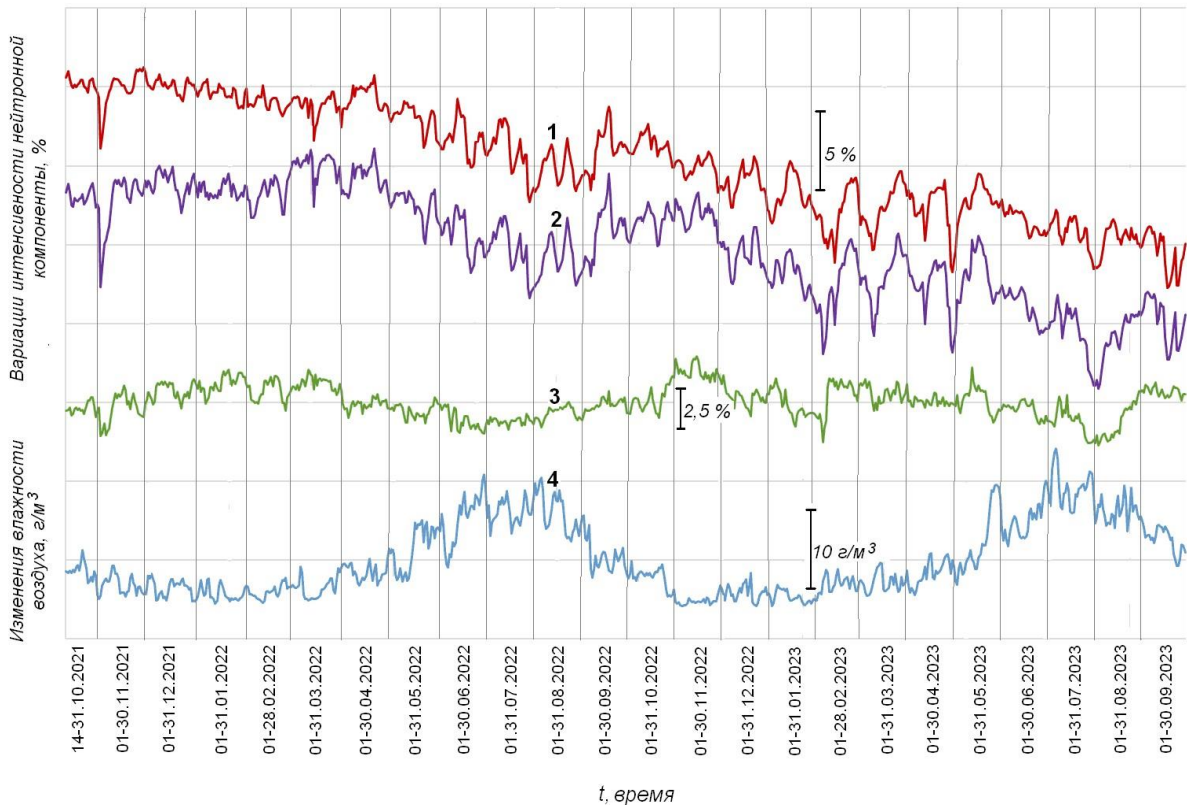


Рис. 3. Вариации интенсивности нейтронной компоненты, усредненные по всем приведенным станциям КЛ (кривая 1), и изменения темпа счета нейтронного монитора «Новосибирск» (кривая 2), а также разность этих параметров (кривая 3) и изменения абсолютной влажности (кривая 4) в Новосибирске за тот же период

ОБСУЖДЕНИЕ

Ощутимый вклад в темп счета нейтронного монитора NM-64 начинается с энергий ~10 МэВ (это быстрые нейтроны). Упругие взаимодействия в той или иной степени характерны для всех частиц, не только для тепловых и надтепловых нейтронов. В результате

упругих взаимодействий в окружающем воздухе быстрые нейтроны тоже замедляются и переходят в другие области энергий (промежуточных, резонансных, надтепловых или тепловых нейтронов). Таким образом, они выбывают из потока быстрых нейтронов, к которым чувствителен нейтронный монитор,

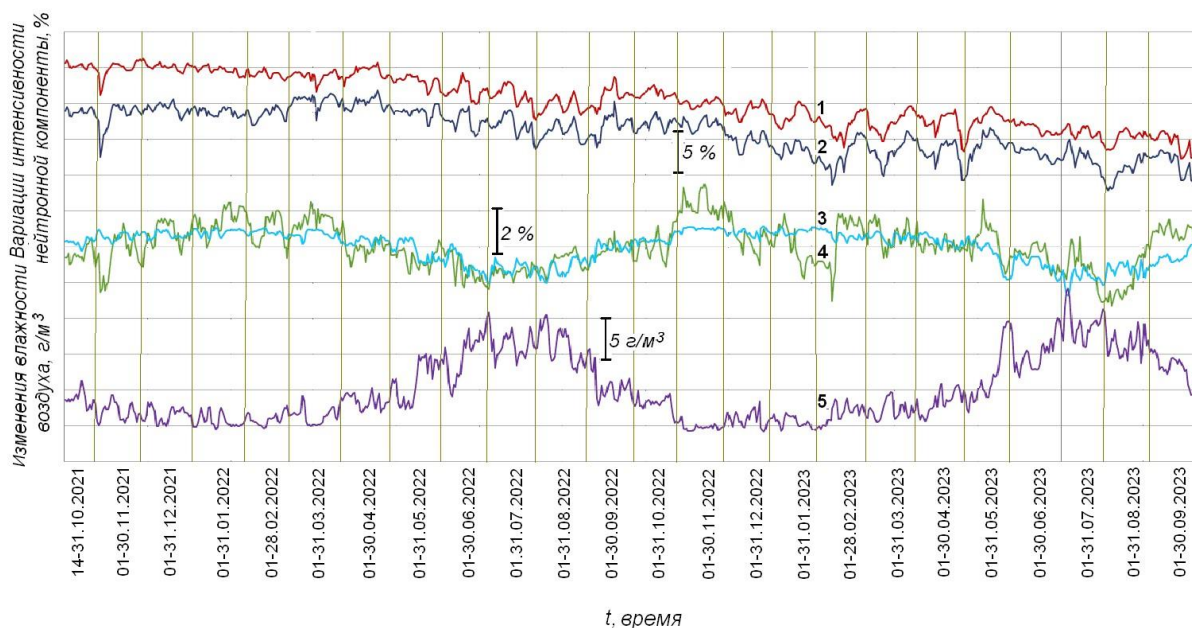


Рис. 4. Вариации интенсивности нейтронной компоненты, усредненные по всем приведенным станциям КЛ (1), и изменения темпа счета нейтронного монитора «Новосибирск», исправленные с учетом изменений атмосферного давления и влажности (2), вариации темпа счета нейтронного монитора, вызванные изменениями абсолютной влажности воздуха (3), разность $\delta I_{\text{NVBK}} - \bar{\delta I}$ (4) и изменения абсолютной влажности (5)

что приводит к уменьшению темпа счета. При изменении влажности меняется содержание в воздухе эффективного замедлителя — водорода. В результате наблюдаются вариации темпа счета монитора. Достоверность полученного результата, в нашем случае коэффициента влажности для нейтронного монитора, определяется выбором соответствующего данной задаче метода анализа экспериментального материала и качеством исходных данных. Данные о вариациях интенсивности нейтронной компоненты КЛ получены в результате непрерывных наблюдений с помощью 4-секционного нейтронного монитора 24NM-64 (Новосибирск) с площадью сбора частиц 24 м^2 , что обеспечивает статистическую точность часовых данных 0.12 %. В анализе использовались среднесуточные значения, в результате статистическая ошибка исходных данных не превышала 0.024 %. Использовались результаты непрерывных наблюдений за период с 14 октября 2021 г. по 30 сентября 2023 г., т. е. за 717 сут. Данные по влажности воздуха получены с помощью сертифицированного датчика влажности и температуры ДВТ-03, который в настоящее время обеспечивает самую высокую точность измерения. Данные по атмосферному давлению получены с помощью сертифицированного барометра сетевого типа БРС-1М, прошедшего поверку. Статистическая погрешность усредненных данных девяти нейтронных мониторов определяется статистической точностью каждой из станций КЛ. На восьми станциях КЛ из девяти используется стандартный нейтронный монитор NM-64. В среднем статистическая ошибка часовых данных не превышает 0.19 %. Погрешность среднесуточных значений, усредненных по девяти станциям мировой сети, составляет не более 0.013 %. Результаты непрерывных измере-

ний влажности воздуха подтверждают наличие годовой волны в изменении абсолютной влажности воздуха порядка $12\text{--}13 \text{ г/м}^3$ (см. рис. 2, кривая 4), что согласуется с данными метеонаблюдений в Новосибирске. При таком коэффициенте влажности (сравнительно небольшом) изменения влажности в указанных пределах в течение года вызывают сезонную вариацию темпа счета монитора более 2 % (см. рис. 4, кривая 3), которую необходимо исключать из данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально обнаружен эффект влажности воздуха для нейтронной компоненты КЛ, регистрируемой нейтронными мониторами. По результатам непрерывных наблюдений выполнена оценка коэффициента влажности регистрируемой интенсивности нейтронной компоненты КЛ. Хотя эффект влажности ($-0.160 \text{ \% / г/м}^3$) значительно меньше барометрического эффекта (-0.713 \% / мб), тем не менее он вызывает сезонную вариацию интенсивности нейтронной компоненты. Таким образом, для исключения из данных нейтронных мониторов атмосферной составляющей вариаций следует учитывать не только барометрический эффект, но и эффект влажности воздуха. С этой целью в месте регистрации космических лучей, наряду с измерениями атмосферного давления, необходимо вести непрерывные наблюдения за влажностью и температурой воздуха.

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

Амелин А.С. Теоретические основы образования тумана. М.: Наука, 1972. 209 с.

Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. М.: Атомиздат, 1968. 456 с.

Горлач Б.А. Математика. М.: Наука, 2006. 911 с.

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

Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831 с.

Desilets D., Zreda M., Ty P.A. Ferré Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*. 2010. Vol. 46. W11505. DOI: [10.1029/2009WR008726](https://doi.org/10.1029/2009WR008726).

Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 Neutron monitor. *Canadian Journal of Physics*. 1964. Vol. 42. P. 2443–2472.

Hendrick L.D., Edge R.D. Cosmic-ray neutrons near the Earth. *Physical Review*. Ser. II. 1966. Vol. 145. P. 1023–1025.

Zreda M., Desilets D., Ferré T.P.A., Scott R.L. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophys. Res. Lett*. 2008. Vol. 35. L21402. DOI: [10.1029/2008GL035655](https://doi.org/10.1029/2008GL035655).

Zreda M., Shuttleworth W.J., Zeng X., et al. COSMOS: the COsmic-ray SOil Moisture Observing System. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012. Vol. 16. P. 4079–4099. DOI: [10.5194/hess-16-4079-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-4079-2012).

URL: <https://blog.secncs.ru/2022/12/на-конференции-cop27-магатэ-уделило-особо/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.iaea.org/ru/publications/magazines/bulletin/59-3> (дата обращения 23 октября 2023 г.).

URL: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/kosmicheskie-luchi-pomogayut-izmerit-uroven-vlazhnosti-pochvy> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://ru-ecology.info/post/103688904160015/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://relsib.com/category/datchiki-vlazhnosti-i-temperature-dvt-03> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/athn/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/hrms/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/irkt/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/kiel/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <http://cr0.izmiran.ru/mosc/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/mosc/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/nvbk/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/oulu/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: https://www.nmdb.eu/station_information/PTFM_2018-07-01.html (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/snae/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/yktk/> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 23 декабря 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

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).