

УДК 524.1-352

## АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОДУКТОВ РАСПАДА РАДОНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

© 2023 г. А. А. Лагуткина<sup>1, \*</sup>, Д. Д. Джаппуев<sup>2</sup>, А. У. Куджаев<sup>2</sup>, Д. А. Кулешов<sup>2</sup>, К. О. Куринов<sup>2</sup>, О. И. Михайлова<sup>2</sup>, Ю. В. Стенькин<sup>1, 2</sup>, О. Б. Щеголев<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт ядерных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: lagutkina.aa@phystech.edu

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

На протяжении последних нескольких лет в районе Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на Северном Кавказе наблюдается рост амплитуды сезонной волны давления и концентрации тяжелых радионуклидов в приземном слое атмосферы. Исследована данная тенденция, а также аномалии в показаниях детекторов осенью-зимой 2017 г. и зимой-весной 2021 г., подкрепляющие ее. Рассмотрены гипотезы возможных причин данных аномалий.

DOI: 10.31857/S0367676523701880, EDN: OTBEZO

### ВВЕДЕНИЕ

Несколько лет назад в Баксанской нейтринной обсерватории (BNO) были зарегистрированы две серии аномалий (ноябрь–декабрь 2017 г.; январь–февраль и апрель 2021 г.). На срок от двух до четырех суток в воздухе экспериментального зала резко (в 1.5–2 раза) повышалась концентрация тяжелых нуклидов, продуктов распада радона. Эти явления были зарегистрированы при помощи системы из электронно-нейтронных детекторов установки n-BNO. Целью данной работы является анализ возможных причин этих аномалий, а также обнаруженных в ходе исследования роста среднегодового значения концентрации тяжелых нуклидов и падения среднегодового значения атмосферного давления на Баксане.

### ЭЛЕКТРОННО-НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР

Конструкция и принцип работы сцинтилляционного электронно-нейтронного (эн-) детектора изложены в работах [1–5]. Главная особенность эн-детектора – неорганический сцинтиллятор, разработанный в ИЯИ РАН совместно с ЗАО “Люминофор” гранулированный сплав ZnS(Ag) с V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (не требующим обогащения, т.к. природное содержание <sup>10</sup>B ~ 20%), или иногда с LiF, обогащенным изотопом <sup>6</sup>Li до 90% (природное содержание ~7.5%).

Сцинтиллятор имеет несколько временных компонент: быструю (длительность светового импульса  $\Delta t \sim 40$  нс) и медленные ( $\Delta t \sim$  несколько мкс и более), что позволяет детектировать и различать импульсы от захвата нейтронов (“n”-компонента) и от группового прохождения быстрых заряженных частиц (“charged” или “ch”-компонента, куда входят ШАЛ, мюоны с сопровождением,  $\beta$ -распады вблизи детектора, сопровождаемые гамма-квантами и не входят одиночные заряженные релятивистские частицы, т.к. порог регистрации равен  $\sim 3$  частицы). Именно аномалии в показаниях “ch”-компоненты эн-детекторов и рассматриваются в данной работе (см. пики в периоды 20.11.2017–23.11.2017 и 21.12.2017–24.12.2017 на рис. 1). Установка n-BNO состоит из четырех литиевых эн-детекторов: № 1–3 – внутри экспериментального зала под разными поглотителями, № 4 – под землей на глубине 500 г/см<sup>2</sup>. На подземном детекторе № 4 пиков не наблюдалось, поэтому далее мы исследуем данные с детекторов № 1–3 и предполагаем, что источник аномалий находится над землей, в атмосфере.

### ТРИ ГИПОТЕЗЫ

Согласно первой гипотезе, причина возникновения аномальных пиков кроется в электромагнитном поле, возникающем во время сильных

метелей, сопровождавших 4 из 5 аномалий. Предположительно, во время метели падающий снег электризуется трением [6] и образует положительно заряженную “шапку” на крыше ангара. Детекторы оказываются в области действия электрического поля между крышей и землей, что ускоряет осаждение на них положительно заряженных нуклидов из воздуха в ангаре. В 2021–2022 гг. была сделана попытка исследовать эту гипотезу в условиях московской лаборатории ИЯИ РАН: два детектора, аналогичных по принципу действия детекторам с n-BNO, были помещены в искусственно созданное электрическое поле  $E \geq \geq +(1-3) \text{ кВ/м}$  между металлической пластиной и землей. Величина поля измерялась с помощью измерителя поля Voltek. Однако однозначной корреляции между наличием поля или его величиной и показаниями детектора обнаружено не было: все попытки построить даже линейную зависимость скорости отсчета “ch”-компоненты от величины  $E$  на разных интервалах времени и при разных условиях измерения приводили к тому, что стандартное отклонение коэффициентов наклона прямых оказывалось выше самих коэффициентов  $a_{Mi}$  (табл. 1).

В основе второй гипотезы, объясняющей связь повышения темпа отсчета “ch”-компоненты на детекторе с электрическим зарядом снежинок, лежит аэрозольный эффект, часто имеющий место на Баксане в летнее время и исследованный ранее [7]. По предположению, отрицательно заряженные снежинки (а также капельки воды, образующиеся при их таянии) притягивают положительно заряженные радиоактивные нуклиды-продукты распада радона ( $\text{Bi-214}$  и  $\text{Pb-214}$ ), избыток которого присутствует в почве и в воде Баксана. При таянии снежинок заряженные капельки и пар участвуют в активном образовании радиоактивных аэрозолей, что и приводит к повышению темпа отсчета в “ch”-компоненте детекторов. К сожалению, гипотеза трудно проверяема, поскольку надежных и простых способов исследовать непосредственно концентрацию радиоактивных нуклидов в воздухе ангара во время аномалий нет.

Третья гипотеза основана на явлении нелинейного барометрического пампинг-эффекта, проявляющегося на границе раздела “атмосфера–грунт”: при повышении атмосферного давления происходит диффузия воздуха из нижних слоев атмосферы в почву – накачка почвы, а при понижении – откачка воздуха из грунта, сопровождающаяся притоком почвенных газов в атмосферу, в том числе радона – основного почвенного радиоактивного источника. Тогда в приземном слое атмосферы появляется избыток заряженных частиц – продуктов распада радона, который и

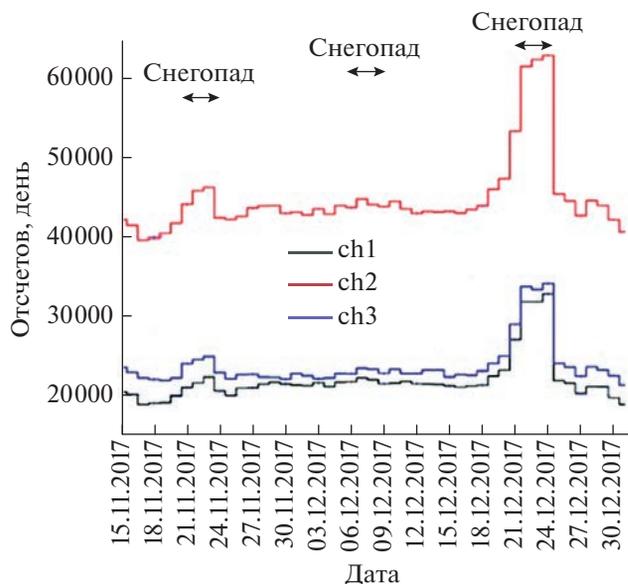


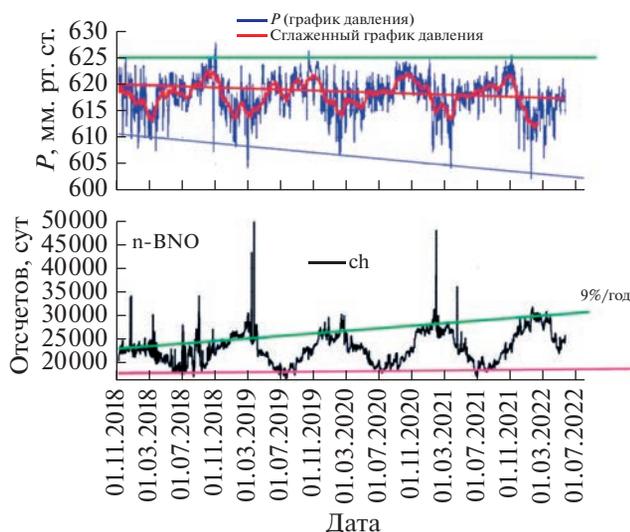
Рис. 1. Суточные графики “ch”-компоненты в эн-детекторах №№ 1, 2 и 3 в ангаре n-BNO в период 15.11.2017–30.12.2017.

регистрирует эн-детектор. С помощью эн-детекторов ранее были обнаружены новые эффекты: линейный барометрический пампинг-эффект для нейтронов и нелинейный – для гамма-фона [8, 9]. Нелинейный эффект проявляется только при аномально низких значениях атмосферного давления. При этом происходит резкий выброс подземных газов и радона в атмосферу. Зависимость от давления в этой области квадратична, что создает “пороговость” данного процесса. Именно этим эффектом можно объяснять наблюдавшиеся нами “зимние” аномалии, поскольку именно зимой иногда приходят циклоны с аномально низким давлением. Более того, вероятность таких явлений растет год от года.

Начиная с 2017 г. в данной местности наблюдается увеличение амплитуды сезонных колебаний кривой давления: минимум линейно убывает с каждым годом (рис. 2, верхний график, нижняя

Таблица 1. Коэффициенты наклона для зависимостей скорости отсчета “ch”-компоненты в эн-детекторах от величины электрического поля  $E$  для детекторов M1 и M2 из московской лаборатории ИЯИ РАН.

Номер детектора, $M_i$	M1	M2
$a_{Mi}, \left(\frac{\text{кВ}}{\text{м}}\right)^{-1}$	$0.0087 \pm 0.010$	$-0.0055 \pm 0.0070$



**Рис. 2.** Вариации давления (сверху) и “ch”-компоненты (снизу) на Баксане по данным детектора № 3 установки n-BNO с 2017 по 2022 гг.

(синяя) прямая), а максимум почти не меняется от сезона к сезону (рис. 2, верхний график, верхняя (зеленая) прямая). С кривой “ch”-компоненты, чувствительной к продуктам распада радона, ситуация обратная: зимний максимум кривой ежегодно растет (от 23000 отсчетов в день зимой 2018 г. до 30000 отсчетов в день зимой 2022 г., рис. 2, нижний график, верхняя (зеленая) прямая), в то время как летний минимум остается на одном уровне (~18000 отсчетов в день, рис. 2, нижний график, нижняя (малиновая) прямая). Под амплитудой вариаций “ch”-компоненты подразумевается разность между рассмотренными выше прямыми. Таким образом, среднее значение давления с каждым годом падает, а средняя скорость счета “ch”-компоненты увеличивается, что соответствует более частому наблюдению аномалий в показаниях детекторов. Важно отметить, что тенденция “ch”-компоненты на Баксане по нашему предположению вызвана в большей степени атмосферными явлениями (о чем свидетельствует в том числе визуальная антикорреляция кривой давления с кривой “ch”-компоненты на рис. 2), а не вариациями интенсивности космических лучей, поскольку видимой связи между трендами на n-BNO и в космических лучах не наблюдается.

Кроме того, по сценариям Климатического центра Росгидромета в ближайшие 20 лет прогнозируется установление на Северном Кавказе более влажного (+0.1 мм/сут) и более теплого (+1.1...+3.4°C) климата. В частности, на Баксане повышение влажности приведет к более интенсивному образованию аэрозолей, а повышение

температуры – к учащению погодных аномалий, в том числе, и в давлении, зависящем от путей прохождения циклонов и их частоты. Наличие этих факторов объясняет учащение аномалий наблюдаемых в показаниях эн-детекторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены возможные причины аномалий в вариациях концентрации тяжелых нуклидов в приземном слое атмосферы в лаборатории n-BNO в зимнее время. В качестве основных причин рассматривались атмосферные явления: метели или барометрический пампинг-эффект. При анализе данных за последние 5 лет был обнаружен рост амплитуды сезонных колебаний давления (со скоростью ~9%) и концентрации продуктов распада радона в приземном слое воздуха на n-BNO (также со скоростью ~9% в год), в основном – в зимнее время. Учащение погодных и радионуклидных аномалий в последние годы может служить показателем глобальных климатических изменений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sten'kin Yu.V.* // in: Nuclear track detectors: design, methods and application. Ch. 10. Nova Sci. Publ. Inc., 2010. P. 253.
2. *Громушкин Д.М., Петрухин А.А., Стенькин Ю.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 425; *Gromushkin D.M., Petrukhin A.A., Stenkin Y.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 3. P. 407.
3. *Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Багрова А.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 179; *Stenkin Y.V., Alekseenko V.V., Bagrova A.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 160.
4. *Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Цаи Ж. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 666; *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Cai Z. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 607.
5. *Алексеенко В.В., Громушкин Д.М., Джанпуев Д.Д. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 739; *Alekseenko V.V., Gromushkin D.M., Dzhabpuev D.D. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 682.
6. *Арабаджи В.И.* Загадки простой воды. М.: Знание, 1973. С. 50.
7. *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Dzhabpuev D.D. et al.* // J. Environ. Radioactivity. 2020. V. 222. Art. No. 106335.
8. *Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М. и др.* // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. № 5. С. 845; *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Gromushkin D.M. et al.* // J. Exp. Theor. Phys. 2017. V. 124. No. 5. P. 718.
9. *Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Игошин А.В. и др.* // ЖЭТФ. 2020. Т. 158. № 3. С. 469; *Stenkin Y.V., Alekseenko V.V., Igoshin A.V. et al.* // J. Exp. Theor. Phys. 2020. V. 131. No. 3. P. 418.

**Analysis of variations in concentration of radon decay products  
in near surface layer of the atmosphere**

**A. A. Lagutkina<sup>a, \*</sup>, D. D. Dzhappuev<sup>b</sup>, A. U. Kudzhaev<sup>b</sup>, D. A. Kuleshov<sup>b</sup>, K. O. Kurinov<sup>b</sup>,  
O. I. Miklailova<sup>b</sup>, Yu. V. Stenkin<sup>a, b</sup>, O. B. Shchegolev<sup>a, b</sup>**

*<sup>a</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia*

*<sup>b</sup> Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

*\*e-mail: lagutkina.aa@phystech.edu*

In the last few years an increase in the amplitude of seasonal pressure wave and heavy radioactive nuclides concentration at Baksan Neutrino Observatory of INR RAS in the North Caucasus is being observed. The foregoing tendency, as well as the anomalies observed in the detectors data in autumn-winter, 2017 and winter-spring, 2021 are investigated. Hypotheses of the anomalies reasons and their connection to observed trends are presented.