

ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА И ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДЗЕМНЫЙ ФОНОВЫЙ ПОТОК ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Ю. В. Стенькин ^{a,b*}, В. В. Алексеенко ^a, Д. М. Громушкин ^b,

В. П. Сулаков ^c, О. Б. Щеголев ^a

^a Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия

^b Национальный ядерный исследовательский университет МИФИ
115409, Москва, Россия

^c Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.

Известно, что нейтронный фон является серьезной проблемой для подземных низкофоновых экспериментов, таких как поиск темной материи, поиски двойного бета-распада и других экспериментов, объединяемых термином «подземная физика». Мы приводим здесь некоторые результаты, полученные с помощью эн-детектора площадью 0.75 м², который работает более четырех лет под землей на глубине 25 м водного эквивалента в Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Наблюдаются спорадические увеличения потока тепловых нейтронов (до 3 раз). Явление можно объяснить адвекцией грунтовых газов, или, другими словами, эффектом «барометрической откачки» радона (barometric pumping effect). Суть его состоит в том, что перепады атмосферного давления создают градиент давления в грунте и вызывают адвекцию всех подземных газов. Скорость адвекции определяется пористостью или проницаемостью окружающих пород, но она всегда выше обычной скорости диффузии и всегда ограничена, что создает задержку между началом изменения давления и изменением концентрации газа в подземном помещении. Радиоактивный инертный газ радон, всегда присутствующий в грунте, является основным источником нейтронов на достаточно больших глубинах за счет (α, n)-реакций, производимых в результате альфа-распадов радона и его дочерних ядер. Впервые барометрическая откачка обнаружена для нейтронов и показано существование антикорреляции между возрастанием потока тепловых нейтронов под землей и падением атмосферного давления, наблюдавшимся примерно за 2 дня до него.

DOI: 10.7868/S0044451017050054

1. ВВЕДЕНИЕ

Многие низкофоновые эксперименты, такие как, например, поиск двойного бета-распада и поиск темной материи, проводятся глубоко под землей и, как правило, чувствительны к фону, вызванному нейтронами. Специальные пассивные и/или активные меры защиты от этого фона не могут полностью исключить его. По этой причине экспериментаторы

должны тщательно измерять изменения существующего в подземной лаборатории нейтронного фона и учитывать их при анализе экспериментальных данных. Мы обнаружили спонтанные увеличения потока тепловых нейтронов под землей, которые могут быть объяснены геофизическим эффектом «барометрической откачки» (barometric pumping effect) [1–3] подземных газов или их адвекции под воздействием перепадов атмосферного давления. Почвенный воздух, увлекая за собой все другие газы (включая радон), переносится из более глубоких слоев почвы к верхним слоям, а затем из почвы в атмосферу при снижении атмосферного давления. Ес-

* E-mail: stenkin@sci.lebedev.ru

ли подземная лаборатория связана с атмосферой, но не имеет принудительной вентиляции и газоизоляции внутренней поверхности, то внутри ее объема может наблюдаться значительное возрастание концентрации радона под воздействием указанного барометрического эффекта. Концентрация радона в окружающей породе (почве, бетоне или в других пористых веществах) также зависит от этого эффекта, вызывая изменения и в концентрации нейтронов.

Мы создали сеть эн-детекторов, работающих как на поверхности, так и на различных глубинах под землей, для измерения вариаций природных потоков нейтронов [4]. Основой эн-детектора является неорганический сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{LiF}$, чувствительный к тепловым и надтепловым нейтронам благодаря наличию ядер ${}^6\text{Li}$. Изначально он был разработан в рамках проекта PRISMA [5] для изучения двух основных компонент широких атмосферных ливней: электронов (e) и нейтронов (n) [6], откуда и получил название эн-детектор. Детектор показал отличные рабочие характеристики и стабильность, позволившие проводить на нем долговременные измерения вариаций потока тепловых нейтронов. Оцифровка формы импульса и отбор событий по форме импульса позволяют отделять события захвата нейтронов от фоновых событий. В данном эксперименте используется эн-детектор, работающий в течение 4 лет на глубине 10 м в подземном помещении в НИИЯФ МГУ.

2. ДЕТЕКТОР

Новый тип сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов (эн-детектор) основан на хорошо известном специализированном гранулированном сплаве $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$, который используется для регистрации тепловых и надтепловых нейтронов. Толщина сцинтилляционного слоя составляет всего около 30 мг/см^2 , что делает его мало чувствительным к одиночным заряженным частицам. Чувствительная площадь поверхности сцинтиллятора составляет 0.75 м^2 . Схематическое изображение эн-детектора и его характеристик можно найти в работе [7].

Эффективность регистрации тепловых нейтронов составляет около 20%. Эффективность зависит от скорости v тепловых нейтронов как $1/v$, что типично для тонких детекторов. Из-за тонкого сцинтилляционного слоя одиночные релятивистские заряженные частицы, такие как электроны или мюоны, дают сигналы ниже порогового значения. Это

позволяет использовать детектор в счетном режиме для изучения вариаций потока тепловых нейтронов. Из-за наличия нескольких сцинтилляционных постоянных времени (от 40 нс до нескольких микросекунд и более) в $\text{ZnS}(\text{Ag})$ длительность переднего фронта интегрированного импульса от тяжелых и медленно движущихся частиц (альфа-частицы и тритон, излучаемые в результате захвата нейтронов на ${}^6\text{Li}$) больше, чем от прохождения релятивистской заряженной частицы или шумов ФЭУ. Мы исключаем фоновые сигналы, применяя метод отбора по форме импульса.

Отличительной особенностью нашего процесса сбора данных является то, что все импульсы от ФЭУ интегрируются с постоянной времени 5 мкс, а затем оцифровываются с помощью FADC во временных воротах 100 мкс с шагом 50 нс. Другими словами, используются онлайн-анализ формы импульса, отбор и подсчет реальных импульсов от захвата нейтронов, а также отбраковка и подсчет коротких фоновых импульсов. Технические детали и некоторые предварительные результаты можно найти в работах [4, 6–9]. Используемый в данной работе эн-детектор находится на глубине 25 м водного эквивалента в шахте мюонного детектора ШАЛ-МГУ в Московском государственном университете [10]. Подземная комната, где работает детектор на протяжении 4 лет, не имеет принудительной вентиляции и никакой защиты от проникновения газа из почвы. Экспериментальные данные накоплены в виде временных рядов с шагом 1 мин. Детектор имеет очень стабильное долгосрочное поведение, которое контролируется с помощью ежедневных спектров энергодельностей. Кроме того, проводится непрерывное измерение атмосферного давления, температуры и влажности в помещении. Эта информация записывается каждую минуту в виде таких же временных рядов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Детектор расположен достаточно глубоко, чтобы предотвратить проникновение туда адронов космических лучей. На этой глубине детектор регистрирует в основном нейтроны, производимые альфа-частицами от альфа-распада нуклидов в естественных радиоактивных цепочках U и Th в реакциях вида $(A, Z)(\alpha, n) \rightarrow (A + 3, Z + 2) + n$ на легких ядрах земной коры типа Be, B, F, Na, Al, Mg, Si и др. (A — атомный вес ядра, Z — его заряд). Нейтроны, возникающие при взаимодействиях мюонов на неболь-

ших и средних глубинах, также могут давать некоторый вклад, особенно если речь идет о нейтронах с высокой энергией. Однако этот вклад много меньше вклада естественной радиоактивности на глубинах более 20 м водного эквивалента. Следовательно, можно было бы ожидать отсутствия барометрического эффекта на этих глубинах. Мы пытались вычислить обычный барометрический коэффициент, и он действительно оказался близким к нулю. Тем не менее иногда наблюдаются спорадические всплески нейтронного фона, вплоть до трехкратного увеличения, как можно видеть на рис. 1а, где показано поведение среднесуточных значений отсчетов нейтронных захватов в эн-детекторе, а также поведение среднесуточных точек атмосферного давления, которые могут объяснить наш результат. Длительное монотонное понижение атмосферного давления в период с 4 по 11 января (рис. 1б) вызвало значительное увеличение нейтронного фона. Следует отметить, что абсолютный нейтронный фон под землей сильно зависит от глубины, геологии места измерений, химического состава грунта, его радиоактивности, пористости и т. д. Поток нейтронов зависит также от геометрии и конструкции подземного экспериментального помещения: газо- и гидроизоляции, использования низкорadioактивного бетона и других материалов, наличия или отсутствия принудительной вентиляции.

Радиоактивный газ радон ($Rn-222$), являющийся одним из звеньев в цепи распадов $U-238$, имеет период полураспада равный 3.8 сут и, являясь инертным газом, может мигрировать вместе с другими газами на большие расстояния в пористой среде типа грунта, осадочных пород, бетона и др. Если радон или его дочерний альфа-активный нуклид распадается в перечисленных средах, то возможна, хоть и с малой вероятностью, (α, n) -реакция с образованием нейтрона, который, замедлившись в грунте, может затем попасть внутрь подземной лаборатории. Распады в воздухе (за исключением ближайшей к твердым материалам окрестности) не приводят к генерации нейтронов из-за отсутствия в воздухе нужных ядер-мишеней, упоминавшихся выше, и малого (3–5 см) пробега в воздухе альфа-частиц с энергией в диапазоне мегаэлектронвольт. Именно поэтому наш детектор регистрирует нейтроны, рожденные в окружающем грунте или бетоне (толщиной 2–3 м), и нечувствителен к вентиляции воздуха в помещении, сквознякам, открываниям дверей. Это дает нашему детектору преимущество по сравнению с обычными радонометрами, измеряющими концентрацию радона в воздухе и, следовательно, чувствительными к

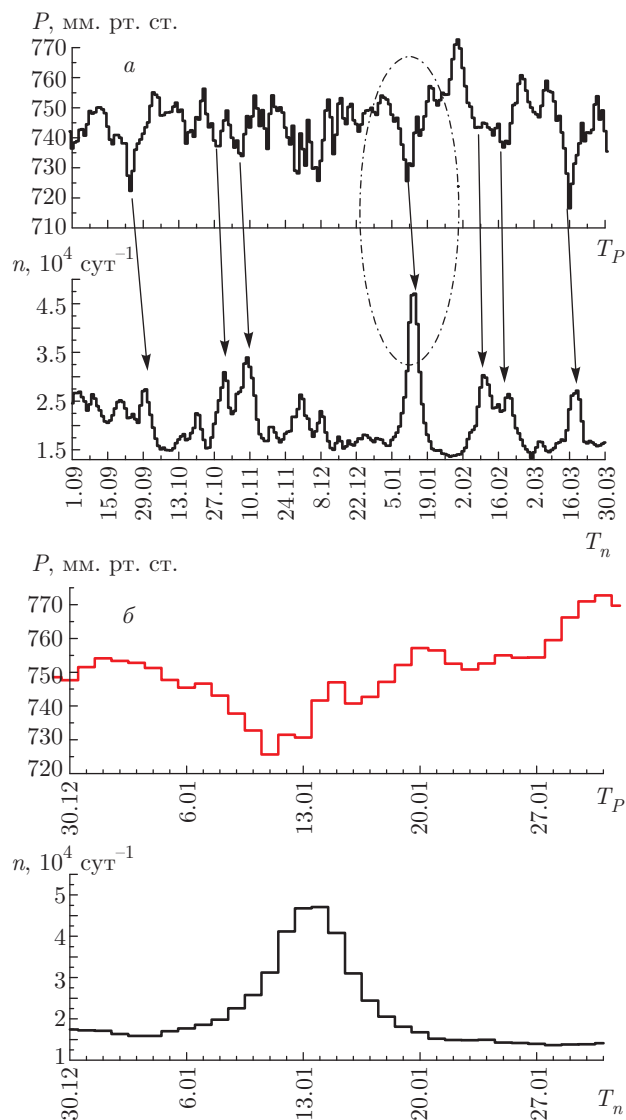


Рис. 1. Временные ряды суточных точек счета нейтронов и атмосферного давления с 1 сентября 2013 по 30 марта 2014 (а) и растянутый период максимального возрастания в январе (б). Стрелки показывают видимые корреляции между минимумами в давлении и максимумами в счете нейтронов

любому движению воздуха, а результаты их измерений подвержены значительным флуктуациям.

На рис. 1 видно, что существует примерно двухдневная задержка между минимальными показаниями в давлении и максимальными в потоке нейтронов. Наличие задержки указывает на длительный процесс газовой диффузии и адвекции. Схожая задержка между поверхностным (атмосферным) и подповерхностным давлениями наблюдалась в работе [3]. Разница в давлении и является причиной диффузии и адвекции почвенных газов, т. е. эффек-

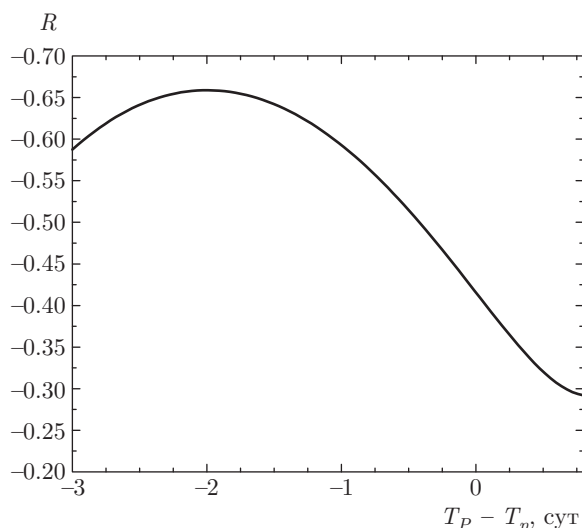


Рис. 2. Коэффициент корреляции R как функция временного сдвига в данных

та «барометрической откочки». Для того чтобы проверить эту гипотезу, мы проанализировали данные за длительный период наблюдений с целью поиска оптимального временного сдвига между давлением и темпом счета нейтронов, приводящего к максимальному по абсолютной величине коэффициенту корреляции. Результат показан на рис. 2. Оптимальный сдвиг очень близок к двум суткам при максимальном коэффициенте корреляции $R = -0.66$.

Это служит подтверждением предположения, что задержанный барометрический эффект действительно существует не только для радона в грунте, но и для находящихся с ним в равновесии нейтронов. После применения оптимальной задержки к данным по атмосферному давлению, мы оценили корреляцию между «задержанным» на 2 сут давлением и отсчетами нейтронов за весь период максимального нейтронного возрастания с 4 по 23 января 2014 г. с помощью корреляционного графика, представленного на рис. 3. На графике хорошо видна антикорреляция между задержанным атмосферным давлением P в абсолютных единицах и нормализованным нейтронным потоком $n/\langle n \rangle$. При этом полученный коэффициент корреляции равен $R = -0.93 \pm 0.09$, а коэффициент регрессии равен $-(6.4 \pm 0.6) \%$ /мм рт. ст. Таким образом, найденный «задержанный» барометрический коэффициент в 6.4 раза больше обычного барометрического коэффициента для адронов космических лучей на поверхности Земли, величина которого близка к -1% /мм рт. ст.

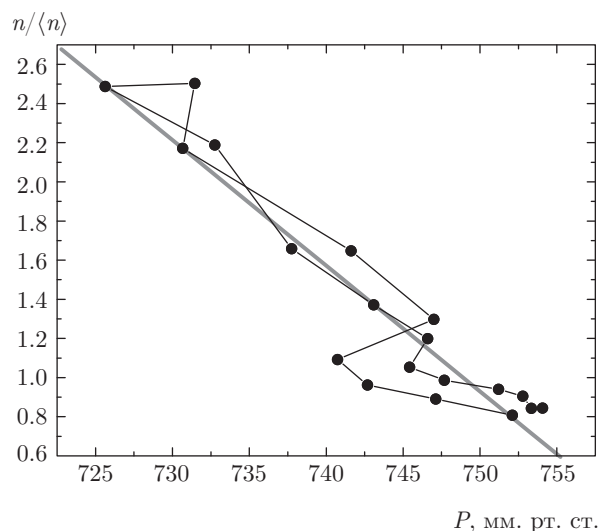


Рис. 3. Антикореция между абсолютным среднесуточным давлением и относительным среднесуточным счетом нейтронов

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы понять и объяснить полученную задержку, можно воспользоваться простейшим уравнением диффузии газов в пористой среде. Для одномерного случая вдоль направления x концентрация C некоего газа зависит от времени t и расстояния x следующим образом:

$$C(t, x) = C_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2Dt}\right),$$

где C_0 — начальная концентрация, D — коэффициент диффузии. Интегрируя это выражение по x , получаем

$$Q(t) = \int_0^{\infty} C(t, x) dx \simeq \sqrt{tD},$$

т. е. если приложен постоянный градиент давления (стационарный случай), то интегральная концентрация Q будет нарастать со временем как \sqrt{t} : $Q(t) \propto \sqrt{t}$.

Похожий результат приведен в работе [6]. Для радиоактивного распада радона с временем жизни τ результирующую зависимость для выхода нейтронов можно записать в виде

$$W(t) \propto Q(t) \exp(-t/\tau) \propto \sqrt{tD} \exp(-t/\tau).$$

Легко убедиться, что эта функция имеет максимум при $t_{max} = \tau/2 \approx 2.7$ сут.

Эта грубая оценка близка к найденной экспериментальной задержке в 2 сут. Ясно, однако, что нестационарная газовая диффузия, а точнее адвекция, будет наблюдаться только при наличии градиента давления в окружающем грунте. Ясно также, что изменение атмосферного давления влияет не только на воздух, но и на все подземные газы. Если приложить мгновенное изменение давления δP на границе x слоя грунта, то начнется нестационарный процесс переноса всех грунтовых газов, называемый адвекцией. Через некоторое время, зависящее от параметров пористости среды, давление на границах слоя сравняется ($\delta P \rightarrow 0$) и процесс остановится. Однако если барометрическое давление понижается день за днем в течение долгого времени (как это случилось в Москве 4–11 января 2014 г.), то процесс будет продолжаться в квазистационарном виде и приведенные выше формулы окажутся правдоподобными. Это объясняет отчасти тот факт, что только продолжительные и монотонные понижения давления вызывают значительный эффект, тогда как сильные, но кратковременные скачки давления вверх и вниз не вызывают больших возрастаний нейтронного фона (как это было в начале февраля, см. рис. 1). Двухдневная задержка между минимумом атмосферного давления и максимумом счета нейтронов является индикатором того, что адвекция радона в грунте действительно имеет место и именно она обеспечивает большую задержку. Когда градиент давления меняет знак, накопленная в слое грунта концентрация радона уменьшается как за счет обратной адвекции (незначительно), так и за счет радиоактивного распада с константой τ (основной канал). Последнее утверждение подтверждается формой спада счета нейтронов показанной на рис. 1б (с 14 по 20 января) и близкой к экспоненте с параметром τ .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты работы могут быть коротко сформулированы следующим образом: впервые обнаружен и описан задержанный барометрический эффект для природного потока тепловых нейтронов под землей. Благодаря этому эффекту, возможны значительные (до трех раз) «спонтанные» возрастания потоков фоновых нейтронов в подземных лабораториях, не поддерживающих постоянным давление воздуха в экспериментальных помещениях. Двухдневная задержка между минимумом атмосферного давления и максимумом счета нейтронов является индикатором того, что адвекция радона в грунте действительно имеет место (эффект барометрической откачки). Наличие этого

эффекта в случае нейтронов свидетельствует об их генетической связи с радоном в земной коре, который является основным источником нейтронов глубоко под землей. Исследователи, работающие в низкофоновых подземных лабораториях, должны проявлять осторожность при оценке возможного фона от нейтронов, способного имитировать наблюдаемые эффекты. Так, для стабилизации этого фона нужно как контролировать непосредственно нейтронный фон, так и стабилизировать давление воздуха внутри помещений и/или делать внутреннюю поверхность помещений непроницаемой для газов. Указанный эффект значительно превышает по амплитуде наблюдавшуюся нами ранее сезонную волну в потоке фоновых нейтронов под землей [11].

Авторы благодарят за финансовую поддержку РФФИ (гранты №№ 14-02-00996, 16-29-13067, 16-32-00054), а также Программу Президиума РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика». Мы также благодарны С. Гупте (Prof. Sunil Gupta) за дискуссию и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gas Transport in Porous Media*, (Theory and Applications of Transport in Porous Media), ed. by K. Cliford, Ho Sandia, and S. W. Webb, Springer, New York (2006).
2. V. V. Mourzenko, C. Varloteaux, S. Guillon et al., *Geophys. Res. Lett.* **41**, 6698 (2014).
3. Xingxing Kuang, Jiu Jimmy Jiao, and Hailong Li, *Water Resources Res.* **49**, 1 (2013).
4. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno et al., *Phys. Rev. Lett.* **114**, 125003 (2015).
5. Y. V. Stenkin, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **196**, 293 (2009).
6. B. Bartoli, P. Bernardini, X. J. Bi et al., *Astropart. Phys.* **81**, 49 (2016).
7. Y. V. Sten'kin, in *Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications*, ed. by M. Sidorov and O. Ivanov, Nova Sci. Publ. (2010), Ch. 10.
8. В. В. Алексеенко, Д. Д. Джаптуев, В. А. Козярицкий и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **71**, 1075 (2007).
9. V. V. Alekseenko, Yu. M. Gavriluk, V. V. Kuzminov, and Yu. V. Stenkin, *J. Phys. Conf. Ser.* **203**, 012045 (2010).
10. S. N. Vernov, G. B. Christiansen, V. B. Atrashkevich et al., in *Proc. 16th Intern. Cosmic Ray Conf.* (Kyoto, Japan), Vol. 6, p. 129 (1979).
11. V. V. Alekseenko, Yu. M. Gavriluk, V. V. Kuzminov, and Yu. V. Stenkin, <http://taup2009.lngs.infn.it/slides/jul3/stenkin.pdf>.