

ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА И НЕЛИНЕЙНЫЙ ЗАДЕРЖАННЫЙ БАРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ГАММА-ФОНА

Ю. В. Стенькин ^{a,b*}, В. В. Алексеенко ^a, А. В. Игошин ^c, Д. А. Кулешов ^a,
К. Р. Лёвочкин ^a, В. И. Степанов ^a, В. П. Сулаков ^c, В. В. Рулев ^a, О. Б. Щеголев ^a

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

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

^c Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

Поступила в редакцию 31 марта 2020 г.,
после переработки 10 апреля 2020 г.
Принята к публикации 12 апреля 2020 г.

Известно, что проблема гамма-фона остро стоит в любом низкофоновом подземном эксперименте. Вариации этого фона зависят от многих параметров и должны учитываться при интерпретации результатов экспериментов, объединяемых термином «подземная физика». Данная работа посвящена изучению долговременных вариаций гамма-фона в подземной лаборатории с помощью сцинтилляционного детектора на основе кристалла CsI. При проведении исследований был обнаружен новый эффект в подземной физике — задержанный нелинейный барометрический пампинг-эффект для гамма-фона в подземном помещении, способный приводить к значительному возрастанию этого фона при аномально низком атмосферном давлении.

DOI: 10.31857/S0044451020090059

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема фона в низкофоновых экспериментах решается различными методами, с помощью пассивной и активной защиты, однако она никогда не может быть решена полностью как из-за наличия в любом материале нуклидов естественной радиоактивности, так и из-за наведенной проникающими космическими лучами активности внутри защиты. В предыдущей нашей работе [1] по данной теме было описано обнаружение большого задержанного барометрического эффекта для нейтронного фона в подземной лаборатории, связанного с диффузией и пампинг-эффектом радиоактивного газа радона в грунте. В ходе выполнения настоящей работы был обнаружен еще один новый эффект — задержанный нелинейный барометрический пампинг-эффект для

гамма-фона в той же подземной лаборатории установки ШАЛ-МГУ [2] в НИИЯФ МГУ на глубине 25 м водного эквивалента. Эффект также связан с диффузией радона в окружающем грунте и проявляется лишь при падении атмосферного давления, однако параметры процесса диффузии отличны от таковых для нейтронов. Относительная величина эффекта также много меньше, чем наблюдается для нейтронов, тем не менее эффект вполне значим.

Пампинг-эффект известен геофизикам уже более 100 лет [3] и существует обширная литература на эту тему (см., например, обзор [4] и ссылки в нем). Эффект заключается в следующем: при периодических колебаниях атмосферного давления происходит как откачка подземных газов в атмосферу, так и, наоборот, закачка воздуха в грунт. На самом деле этот эффект имеет общий характер и проявляется на границе двух сред типа атмосфера–вода, атмосфера–грунт для таких параметров сред, как давление, температура, концентрация различных газов и т. д. Как будет видно ниже, для нас ва-

* E-mail: stenkinyv@lebedev.ru

жен выход подземных газов из грунта в подземную полость. Обычная диффузия газов в пористой среде есть всегда, а пампинг-эффект для интересующего нас случая диффузии газов в грунте к поверхности включается только при понижении давления, когда оно становится меньше, чем в лежащих ниже слоях грунта. В случае полости в грунте, каковой является подземная лаборатория, выход газов происходит со всех сторон и под словами «лежащие ниже» следует понимать «удаленные» от границы раздела сред.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Помимо описанного в работе [1] электронно-нейтронного детектора (эн-детектора), измеряющего поток тепловых нейтронов, в установку был добавлен небольшой детектор на основе кристалла CsI (диаметром 3 см и высотой 6 см), просматриваемого небольшим фотоумножителем ФЭУ-85. Интенсивность гамма-фона много выше, чем интенсивность нейтронного фона, поэтому таких размеров оказалось более чем достаточно для обеспечения высокой статистической точности измерений. После усиления зарядо-чувствительным предусилителем все сигналы с этого детектора оцифровываются быстродействующим АЦП (выполненным в виде PCI-слота в промышленном компьютере) с шагом 50 нс, так же как и все сигналы эн-детектора площадью 0.75 м^2 , регистрирующего тепловые нейтроны. Применялась методика отбора сигналов по форме импульса, хотя в случае гамма-детектора все сигналы сцинтиллятора имеют одинаковую длительность, около 1 мкс. Тем не менее процедура позволяет отбраковать короткие импульсы, вызванные шумами ФЭУ, а также редкие, слишком длинные и нестандартные импульсы от электромагнитных помех. Число отобранных импульсов каждую минуту записывается на диск, т. е. мы имеем 1440 точек в день, наряду с данными о метеопараметрах в месте проведения измерений. Накопленные временные ряды обрабатываются и анализируются офлайн.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Результаты измерений интенсивности гамма-фона в виде суточного временного ряда показаны на рис. 1, наряду с величиной атмосферного давления. Как видно из графика, статистическая точность суточных точек очень высока ($\approx 6 \cdot 10^{-4}$)

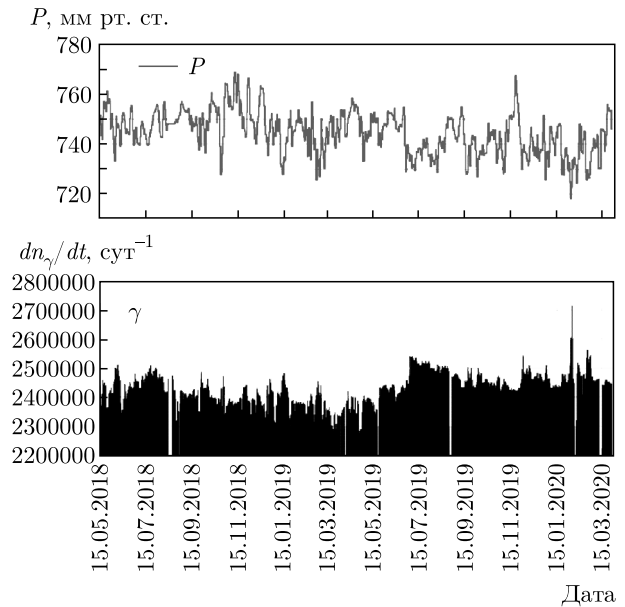


Рис. 1. Суточные временные ряды гамма-фона и атмосферного давления за 34 месяца наблюдений

и колебания интенсивности не могут объясняться статистическими флуктуациями (провалы в данных связаны с перерывами в работе установки). Видно также, что на фоне сезонных колебаний, за время наблюдений с 15 мая 2018 г. и вплоть до декабря 2019 г., не наблюдалось коротких значимых пиков, тогда как в декабре 2019 г. и в 2020 г. наблюдался ряд острых пиков, превышающих уровень $2.5 \cdot 10^6$ отсчетов в сутки. Попробуем найти причину такого поведения.

Как видно из рис. 1, наиболее значимый пик наблюдался в феврале 2020 г. На рис. 2 этот же пик показан в развернутом виде (с шагом 1 мин), наряду с поведением атмосферного давления и потока тепловых нейтронов. Последний, как видно из рисунка, имел значительное превышение (около 100 %) и задержку 2 сут, что совпадает с ранее опубликованной величиной [1] и связано с медленной диффузией радона в грунте, в том числе и за счет пампинг-эффекта на глубине порядка 1–2 м — эффективной глубине рождения регистрируемых нейтронов. Новым является заметное превышение гамма-фона приблизительно на 12 % и задержка превышения на 24 ч. Меньшую задержку гамма-фона можно объяснить тем, что выход радона из грунта в воздух помещения начинается раньше и происходит быстрее, так как для этого не нужны удаленные слои грунта, поскольку детектор измеряет гамма-фон в воздухе и в тонком слое грунта, толщина которого

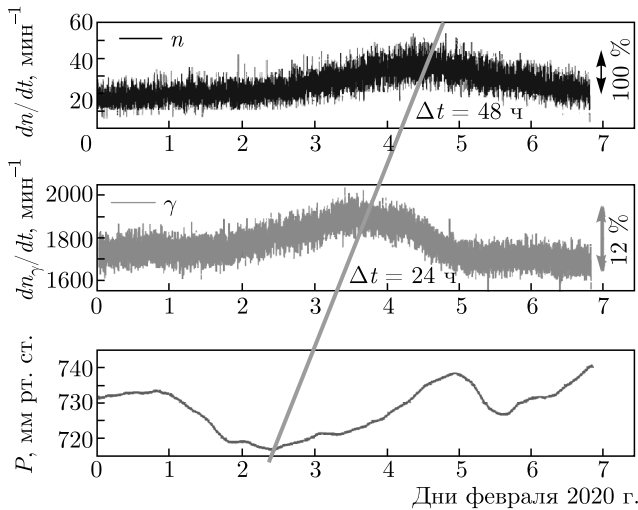


Рис. 2. Отклик гамма-фона и потока тепловых нейтронов на аномальное понижение атмосферного давления в феврале 2020 г. Минутные точки

определяется энергией гамма-квантов и длиной их поглощения в наружном слое стен, потолка, пола. Для гамма-квантов с энергией до 2.6 МэВ, сопровождающих распады дочерних ядер радона (торона), длина поглощения в бетоне составляет не более 20–30 см. Это много меньше эффективной глубины генерации регистрируемых тепловых нейтронов, которым необходимо перед регистрацией замедлиться в грунте, а в процессе замедления в грунте они способны пройти несколько метров. Генерация нейтронов на достаточно больших глубинах происходит в (α, n)-реакциях, вызываемых α -распадами радиоактивных ядер из урановой и ториевой цепочек естественной радиоактивности по всей глубине земной коры. Однако наибольший вклад в вариации нейтронного потока дают распады газа Rn-222, живущего около 4 сут, за которые он успевает пройти достаточно большое расстояние, зависящее от пористости грунта, его состава, трещиноватости, насыщенности грунтовыми водами и т. д. Любое увеличение газопроницаемости грунта либо значительное понижение атмосферного давления вызывает повышение концентрации радона в верхних слоях грунта за счет поступления новых порций из более глубоких слоев. Это также приводит к повышению фона гамма-квантов, сопровождающих β -распады короткоживущих дочерних нуклидов, в основном Bi-214 и Pb-214.

Для того чтобы убедиться в том, что регистрируемое превышение действительно вызвано регистрацией β -распадов указанных ядер, мы сравнили

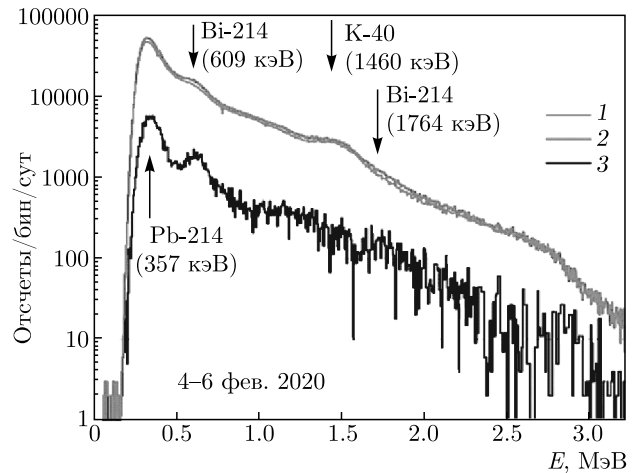


Рис. 3. (В цвете онлайн) Суточные энергетические спектры гамма-фона 06.02.20 (кривая 1) и 04.02.20 (кривая 2) и их разность (кривая 3)

суточные энергетические спектры регистрируемых квантов в день наибольшего превышения 04.02.20 со спектром 06.02.20, т. е. в спокойный период. Результат показан на рис. 3. Видно, что в разностном спектре хорошо выделяется характеристическое излучение нуклидов Bi-214 и Pb-214, особенно 609 кэВ и 357 кэВ. На графиках также виден небольшой пик 1.46 МэВ от распада K-40 (используемый нами для энергетической привязки), не связанного с радоновой цепочкой и имеющегося практически везде, но отсутствующего в разностном спектре, что говорит о стабильности наших измерений. Эти данные однозначно свидетельствуют о том, что наблюдаемое превышение гамма-фона вызвано именно избытком радона в подземном помещении 04.02.20. Кроме того, отсюда следует еще одно доказательство того, что наблюдаемое превышение в нейтронном фоне также связано с избытком радона Rn-222. Раньше у нас было только одно косвенное доказательство [1] — сама двухдневная задержка по отношению к минимуму барометрического давления, которую трудно объяснить чем-то, кроме как диффузией радона в грунте.

3.2. Попытаемся теперь объяснить еще один экспериментальный факт, а именно, почему такие превышения раньше не наблюдались? Для этого еще раз внимательно посмотрим на рис. 1 и вспомним, что зима 2019–20 гг. была в Москве аномальной. Аномально теплая зима, как известно, была связана с аномально продолжительным и аномально низким атмосферным давлением, вызванным идущими один за другим циклонами с Атлантики. Как ре-

зультат, именно 3 февраля 2020 г. давление воздуха опустилось до рекордного уровня 717.5 мм рт. ст. по нашим измерениям. По данным измерений на метеостанции ВДНХ минимальное значение было 722.9 мм рт. ст. Заметим, что абсолютный минимум давления в Москве за все время наблюдений равен 709 мм рт. ст. Из рис. 1 видно, что значения ниже 730 мм наблюдались ранее, но при этом на вызывали заметного превышения гамма-фона. Почему же лишь при рекордном понижении давления эффект проявился? Объяснение данному факту, имеющему общий характер и множество аналогий в природе, можно найти в работе Зырянова [5], описывающей природу нелинейного пампинг-эффекта. Обычный пампинг-эффект состоит в том, что при наличии на границе раздела двух сред периодических колебаний какого-либо параметра (температуры, давления и т. д.) происходит накачка либо откачка в зависимости от параметров и средние значения параметра на поверхности и на глубине различаются. Нелинейный пампинг-эффект заключается в нелинейной (квадратичной) зависимости величины откачки от амплитуды периодических колебаний на границе сред. В работе получено приближенное решение уравнения теплопроводности, применимого, однако, и для множества других природных процессов:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b \operatorname{div} [F(T) \operatorname{grad} T].$$

После ряда допущений было получено решение величины откачки в виде

$$T^{(\pm)}(\infty) = \frac{\beta T_1^2}{4\alpha}.$$

Здесь $T^{(\pm)}$ — искомая величина на бесконечной глубине (в нашем случае это концентрация радона на достаточно большой глубине в грунте ниже слоя, где генерируются регистрируемые гамма-кванты либо создающий их радон и его короткоживущие продукты), α и β — некие параметры, T_1 — амплитуда колебаний параметра среды (в нашем случае атмосферного давления). Как видно из равенства, величина откачки (или накачки, в зависимости от знака параметров) квадратично зависит от амплитуды колебаний. В нашем случае это колебания атмосферного давления. На рис. 4 показано, как наблюдаемый нами в эксперименте гамма-фон зависит от атмосферного давления, сдвинутого вперед на 24 ч. Представлены данные за последние 5 месяцев (01.11.19–30.03.20). Фитирующие параметры показанной на графике параболы приведены на рисунке. Как видим, парабола очень точно описывает наблюдаемый эффект. Если для давления ниже

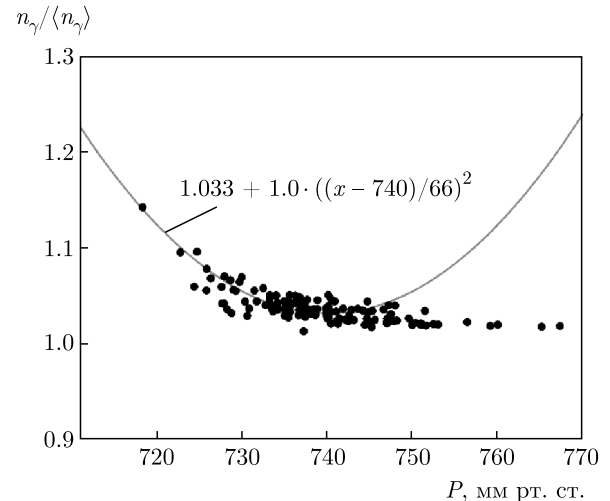


Рис. 4. Зависимость от атмосферного давления интенсивности гамма-фона, нормированного на среднее за все время наблюдений

730 мм рт. ст. подобрать линейный фит, то его задержанный барометрический коэффициент будет близок к $-0.83\%/мм\text{ рт. ст.}$, что не мало, хотя и много меньше такового для тепловых нейтронов [1].

Стоит отметить асимметрию данных на рис. 4, что вполне ожидаемо, поскольку для возрастания гамма-фона важен именно эффект откачки воздуха вместе с радоном из более глубоких слоев грунта. Дело в том, что генерация радона-222, являющегося продуктом распада радия-226, происходит по всей толщине земной коры. Диффузия радона в атмосферу, где его концентрация мала, создает градиент концентрации с понижением в сторону поверхности. Из графика видно, что правая часть параболы не описывает наблюдаемый эффект, который практически не зависит от повышения давления выше среднего, поскольку при этом происходит закачка атмосферного воздуха из лежащих выше слоев грунта в лежащие ниже, и она может только понизить концентрацию радона на заданной глубине, тогда как выход радона и продуктов его распада в воздух прекращается. Это и приводит к наблюдаемому незначительному снижению гамма-фона в помещении (по величине снижения можно судить о снижающейся доле распадов в воздухе по отношению к распадам непосредственно в грунте). Схожая асимметрия наблюдалась и при регистрации нейтронов [1].

В чем состоит отличие обнаруженного эффекта от, казалось бы, очень схожего пампинг-эффекта, обнаруженного на этой же установке ранее для тепловых нейтронов? Отличие в том, что, как уже отме-

чалось, эффективная глубина рождения регистрируемых в подземном помещении тепловых нейтронов находится в грунте на глубине 1–2 м. Для этого случая измеряемой величиной является концентрация радона в грунте на таких глубинах, а не в воздухе над поверхностью или на глубине 10–20 см в грунте, как при регистрации гамма-фона. Отсюда и примерно в 2 раза бóльшая задержка и различие в отклике на колебания атмосферного давления. Очевидно, что для запуска нелинейного пампинг-эффекта для фоновых нейтронов аномально низкое давление должно длиться достаточно долго, более 2 сут. Возможно, когда-нибудь реализуются условия появления нелинейного пампинг-эффекта и для нейтронов.

4. ВЫВОДЫ

Несмотря на более чем 100-летнюю историю открытия пампинг-эффекта в геофизике для подземных газов, он до сих пор мало известен физикам. Между тем, этот эффект имеет прямое отношение к ядерной физике благодаря присутствию в подземных газах радиоактивных газов — изотопов радона. В результате выполнения данной работы был обнаружен новый физический эффект — запаздывающий нелинейный пампинг-эффект для гамма-фона в подземном помещении. Эффект, связанный с откачкой радона, имеет важное значение для так называемой «подземной физики» — раздела экспериментальной физики, подразумевающего проведение низкофоновых измерений в подземных лабораториях, поскольку вариации гамма-фона, так же как и нейтронного, могут создать проблемы

при интерпретации экспериментальных данных. Обнаруженное квадратичное поведение этого фона в зависимости от аномально низкого задержанного атмосферного давления находится в прекрасном согласии с теорией, что подтверждает правильность полученных результатов.

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00339), а также Программы Президиума Российской академии наук «Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, Д. М. Громущкин, В. П. Сулаков, О. Б. Щеголев, ЖЭТФ **151**, 845 (2017) [Yu. V. Stenkin, V. V. Alekseenko, D. M. Gromushkin, V. P. Sulakov, and O. B. Shchegolev, JETP **124**, 718 (2017)].
2. S. N. Vernov, G. B. Khristiansen, V. B. Atrashkevich et al., in *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf.*, Kyoto, Vol. 6, p. 129 (1979).
3. E. Buckingham, *Contributions to Our Knowledge of the Aeration of Soils*, U.S. Dep. Agric., Bur. Soils Bull. No. 25 (1904).
4. G. Etiopie and G. Martinelli, *Phys. Earth and Planetary Interiors* **129**, 185 (2002).
5. В. Н. Зырянов, *Водные ресурсы* **40**, 227 (2013).