ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 5, с. 758–760

УДК 539

ВАРИАЦИИ ФОНОВОГО ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА КАМЧАТКЕ

© 2022 г. Ю. В. Стенькин[1, *], В. В. Алексеенко[1], Д. А. Кулешов[1], К. Р. Лёвочкин[1], Е. О. Макаров[2], П. П. Фирстов[2], О. Б. Щеголев[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт ядерных исследований Российской академии наук", Москва, Россия

[2]Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук", Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: stenkinyv@lebedev.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.
После доработки 05.11.2021 г.
Принята к публикации 22.11.2021 г.

В мае 2019 г. в Петропавловске-Камчатском начались измерения вариаций фонового потока тепловых нейтронов (установка "н-Камчатка") с помощью разработанных в ИЯИ РАН электронно-нейтронных детекторов. Высокая сейсмичность района субдукции Южной Камчатки, определила выбор места для развертывания еще одной установки подобного типа, создаваемой нами глобальной сети подобных установок в различных географических и геологических условиях. Целью установки "н-Камчатка" является изучение корреляций динамики природного потока тепловых нейтронов с сейсмической активностью. Приведены результаты, полученные за 1.5 г. непрерывной работы установки.

DOI: 10.31857/S0367676522030243

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, природный поток нейтронов имеет два источника – космические лучи и естественная радиоактивность. На поверхности земли основной вклад дает первый источник, тогда как второй дает основной вклад в подземных измерениях, за счет распада альфа-активных ядер радиоактивных рядов урана и тория и образования нейтронов в (α,n)-реакциях на легких ядрах. Поскольку одним из промежуточных нуклидов уранового ряда является относительно долгоживущий инертный газ радон-222, то и генерация нейтронов вблизи детекторов и вариации их потока связаны с концентрацией этого газа в окружающем веществе. Природный поток тепловых нейтронов находится в динамическом равновесии с окружающей средой. Отсюда следует, что, изучая вариации тепловых нейтронов, можно судить и о состоянии среды в данный момент времени. Существующая много лет мировая сеть нейтронных мониторов (НМ) не пригодна для этой цели, поскольку мониторы регистрируют вторичные нейтроны, образованные при взаимодействии со свинцовой мишенью достаточно энергичных (более ~100 МэВ) адронов космических лучей внутри монитора. Нейтроны же, образованные естественной радиоактивностью, имеют энергию несколько МэВ и не регистрируются нейтронными мониторами. Тем более это относится к тепловым нейтронам с энергией 0.025 эВ, для которых толстый внешний полиэтиленовый слой монитора является непреодолимым препятствием. Создавая НМ около 70 лет назад, физики как раз и ставили целью минимизировать влияние внешних погодных и прочих факторов, чтобы получить прибор для исследования космических лучей [1].

Создаваемая нами мировая сеть неэкранированных сцинтилляционных детекторов должна решать задачу обратную целям сети НМ, а именно, максимально экранироваться от влияния космических лучей и, изучая вариации природных потоков тепловых нейтронов, искать корреляции с различными геофизическими явлениями [2–7]. В апреле 2019 г. в рамках этой сети в Петропавловске-Камчатском была создана установка "н-Камчатка".

УСТАНОВКА И ИЗМЕРЕНИЯ

Установка "н-Камчатка" в настоящий момент состоит из одного электронно-нейтронного детектора (эн-детектор) с возможностью расширения до 4, а также датчиков атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха в помещении. Основой детектора является тонкий специализированный сцинтилляционный компаунд, состоящий из сплава неорганического сцинтиллятора ZnS(Ag) и оксида не-

обогащенного бора (B_2O_3), содержащего около 19% изотопа ^{10}B, имеющего большое сечение захвата тепловых нейтронов с образованием тяжелых сильно ионизующих заряженных частиц: альфа-частицы и ядра ^{7}Li, регистрируемых сцинтиллятором. Средняя толщина сцинтиллятора равна 50 мг/см^2, а площадь – 0.35 м^2. Сцинтиллятор просматривается одним фотоэлектронным умножителем с диаметром фотокатода 15 см. Сигнал, снимаемый с последнего динода ФЭУ, интегрируется с τ = 10 мкс зарядо-чувствительным предусилителем, а затем оцифровывается 4-канальным, 10-битным АЦП (ADLINK PCI-9810) с шагом 50 нс. Следствием малой толщины сцинтиллятора является малый сигнал (~60 кэВ в сравнении с 2.3 МэВ от захвата нейтрона) от одиночных релятивистских заряженных частиц. Поскольку порог установлен на уровне около 150–200 кэВ, то детектор не чувствителен к обычному фону от гамма- и бета-радиоактивности и имеет очень низкую для своей площади скорость счета, менее 1 с$^{-1}$. Наличие у сцинтиллятора нескольких временных констант, приводящее к разной скорости собирания заряда от релятивистских частиц и тяжелых медленно движущихся продуктов захвата нейтрона, а также применяемый нами анализ формы импульса, позволяют надежно выделять сигналы от захвата нейтрона. При этом фоновые, более быстрые, сигналы также считаются и анализируются. Как было показано ранее, эта компонента, называемая “заряженные”, чувствительна только к синхронному прохождению трех и более заряженных релятивистских частиц. Это могут быть широкие атмосферные ливни (для которых и был разработан эн-детектор), мюоны с сопровождением, а также наиболее интересный для вариационной задачи случай – бета распады дочерних ядер в цепочке распадов радона (особенно Bi-214 и Pb-214, дающих наиболее энергичные электроны и гамма-кванты в воздухе вблизи детектора, либо на его поверхности. Дело в том, что бета-распады сопровождаются, как правило, серией гамма-квантов с возбужденных уровней дочернего ядра. Гамма-кванты могут конвертировать в электроны, либо дать электрон-позитронную пару. В результате таких распадов через сцинтиллятор может пройти 3 и более электрона (позитрона) и дать регистрируемый сигнал в детекторе. Это проверялось ранее с помощью радиоактивных источников [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

За время измерений не было сильных землетрясений вблизи установки, и не было отмечено значимых изменений в потоке тепловых нейтронов. Максимальное по магнитуде землетрясение (M = 6.4) произошло 15.09.20 на расстоянии 330 км, с очагом на глубине 320 км. Мы не наблюдали при этом каких-либо значимых изменений ни в нейтронном потоке, ни в “заряженных”, ни в концентрации подпочвенного радона. Тем не менее, проведенный Фурье анализ данных за 14–16 сентября выявил ряд значимых частотных пиков в миллигерцовом диапазоне (0.3–8.0 мГц), совпадающих с собственными частотами Земли и их обертонами. Как минимум, 20 мод колебаний были активны в этот период и наибольшую амплитуду имели моды: $_0S_3$, $_0S_4$, $_0S_6$, $_0T_7$, $_0T_{14}$ и ряд других.

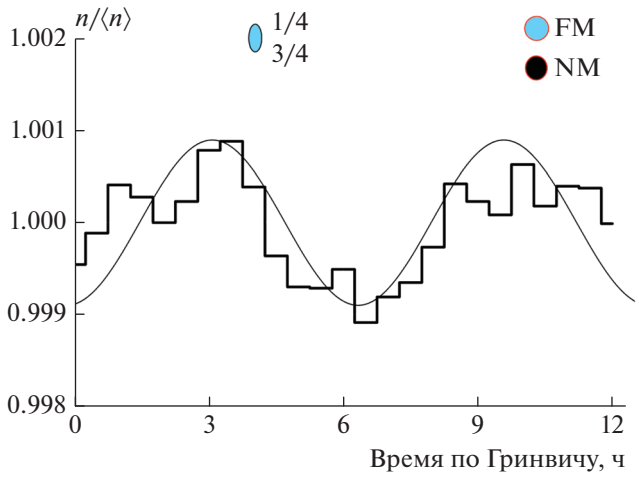

Рис. 1. Полусуточная приливная волна M2 в тепловых нейтронах. Гистограмма – сглаженные 3-часовым скользящим средним экспериментальные данные (после наложения эпох); синусоида – волна M4; кружки сверху показывают моменты верхней и нижней и кульминаций, а овал – моменты пересечения луной горизонта.

Неким тестовым явлением, позволяющим проверить отклик детекторов на геодинамические явления, являются приливные волны в земной коре, вызываемые периодическими гравитационными колебаниями системы Земля-Луна-Солнце. Приливные силы приводят к деформации земной коры, тем самым воздействуя на ее газо- и водопроницаемость, а значит вызывают вариации диффузии и эсхаляции радона и находящихся в равновесии с ним нейтронов. Таким образом, мы можем использовать это явление для проверки чувствительности своих детекторов. На рис. 1 приведена полученная методом наложения эпох (за период с 00:00 04.05.2019 по 24:00 20.09.2020 с последующим трехчасовым усреднением скользящим средним) полусуточная лунно-приливная волна M2 (T = 12 ч 25 мин), т. е. вторая гармоника суточной волны M1. Отчетлива видна 4-я гармоника M4. Объяснение этому факту может быть следующим: наибольшая деформация земной коры под детектором происходит не только при верхней и нижней кульминации луны, но и когда она находится на горизонте, т.е. во время восхода и заката. Волна M4 наблюдалась ранее и в других наших детекторах.

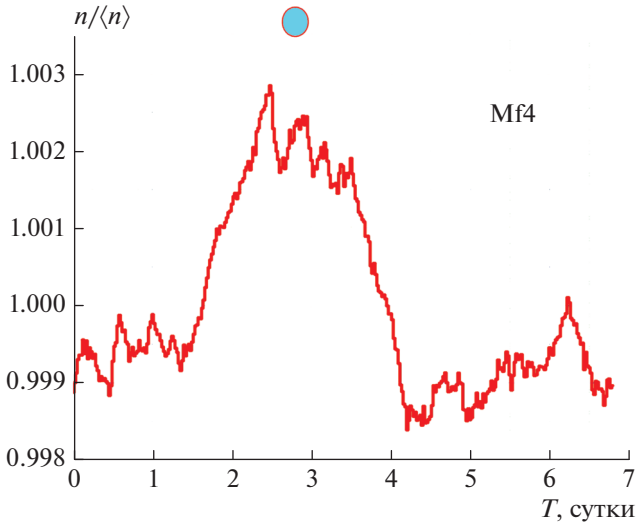

Рис. 2. 4-я гармоника драконической лунной волны Mf в тепловых нейтронах. Кривая – сглаженные 2-суточным скользящим средним экспериментальные данные (после наложения эпох); кружок сверху показывает моменты наивысшей, наинизшей и средней кульминаций.

Кроме того, на Камчатке наблюдается 4-я гармоника Mf4 лунного драконического месяца (Mf), определяющего период ($T = 27.212$ сут) между наивысшими кульминациями луны над горизонтом. Эта волна, полученная методом наложения эпох за 1.5 г. (точный период указан выше), т.е. наложением ~20 периодов при последующем усреднении двухсуточным скользящим средним, показана на рис. 2. И опять явно видна 4-я (около недельная) гармоника. Объяснение, по-видимому, схоже с приведенным выше: амплитуда приливной волны, а значит и диффузия радона зависят от высоты кульминации луны и при этом максимальное воздействие наблюдается не только в дни наивысшей кульминации, но и "наинизшей" и даже "средней", когда луна пересекает плоскость эклиптики. Возможно, моменты пересечения эклиптики также дают усиление приливной волны, поскольку в эти дни Солнце, Земля и Луна оказываются в одной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые 1.5 г. работы установки "н-Камчатка" не выявили значимых корреляций природного потока тепловых нейтронов с локальной сейсмической активностью. Возможная причина – отсутствие достаточно мощных землетрясений на Камчатке в этот период.

Обнаружены 4-е гармоники лунно-суточной и лунно-месячной приливных волн в природном потоке тепловых нейтронов, с амплитудами на уровне 0.001, что свидетельствует о высокой чувствительности эн-детектора и хорошей стабильности работы установки.

Работа выполнялась при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-02-0339а и № 20-05-00493а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hatton C.J.* // In: Progress in elementary particle and cosmic-ray physics. Amsterdam: North Holland Publishing Co., 1971.
2. *Alekseenko V., Arneodo F., Bruno G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. No. 125003.
3. *Алексеенко В.В., Громушкин Д.М., Джаппуев Д.Д. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 739; *Alekseenko V.V., Gromushkin D.M., Dhzappuev D.D. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 682.
4. *Stenkin Y., Alekseenko V., Cai Z. et al.* // Pure Appl. Geophys. 2017. V. 174. P. 2763.
5. *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.* // JETP. 2017. V. 124. No. 5. P. 718.
6. *Stenkin Yuri, Alekseenko Victor, Cai Zeyu et al.* // J. Environ. Radioact. 2019. V. 208–209. Art. No. 105981.
7. *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Dzhappuev D.D. et al.* // J. Environ. Radioact. 2020. V. 222. Art. No. 106335.

Thermal neutron background flux variations at Kamchatka

Yu. V. Stenkin[a, *], V. V. Alekseenko[a], D. A. Kuleshov[a], K. R. Levochkin[a], E. O. Makarov[b], P. P. Firstov[b], O. B. Shchegolev[a]

[a] *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

[b] *Kamchatka Experimental and Methodical Seismological Department, Geophysical Survey of Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683006 Russia*

**e-mail: stenkinyv@lebedev.ru*

Measurements of natural thermal neutron flux variations have been started at Petropavlovsk-Kamchatskiy in May 2019 with en-detector developed in INR RAS. High seismic activity of the South Kamchatka region was a reason to choose it for location of one more array ("n-Kamchatka") belonging to our global net of such type arrays in different geological and geophysical conditions. The array aim is studying of natural thermal neutron flux correlation with the seismic activity. Some results of the first 1.5 year of the array running are presented here.