

ПРИРОДНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ И ГЕОФИЗИКА

© 2022 г. Ю. В. Стенькин¹⁾*

Поступила в редакцию 18.06.2022 г.; после доработки 18.06.2022 г.; принята к публикации 18.06.2022 г.

Природные потоки тепловых нейтронов имеют два источника: космические лучи и естественная радиоактивность. Благодаря большому времени жизни свободных нейтронов они успевают пройти до поглощения значительные расстояния в среде обитания, если среда не содержит элементов с большим сечением захвата нейтронов. При этом их реальное время жизни и проходимые расстояния определяются свойствами среды, с которой они находятся в динамическом равновесии. На достаточных глубинах под землей основным источником нейтронов является естественная радиоактивность за счет (α, n) -реакций на легких ядрах земной коры. Большую роль в этом процессе играет радиоактивный газ радон, особенно его долгоживущий изотоп Rn-222, способный мигрировать на значительные расстояния: на десятки метров в грунте и на километры в атмосфере. Это означает, что изменения среды, вызванные различными геофизическими процессами либо лунно-солнечно-земными явлениями, должны отражаться и на нейтронном потоке, выходящем из земной коры. В работе представлен краткий обзор работ на эту тему и их обсуждение.

DOI: 10.31857/S0044002722060125

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение природных нейтронных потоков имеет долгую историю, которая началась вскоре после открытия нейтрона в 1935 г. Так, в работе [1] были сделаны первые оценки нейтронного потока в атмосфере. Было показано, что рожденные там космическими лучами нейтроны не улетают далеко от места рождения, постепенно замедляясь и затем, захватываясь ядрами среды, потеряв энергию путем неупругого, а затем упругого рассеяния.

В начале 1950-х гг. экспериментальное изучение нейтронных потоков привело к созданию Нейтронного Монитора (НМ), прибора, предназначенного для непрерывного мониторинга космических лучей низких энергий, производящих вторичные нейтроны в свинцовой мишени, окруженной замедлителем [2]. Толстый замедлитель (парафин либо полиэтилен) не только замедляет нейтроны, но и экранирует расположенные внутри НМ борные газовые пропорциональные счетчики нейтронов, защищая их от внешних тепловых нейтронов. Задачей разработчиков НМ было создание прибора для измерения вариаций космических лучей, минимально зависящего от метеорологических и прочих природных условий. Вскоре была создана мировая сеть таких приборов, работающая и по сей день.

Но можно поставить и попытаться решить и обратную задачу, а именно, регистрируя природный

поток тепловых нейтронов в среде, попытаться изучать таким образом свойства среды. На самом деле такая задача давно решается в прикладных технических задачах, когда нейтроны используются не как объект исследований, а как инструмент: это, например, нейтронография или нейтронный картаж в геологии. Мы предложили лишь расширить область подобных исследований, используя нейтроны как инструмент для изучения различных геофизических и геодинамических процессов. Ниже будут показаны примеры подобных исследований.

2. ГЕНЕРАЦИЯ И ДИФФУЗИЯ РАДОНА И НЕЙТРОНОВ В ПРИРОДЕ

В атмосфере и на поверхности земли основным источником природных нейтронов являются космические лучи, взаимодействующие с ядрами воздуха и верхнего слоя грунта (а также с веществом зданий, где расположен детектор). Как показывают экспериментальные данные, на поверхности земли около 90% нейтронов рождены космическими лучами. Это определяется путем измерения барометрического коэффициента, который чуть меньше коэффициента, известного для адронов космических лучей. На глубинах более ~ 10 м под землей, куда не доходят адроны космических лучей, основным источником становится естественная радиоактивность, в основном уранового и ториевого радиоактивных рядов. При этом наибольший вклад в генерацию нейтронов дают (α, n) -реакции на легких ядрах земной коры типа Be, F, B, Na, Al, Si и др. Ясно, что в атмосфере эти элементы отсутствуют

¹⁾Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

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

и, значит, там этот источник нейтронов отсутствует, зато в земной коре, напротив, это основной источник (пренебрегая малой добавкой от спонтанного деления тяжелых нуклидов).

Нейтроны, образованные в этих реакциях, имеют МэВные энергии и их дальнейшая судьба зависит от свойств среды, т.е. грунта: от его влажности, наличия довольно редких элементов, поглотителей нейтронов типа Li, B, Cd и др. Замедлившись, нейтроны захватываются ядрами среды. Типичное время жизни нейтронов в стандартном грунте, состоящем в основном из SiO₂, составляет ~1 мс. За это время они могут пройти несколько метров грунта. Наличие грунтовых вод может уменьшить это время, так как время жизни нейтронов в воде составляет около 0.2 мс. Таким образом, как и отмечалось в работе [1], нейтроны, вне зависимости от среды, не уходят далеко от места своего рождения.

Другое дело инертный газ радон Rn-222, имеющий много большее время жизни — более 5 сут. Его генерация идет непрерывно по всему объему грунта, откуда он может диффундировать на значительные расстояния, смешавшись с прочими подземными газами: метаном, углекислым газом, воздухом и т.д. Коэффициент этой диффузии зависит существенно от свойств грунта — температуры, разности давления газов между соседними слоями грунта, между ближайшим к поверхности слоем грунта и атмосферным давлением, трещиноватости, пористости, от грунтовых вод, насыщенных радоном и т.д. Именно это обстоятельство делает концентрацию радона в данной точке зависящей от свойств среды и от ее изменений. Это, в свою очередь, позволяет изучать свойства среды, измеряя природный поток тепловых нейтронов (геонейтронов), находящийся в динамическом равновесии с концентрацией радона в окружающем детектор веществе, толщиной несколько метров. Такими геофизическими процессами, изменяющими свойства среды, могут быть землетрясения, извержения вулканов поблизости, приливные волны в земной коре, собственные колебания Земли и прочее. Отметим, что данный метод имеет неоспоримое преимущество перед традиционным методом прямого измерения концентрации радона в окружающем воздухе. Показания радонметра очень нестабильны, поскольку они чувствительны к любому движению воздуха, т.е. к вентиляции, сквознякам, а также к влажности воздуха. В случае регистрации нейтронов под землей этих проблем нет, поскольку нейтроны собираются с толщин грунта в несколько метров вокруг детектора. Как уже отмечалось, в воздухе нейтроны не образуются.

Если же детектор расположен на поверхности земли, то там с его помощью можно изучать другие геофизические явления, например, гипотетическое

рождение нейтронов в молниевых разрядах, сезонные и лунно-приливные волны, явления солнечно-земных связей типа форбуш-эффекта, GLE и др.

3. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

3.1. История исследований

Экспериментальное изучение геонейтронов началось в конце 1940-х—начале 1950-х гг., когда сначала были обнаружены нейтроны в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) [3], затем в процессе создания нейтронных мониторов [2] были проведены многочисленные измерения нейтронных потоков в различных геологических и географических условиях. Было обнаружено, что осадки и погодные условия существенно влияют на показания детекторов. Это вынудило разработчиков нейтронных мониторов заэкранировать их от внешнего потока тепловых нейтронов толстым слоем парафина (полиэтилена). Затем началось исследование природного потока нейтронов с помощью неэкранированных сцинтилляционных детекторов [4]. Далее группой из НИИЯФ МГУ под руководством Б.М. Кужевского предпринимались эпизодические попытки поиска корреляций этого потока с различными геофизическими явлениями [5] с помощью газовых гелиевых счетчиков. К сожалению, счетчики не обладали требуемой стабильностью, скорость счета “нейтронов” скачкообразно изменялась в сотни раз. В результате “корреляции” таких выбросов были обнаружены со многими природными явлениями: далекими землетрясениями, лунными затмениями и т.д. Тем не менее, эти работы стимулировали нас к проведению подобных исследований на другом экспериментальном уровне.

3.2. Создание эн-детекторов

В рамках проекта PRISMA [6] нами был разработан большой сцинтилляционный детектор для регистрации нейтронов в ШАЛ [7]. Детектор, названный позднее как электронно-нейтронный (эн-детектор), благодаря высокой чувствительности и высокой стабильности оказался удобным прибором не только для измерения нейтронов в ШАЛ, но и для непрерывного мониторинга любых природных потоков тепловых нейтронов. Его основу составляет тонкий слой (50 мг/см) светосостава (сплава) из неорганического сцинтиллятора ZnS(Ag) и борсодержащего вещества на основе необогащенного бора. Сцинтиллятор помещен в стандартный пластиковый бак для воды на 200 л и просматривается одним фотоумножителем с диаметром фотокатода 10 см. Для увеличения светосбора установлен светоотражающий конус из эластичного пластика с хорошим светоотражением.

Площадь сцинтиллятора 0.36 м^2 , эффективность регистрации тепловых нейтронов $\sim 20\%$. Одним из важнейших свойств сцинтиллятора является наличие у него нескольких временных констант высвечивания с интенсивностями, зависящими от скорости частиц, что позволяет использовать метод разделения сигналов по форме импульса. В результате анализа формы оцифрованного импульса мы не только надежно избавляемся от шумов и электромагнитных наводок, но и разделяем сигналы от захвата нейтрона и от быстрых заряженных частиц. Другим важным свойством детектора является его тонкий сцинтиллятор. В результате быстрые заряженные частицы производят в нем очень слабый сигнал, лежащий в кЭВной области, что ниже порога регистрации, составляющего примерно три частицы (mip). Это обстоятельство определяет очень низкий фон детектора, составляющий лишь $\sim 1/\text{с}$, поскольку он не чувствителен к обычному радиоактивному фону и к одиночным мюонам космических лучей. Помимо сигналов от захвата нейтронов он считает лишь групповые прохождения трех и более заряженных частиц, например, ШАЛ (что используется при работе детектора в составе шаловской установки), мюоны или проскочившие протоны космических лучей с сопровождением, а также бета-распады радиоактивных нуклидов вблизи детектора, когда вылетевший электрон сопровождается серией гамма-квантов. Последнее обстоятельство открывает еще одну важную область применения данных детекторов — мониторинг концентрации в воздухе радиоактивных изотопов, продуктов распада радона, в основном Bi-214 и Pb-214 [8].

3.3. Результаты, полученные с использованием эн-детекторов

Для изучения вариаций природных потоков тепловых нейтронов на базе эн-детекторов была создана мировая сеть небольших вариационных установок в различных географических и геологических условиях: в Москве (в ИЯИ РАН, в МИФИ, в НИИЯФ МГУ), на Северном Кавказе (БНО ИЯИ РАН), в Тибете (сначала в Янгбаджинге, затем в Лхасе в Тибетском университете), на Камчатке (Институт вулканологии). Ранее такие установки работали также в Италии (Gran Sasso, LNGS) и в Обнинске (Геофизическая служба РАН). С помощью этих установок был получен ряд интересных результатов, в том числе были обнаружены несколько ранее неизвестных эффектов. Краткий перечень этих результатов приведен ниже.

Исследование гипотетического рождения нейтронов в молниевых разрядах во время гроз проводилось на установках “Нейтрон” в МИФИ и на поверхностных установках в МГУ и в LNGS [9].

В отличие от других подобных исследований, в той работе применялась оцифровка и анализ формы импульсов детектора, что позволило полностью избавиться от неизбежных в таком эксперименте помех и наводок, создаваемых мощнейшими сверхточными молниевыми разрядами. В результате было показано, что даже в случае очень близкого удара молнии никакого превышения нейтронного потока не наблюдалось. Более того, наблюдалось небольшое снижение этого потока на несколько процентов, связанное с выпавшими обильными осадками. На следующий день поток вернулся к обычному уровню.

С осадками связан и наблюдаемый на всех таких установках сезонный эффект. Наиболее наглядно он проявился на тибетской установке PRISMA-YBJ на высоте 4300 м, где не бывает постоянного снежного покрова, а сезоны зима–лето отличаются, помимо температуры, количеством осадков: зима — сухой сезон, лето — мокрый. Поскольку вода как водородосодержащее вещество хорошо замедляет нейтроны и относительно сильно их поглощает, то зимой там наблюдается максимум нейтронного потока, а летом, с началом сезона дождей, он резко падает [10]. Похоже, но только более плавно ведет себя другая компонента, измеряемая эн-детекторами, чувствительная к концентрации радона в воздухе. Наконец, в той же работе приведен график лунного синодического месяца, полученный методом наложения эпох, где отчетливо видна четвертая гармоника с амплитудой около 0.5% и периодом около 7.5 сут. Лунно-приливные волны наблюдались и на других наших установках, в частности, полусуточная волна M2 с амплитудой около 0.1%. Ясно, что для регистрации таких слабых вариаций детектор должен обладать очень хорошей стабильностью, а система сбора данных должна обязательно содержать полную оцифровку формы импульса и его онлайн анализ.

Как отмечалось выше, диффузия радона в грунте зависит от его пористости и трещиноватости. Любая встряска, производимая землетрясениями, способна изменить эти параметры, изменяя тем самым динамику диффузии радона, а значит, и нейтронный поток в грунте и приземном слое воздуха и в подземных помещениях. Во время работы установки PRISMA-YBJ (2013–2017 гг.) на расстоянии около 600 км от Янгбаджинга случилось катастрофическое землетрясение в Непале 25.04.2015 с магнитудой 7.8, сопровождавшееся длинной серией афтершоков. Установка зарегистрировала два наиболее мощных толчка, но не в скорости счета нейтронов, а в сбое суточной нейтронной волны. Усредненная суточная волна в нейтронах имеет максимум в районе 17 ч локального солнечного

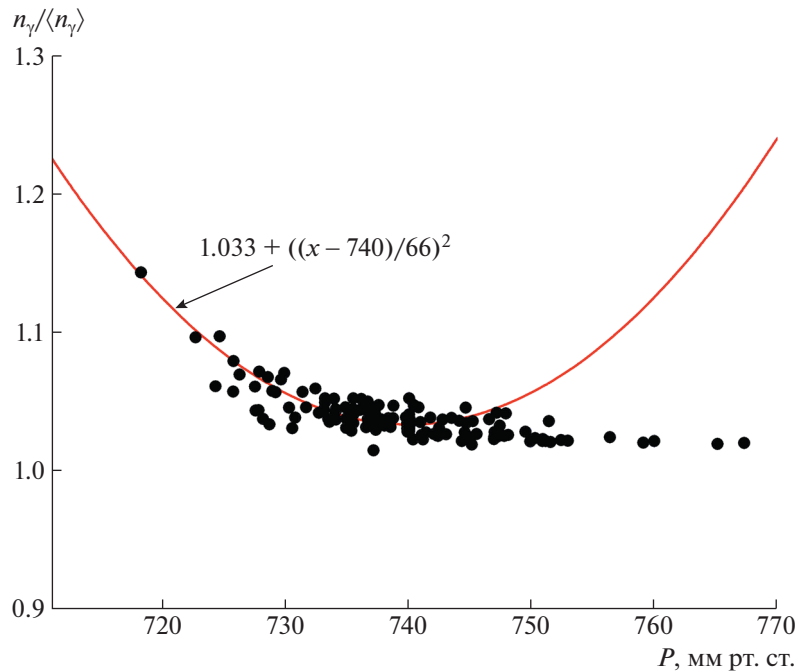


Рис. 1. Иллюстрация задержанного нелинейного пампинг-эффекта из работы [15]. Показания давления сдвинуты вперед на 24 ч относительно показаний гамма-счетчика.

времени, а измеряемая эн-детекторами концентрация тяжелых нуклидов (по крайней мере, в Янгбаджинге) имеет максимум в дополуночное время, т.е. в противофазе с нейтронами. В работах [11, 12], где опубликован этот результат, был введен некий нормированный параметр, чувствительный к фазам нейтронной (n) и радоновой ($charged$) суточных волн: $S = n_{\text{погн}} + charged_{\text{погн}} - 2$. В обычные дни волны находятся в противофазе и компенсируют друг друга, а в случае совпадения фаз на графике появляется пик. Такие пики с амплитудой более 6σ появились 6 раз за 3.5 г. Из них три совпали с землетрясениями, один с геомагнитной бурей и только два события не были идентифицированы. При этом максимальные пики (более 9σ) были как раз во время непальского землетрясения. Таким образом, такой метод дает очень мало ложных сигналов, чего нельзя сказать о методе прямого измерения концентрации радона в воздухе. Пока речь не идет о возможности предсказания землетрясения с помощью эн-детекторов, требуются дополнительные исследования.

3.4. Барометрический пампинг-эффект для нейтронов и гамма-фона

Барометрический пампинг-эффект (pumping-effect, или эффект откачки) для подземных газов давно известен геофизикам. Его суть в том, что при понижении атмосферного давления происходит откачка подземных газов в атмосферу. Эти газы

содержат, в том числе, и радон. Значит, эффект должен наблюдаться и для природных нейтронов, так как при усиленной диффузии радона из более глубоких слоев грунта, где его всегда много, к поверхности возрастает и генерация нейтронов в приповерхностном слое грунта. Это относится и к любым подземным помещениям, если они не имеют гидро- или газоизоляции. Такой эффект действительно был обнаружен в подземной лаборатории установки ШАЛ-МГУ (не имеющей газоизоляции) на глубине 25 м водного эквивалента, где в настоящее время работает небольшая установка из одного эн-детектора и одного гамма-детектора на основе кристалла CsI [13]. Отличие нейтронного пампинг-эффекта от газового состоит в том, что нейтроны приходят, в среднем, с глубин в несколько метров. Значит, избыточный радон, поднимаясь с больших глубин, должен заполнить этот объем. На это требуется время и тем большее, чем меньше для него коэффициент диффузии данного грунта. В указанном подземном помещении это время оказалось близким к двум суткам. Таким образом барометрический эффект оказывается задержанным и проявляется лишь после сдвигки на 2 сут вперед относительно нейтронных данных. После этого измеренный задержанный барометрический коэффициент оказался очень большим, более 5% на мм рт. ст. Без такой сдвигки он близок к нулю. Отметим, что данный эффект должен учитываться в подземных низкофоновых лабораториях,

если подземное помещение не имеет специальной газоизоляции от окружающего грунта.

Наличие гамма-детектора позволило обнаружить с помощью этой установки еще один интересный эффект — нелинейный пампинг-эффект, теория которого для геофизических параметров среды описана в работе [14]. Его суть состоит в том, что если на границе двух сред (грунт—воздух, грунт—вода, вода—воздух и т.д.) происходят гармонические колебания какого-либо макроскопического параметра, например, температуры, давления, концентрации вещества в растворе и т.д., то на достаточно большой глубине от границы раздела сред устанавливается некое квазистационарное значение этого параметра. В случае изменения амплитуды колебаний параметра на границе изменяется также и это квазистационарное значение, причем не линейно, а квадратично! Такой квадратичный эффект был действительно обнаружен, но пока не в нейтронах, а в гамма-фоне [15] при аномально низком атмосферном давлении в Москве. Заметим, что этот эффект обнаруживается только при аномально низких атмосферных давлениях и имеет пороговый характер, поскольку, как известно, парабола слабо изменяется вблизи нулевого значения, а затем начинает резко нарастать (см. рис. 1). Видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на параболу. Асимметрия точек объясняется тем, что эффект работает только при понижении давления, т.е. при откачке подземных газов. Видно, что эффект появляется лишь при давлении ниже 725 мм рт. ст., что для Москвы является аномально низким значением. В нейтронах нелинейный эффект пока не наблюдался, но, думаем, это вопрос времени — надо лишь дождаться продолжительного аномально низкого атмосферного давления.

Этот эффект так же, как и линейный, должен учитываться при проведении измерений в подземных низкофоновых лабораториях, а также следует предусматривать газоизоляцию подземных лабораторий при их строительстве.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природные потоки тепловых нейтронов, или геонейтроны, находясь в динамическом равновесии со средой, содержат информацию о среде и об ее динамике. Радиоактивный газ радон, являющийся одним из звеньев в цепочках радиоактивных рядов урана и тория, постоянно производится в земной коре, а затем производит нейтроны в (α, n) -реакциях на ядрах легких элементов коры. Будучи инертным газом, он вместе с прочими подземными газами может мигрировать на достаточно большие расстояния (десятки метров) в грунте. Скорость этой миграции, или диффузии, зависит от параметров окружающего грунта. Отсюда следует, что,

измеряя вариации геонейтронов, можно судить о состоянии и вариациях приповерхностного слоя земной коры. Таким образом, можно методами ядерной (нейтронной) физики изучать различные геофизические процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. A. Bethe, S. A. Kroff, and G. Placzek, *Phys. Rev.* **57**, 573 (1940).
2. C. J. Hatton, *Progress in Elementary Particle and Cosmic Rays Physics* (North-Holland, Amsterdam, 1971), Vol. X, p. 3.
3. V. Tongiorgi, *Phys. Rev.* **73**, 923 (1948).
4. G. V. Gorshkov, V. A. Zabkin, N. M. Lyatkovskaya, and O. S. Tsvetkov, *Natural Neutron Background of the Atmosphere and the Earth's Crust* (Atomizdat, Moscow, 1966) [in Russian].
5. Б. Кужевский, *Геофиз. проц. биосфера* **4**(1-2), 18 (2005).
6. Yu. V. Stenkin, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **196**, 293 (2009).
7. Yu. V. Stenkin, in *Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications* (Nova Sci. Publ., 2010), Vol. 10, p. 253.
8. Yu. V. Stenkin, V. V. Alekseenko, D. D. Dzhappuev, D. A. Kuleshov, A. U. Kudjaev, K. R. Levochkin, O. I. Mikhailova, O. B. Shchegolev, and V. I. Stepanov, *J. Environ. Radioact.* **222**, 106335 (2020).
9. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, A. Di Giovanni, W. Fulgione, D. Gromushkin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov, V. Sulakov, and I. Yashin, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 125003 (2015).
10. Y. Stenkin, V. Alekseenko, Z. Cai, Z. Cao, C. Cattaneo, S. Cui, E. Giroletti, D. Gromushkin, C. Guo, X. Guo, H. He, Ye Liu, X. Ma, O. Shchegolev, P. Vallania, C. Vigorito, and J. Zhao, *Pure and Appl. Geophys.* **174**, 2763 (2017).
11. Yu. V. Stenkin, V. V. Alekseenko, Z. Cai, Zh. Cao, Sh. Cui, X. Guo, H. He, Y. Liu, X. Ma, O. B. Shchegolev, V. I. Stepanov, Ya. V. Yanin, and J. Zhao, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **83**, 607 (2019).
12. Y. Stenkin, V. Alekseenko, Z. Cai, Z. Cao, C. Cattaneo, S. Cui, P. Firstov, E. Giroletti, X. Guo, H. He, Ye Liu, X. Ma, O. Shchegolev, P. Vallania, C. Vigorito, Y. Yanin, and J. Zhao, *J. Environ. Radioact.* **208–209**, 105981 (2019).
13. Yu. V. Stenkin, V. V. Alekseenko, D. M. Gromushkin, V. P. Sulakov, and O. B. Shchegolev, *J. Exp. Theor. Phys.* **124**, 718 (2017).
14. V. N. Zyryanov, *Water Resource* **40**, 243 (2013).
15. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, А. В. Игошин, Д. А. Кулешов, К. Р. Лёвочкин, В. И. Степанов, В. П. Сулаков, В. В. Рулев, О. Б. Щеголев, *ЖЭТФ* **158**, 469 (2020).

ENVIRONMENTAL FLUXES OF THERMAL NEUTRONS AND GEOPHYSICS

Yu. V. Stenkin¹⁾

¹⁾Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Environmental neutrons originate from two sources: cosmic rays and natural radioactivity. Due to long neutron lifetime, they can pass significant distance in the surrounding media if it does not contain elements with high neutron absorption ability affecting to their lifetime. They are in a dynamic equilibrium with media and are therefore sensitive to many geophysical phenomena. At big enough depth underground the main source of neutron production is (α, n) -reactions on light element in soil. Radioactive gas radon Rn-222 belonging to uranium radioactive chain and migrating to long distances of tens meters in soil and kilometers in air plays the main role here. It means that media changes caused by various geophysical or Solar-Moon-Earth relations should affect to neutron flux from crust. A history and some results obtained with the neutron technique are overviewed and discussed.