

УДК 550.343.6+551.521.2

## ОТКЛИК ЭН-ДЕТЕКТОРОВ УСТАНОВКИ PRIZMA-YBJ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2019 г. Ю. В. Стенькин<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Алексеенко<sup>1</sup>, Ж. Цай<sup>4</sup>, Ж. Цяо<sup>3</sup>, Ш. Цюи<sup>4</sup>, К. Гуо<sup>4</sup>, Х. Хе<sup>3</sup>,  
Е. Лиу<sup>5</sup>, С. Ма<sup>3</sup>, О. Б. Щеголев<sup>1</sup>, В. И. Степанов<sup>1</sup>, Я. В. Янин<sup>1</sup>, Ж. Жао<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики высоких энергий Китайской академии наук, Пекин, КНР

<sup>4</sup>Хэбэйский нормальный университет, Шидзяжуанг, КНР

<sup>5</sup>Школа управления и инженерии, Хэбэйский университет экономики и бизнеса, Хэбэй, Китай

\*E-mail: yuri.stenkin@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

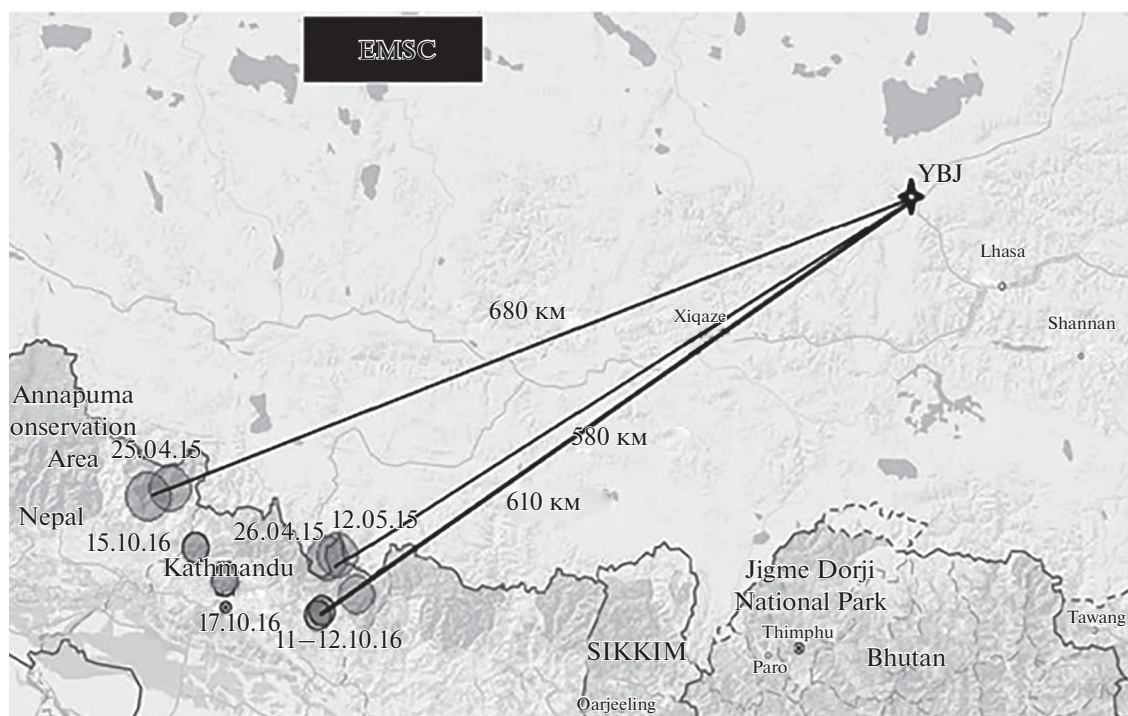
Некоторые интересные результаты были получены на установке из эн-детекторов (электронно-нейтронных детекторов), разработанных для проекта PRISMA (PRImarySpectrumMeasurementArgau) предназначенного для изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Небольшая установка из 4-х таких детекторов (PRISMA-YBJ) 3.5 г. проработала на поверхности земли в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря, постоянно измеряя природный поток тепловых нейтронов. Нейтроны частично производятся в грунте в  $(\alpha, n)$ -реакциях альфа-частиц естественной радиоактивности, в основном, от распадов радона и дочерних тяжелых нуклидов. Затем нейтроны термализуются в среде и, будучи с ней в равновесии, становятся чувствительны к состоянию среды и, следовательно, ко многим геофизическим процессам, происходящим в земной коре, включая землетрясения. В работе представлены некоторые полученные результаты, показывающие чувствительность эн-детекторов к землетрясениям.

DOI: 10.1134/S036767651905034X

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение вариаций радиоактивного газа радон-222, имеющего период полураспада 3.8 дня, образующегося в земной коре в результате распадов урановой цепочки естественной радиоактивности, является хорошо изученным инструментом в сейсмологии [1], нспоры о возможности использования аномального поведения концентрации радона в воздухе продолжают до сих пор. Дело в том, что концентрация радона в воздухе отражает не только состояние земной коры, но и зависит от других факторов, таких как ветер, вентиляция, погодные условия и т.д., что существенно усложняет задачу по выявлению вариаций, связанных с колебаниями земной коры. Мы предлагаем альтернативный метод изучения, основанный на регистрации тепловых нейтронов, образующихся в земной коре в результате  $(\alpha, n)$ -реакций на легких ядрах (Be, B, F, Al, Mg, Si и др.). Урановая цепочка альфа-активных ядер тяжелее Rn-222 дает незначительный вклад в генерацию нейтронов по двум причинам: во-первых, эти ядра долгоживущие и, во-вторых, энергия образующихся  $\alpha$ -частиц не превышает 4.9 МэВ, что за-

метно подавляет выход нейтронов в пороговых реакциях. После распада Rn-222 идет цепочка короткоживущих изотопов, а энергия  $\alpha$ -частиц достигает 7.7 МэВ, которые и дают максимальный вклад в генерацию нейтронов. Газ радон подхватывается другими подземными газами и вместе с ними способен распространяться на значительные расстояния в десятки метров, накапливаясь в подземных полостях и порах, распространяясь с подземными водами. Распады радона и дочерних ядер в грунте приводят к генерации нейтронов, которые замедляясь в окружающей среде, могут регистрироваться детекторами тепловых нейтронов. Тепловые нейтроны могут диффундировать в грунте на расстояния  $\sim 1$  метра. Т. о., детектор тепловых нейтронов регистрирует нейтроны, рожденные в грунте (бетоне) толщиной 1–2 м, в то время как концентрация радона в этом слое зависит от свойств слоя грунта порядка длины диффузии радона. Изменения свойств этого слоя вызывают изменения скорости счета тепловых нейтронов. Отметим, что  $(\alpha, n)$ -реакции в воздухе не происходят из-за отсутствия там подходящих ядер-мишеней. Т. о., регистрируемый поток тепловых нейтронов чувствителен только к концен-



**Рис. 1.** Карта очагов землетрясений, произошедших в Непале в апреле–мае 2015 г. и в октябре 2016 г., с сайта Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра EMSC (<https://www.emsc-csem.org/#2>). Диаметр кружка вокруг эпицентра пропорционален магнитуде землетрясения.

трации радона в грунте и не чувствителен к концентрации радона в воздухе, а значит, и к указанным факторам нестабильности. В то же время, находясь в равновесии с окружающей средой, поток тепловых нейтронов чувствителен к состоянию этой среды — ее температуре, пористости, уровню грунтовых вод и т.д. Пористость верхних слоев грунта меняется при любых колебаниях земной коры как во время землетрясений, так и, возможно, при их подготовке. Регистрироваться должны именно тепловые нейтроны, время жизни которых в обычном грунте составляет около 1 мс. В нашем эксперименте непрерывное наблюдение фонового потока тепловых нейтронов осуществлялось специальными электронно-нейтронными детекторами (эн-детекторами) [2], расположенными на высоте 4300 м над уровнем моря. В отличие от нейтронных мониторов, эн-детекторы чувствительны к тепловым нейтронам.

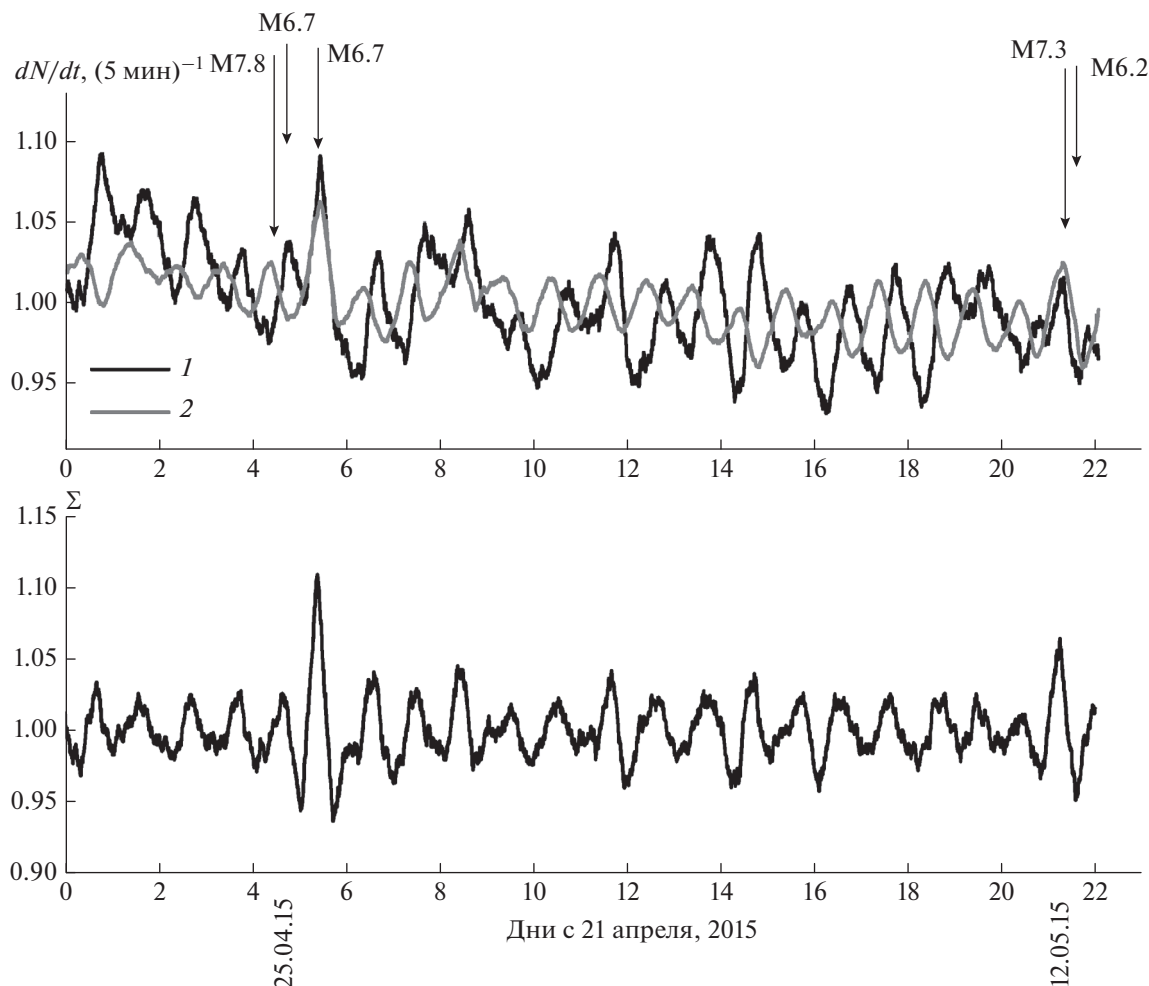
## 1. УСТАНОВКА

Экспериментальная установка PRIZMA-YBJ [3], прототип большой установки (проект PRISMA [4]) для изучения ШАЛ (Широких Атмосферных Ливней), проработала 3.5 г. в Тибете на высокогорном плато Yangbajing на высоте 4300 м над уровнем моря в центре ангара установки ARGO-YBJ [5]. Она состояла из 4-х эн-детекторов, площадью 0.35 м<sup>2</sup> каждый, способных регистрировать как тепловые

нейтроны, так и одновременное прохождение нескольких заряженных частиц. Сигнал от одиночной заряженной частицы лежит ниже порога регистрации, составляющего ~3 частицы. В основе детектора лежит неорганический светосостав <sup>6</sup>LiF + ZnS(Ag), представляющий собой сплав фторида лития, обогащенный изотопом <sup>6</sup>Li до 90%, с сульфидом цинка — хорошо известным сцинтиллятором. При захвате нейтрона происходит реакция <sup>6</sup>Li(*n*, α)<sup>3</sup>H с выделением 4.78 МэВ энергии, которую тритон и альфа-частица теряют в тонком слое ZnS(Ag). Данная методика позволяет разделять по форме импульса сигналы от захвата нейтрона (“нейтроны”) и от одновременного прохождения нескольких заряженных частиц через сцинтиллятор (“заряженные”) при помощи оцифровки импульсов с использованием флэш-АЦП. Онлайн-программа записывалась на диск числа зарегистрированных импульсов, отобранных как “нейтроны”, и фоновых, типа “заряженные”, в каждом эн-детекторе каждые пять мин.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным этой установки уже опубликованы работы, в том числе и по вариациям природного потока тепловых нейтронов [6, 7]. Наблюдались суточные, сезонные, лунно-приливные и долгосрочные вариации. Было показано [7], что события типа “заряженные” связаны с распадами



**Рис. 2.** Отклик установки PRISMA-YBJ на землетрясения в апреле–мае 2015 г. Сверху – 5-минутные точки, усредненные скользящим средним за 8 ч для обеих наблюдаемых эн-детекторами компонент – “нейтроны” (1) и “заряженные” (2). Внизу – параметр  $\Sigma$ , сглаженный 8-часовым скользящим средним с применением фильтра низких частот ( $<0.5 \text{ сут}^{-1}$ ). Стрелки показывают моменты мощнейших толчков магнитудой более 6.

ядер радона в воздухе. Т. о., один и тот же детектор может одновременно мониторить концентрацию радона и в воздухе и в грунте, что и было использовано в анализе.

В апреле–мае 2015 г. произошла серия мощных землетрясений в Непале на расстоянии  $\sim 600$  км от Янгбаджинга (см. рис. 1). Анализ данных показал наличие отклика эн-детекторов PRISMA-YBJ на некоторые из этих землетрясений. Результат представлен на рис. 2 сверху. Усредненные за 8 ч точки для нейтронов и “заряженных” идут, как правило, в противофазе (верхний график). Однако в дни мощных толчков, либо на следующий день фазы кривых совпадают (26.04 и 12.05). Для того чтобы подчеркнуть эту аномалию, мы ввели новый параметр – сумма нормированных последовательностей, а именно:  $\Sigma = n_{\text{норм}} + ch_{\text{норм}} - 1$ , где  $n_{\text{норм}}$  – нормированная скорость счета нейтронов, а  $ch_{\text{норм}}$  – нормированная скорость счета “за-

ряженных”. Поведение этого параметра показано на рис. 2 внизу. Видно, что сигнал хорошо выделяется на фоне шума. Так, амплитуда пика 26.04 составляет  $9.5\sigma$ , а 12.05 около  $6.5\sigma$ . Это максимальные значения параметра  $\Sigma$  за все время наблюдения. Всего же за 3.5 года было зарегистрировано 6 пиков с амплитудой более  $6\sigma$ , из которых 3 совпали с землетрясениями в радиусе 600 км, один совпал с мощной геомагнитной бурей ( $Kp = 7$ , 08.05.16) и два мы не смогли сопоставить с какими-либо геофизическими явлениями. Т.о., за 3.5 года было только 2 ложных сигнала, что является хорошим результатом по сравнению с частыми ложными сигналами стандартных радонометров. Из-за ограничения на размер статьи, мы не приводим здесь графики других событий. Для интерпретации полученных результатов требуется понять процессы, происходящие в земной коре и ответить на ряд вопросов:

- почему отклик на мощнейший толчок (25.04) произошел лишь на следующий день 26.04?
- почему отклик на второй по мощности толчок (12.05) произошел в тот же день?
- как формируется нейтронная суточная волна и почему происходит сбой ее фазы?
- почему есть отклик даже на относительно слабые толчки с  $M \sim 4-4.6$ , если они повторились через  $\sim 24$  ч (что мы наблюдали в октябре 2016 г.) и не видим эффекта от более сильных одиночных землетрясений с эпицентрами к востоку от Янгбаджинга? Возможно работает некий резонансный механизм, раскачивающий суточную волну? Или наоборот, приливная волна способна инициировать начало землетрясения? О существовании корреляций моментов землетрясений с фазами приливных волн отмечено в работе [8].
- как все это связано с геологией?

Мы не беремся отвечать на эти сложные вопросы. Надеемся, что это когда-нибудь сделают геофизики. Пока мы лишь демонстрируем новый метод изучения этих сложных процессов, с использованием ядерно-физических инструментов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эн-детекторы, разработанные нами для регистрации нейтронов в широких атмосферных ливнях (проект PRISMA), оказались хорошим инструментом для геофизических исследований. Полученные результаты демонстрируют чувствительность природного потока тепловых нейтронов к землетрясениям с эпицентром на расстоянии более 500 км. Землетрясения, как и любые вибрации и колебания, изменяют свойства зем-

ной коры и ее поверхностного слоя, что и приводит к изменению скорости диффузии радона из более глубоких слоев и к изменению скорости генерации нейтронов в  $(\alpha, n)$ -реакциях при распадах  $\alpha$ -активных нуклидов из цепочки радона в грунте вблизи детектора. Глобальная сеть таких детекторов, позволила бы получить более подробные и статистически обеспеченные данные, на основе которых, возможно, в дальнейшем удастся понять природу явления и ответить на поставленные выше вопросы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-29-13067\_офи\_м, № 18-02-00339) и Программы Президиума РАН “Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фирстов П.П., Макаров Е.О.* // Сейсмич. приборы. 2005. Т. 51. № 4. С. 58.
2. *Sten'kin Yuri V.* // Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications, Ed: Sidorov M., Ivanov O. 2010. Nova Sci. Publishers. Ch. 10. P. 253.
3. *Bartoli B., Bernardini P., XBi X.J. et al.* // Astropart. Phys. 2016. V. 81. P. 49.
4. *Stenkin Yu.V.* // Nucl. Phys. B. 2009. V. 196. P. 293.
5. *Baccietal C.* // Astropart. Phys. 2002. V. 17. P. 151.
6. *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. Rus. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 2. P. 160.
7. *Stenkin Yu., Alekseenko V., Cai Z. et al.* // Pure and Appl. Geophys. 2017. V. 174. № 7. P. 2763.
8. *Юрков Е.Ф., Гитис В.Г.* // Физика Земли. 2005. № 4. С. 4; *Yurkov E.F., Gitis V.G.* // Izv. Phys. Solid Earth. 2005. V. 41. № 4. P. 255.