

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОГО ФОНА И ПОИСК СИГНАЛОВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ

Н. М. Салихов<sup>1,2</sup>, К. А. Аргынова<sup>3</sup>, Л. И. Вильданова<sup>1</sup>, В. В. Жуков<sup>1</sup>,  
Т. К. Идрисова<sup>3</sup>, Б. М. Искаков<sup>3</sup>, С. А. Мамина<sup>1</sup>, Г. Д. Пак<sup>2</sup>, В. А. Рябов<sup>1</sup>,  
Н. О. Садуев<sup>4</sup>, Т. Х. Садыков<sup>3</sup>, А. Л. Щепетов<sup>1</sup>

*На Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС) создана аппаратура для непрерывного многоканального мониторинга интенсивности радиационного фона как в приземной атмосфере, так и на глубине 50÷100 м ниже поверхности грунта, а также для регистрации электромагнитных полей, акустических сигналов и вариации уровня грунтовых вод в находящейся на территории станции подземной скважине. Цель эксперимента заключается в поиске характерных сигналов-индикаторов усиливающейся сейсмической активности в окружающем ТШВНС сейсмоопасном регионе. В настоящем сообщении приводится описание системы установленных в подземной скважине детекторов и представлены экспериментальные результаты, подтверждающие перспективность этого направления исследований для задач, связанных с поиском сигналов-предвестников землетрясений.*

**Ключевые слова:** сейсмическая активность, многоканальный мониторинг, сигналы-предвестники землетрясений.

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ryabov@lebedev.ru.

<sup>2</sup> Институт Ионосферы, Казахстан, Алматы.

<sup>3</sup> Университет Сатпаева, ТОО “Физико-технический институт”, Казахстан, Алматы.

<sup>4</sup> Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Институт экспериментальной и теоретической физики, Казахстан, Алматы.

На протяжении нескольких последних лет на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС) ведется поиск характерных геофизических сигнатур, связанных с нарастанием сейсмической активности в окружающем станцию регионе, и признаков, сигнализирующих о подготовке близких землетрясений. Для этой цели используются многолетние ряды измерений радиационного фона в приземном воздухе станции [1, 2], мониторинговые данные по интенсивности акустических сигналов, включая акустический отклик на прохождение частиц проникающей компоненты космических лучей через сейсмически напряженную среду [3–5], результаты регистрации электромагнитных возмущений в литосфере, атмосфере и ионосфере, которые могут быть обусловлены воздействием связанных с сейсмическими процессами электрических полей [6, 7].

Накопленные к настоящему времени на ТШВНС экспериментальные данные заложили основу для перехода от отдельных наблюдений такого рода к регулярному, объединенному во времени и пространстве, комплексному мониторингу различных параметров геофизической среды, начиная от верхних слоев литосферы (десятки-сотни метров ниже поверхности грунта) и вплоть до высот ионосферы (сотни километров над поверхностью Земли) [8]. Тематика подобных работ определяется необходимостью проследить всю цепочку распространения возмущения от активизирующихся сейсмических процессов через последовательность различных геофизических сред, начиная от подпочвенных слоев горных пород до приземной атмосферы и далее ионосферы, и выявить характерные аномалии, которые могли бы быть использованы для разработки методов прогноза землетрясений. Учитывая редкую повторяемость сильных землетрясений для конкретного региона, требуется длительный период наблюдений, чтобы уверенно доказать или опровергнуть причастность выявленной аномалии к процессу подготовки сильного землетрясения. Существует также предположение, что некоторые аномальные эффекты могут проявляться только при землетрясениях, амплитуда которых превышает некоторый порог [9]. Эти обстоятельства обуславливают необходимость в длительном непрерывном мониторинге различных геофизических параметров.

Географический регион северного Тянь-Шаня, охватывающий горные хребты Заилийский Алатау и Кунгей Алатау, представляет собой сейсмически опасную область, к которой относятся эпицентры двух исторических землетрясений: Вернинского (1887 г., магнитуда М7.3) и Кеминского (1911 г., М8.2). Именно в этом регионе расположен крупный мегаполис Казахстана – город Алматы, и здесь же, в ~40 км от города и на высоте 3340 м над уровнем моря располагается ТШВНС.

Для поиска характерных сигналов-индикаторов усиливающейся сейсмической активности на ТШВНС применяется система многоканального мониторинга различных компонент радиационного фона, включающая в себя гамма- и нейтронные детекторы как расположенные на поверхности земли, так и установленные на различных уровнях, от 50 до 150 м, в пробуренной на территории станции глубинной скважине (см. рис. 1). В качестве гамма-детекторов используются обладающие высокой эффективностью по отношению к регистрации гамма-излучения в кэВ-ном диапазоне энергий неорганические сцинтилляторы на основе кристаллов NaI(Tl). Аналоговые выходные сигналы каждого детектора подключены к набору амплитудных дискриминаторов, что позволяет регистрировать интенсивность потока гамма-квантов одновременно для нескольких энергетических порогов в пределах (50–1000) кэВ. Для регистрации потока тепловых нейтронов применяются пропорциональные счетчики ионизации со специальным газовым наполнением, включающим изотоп  $^3\text{He}$ . Импульсные сигналы геоакустической эмиссии регистрируются расположенными на различных уровнях скважины микрофонами, которые обладают чувствительностью 25 мВ/Па в акустическом диапазоне частот (500–10000) Гц. Помимо перечисленных детекторов в состав экспериментального комплекса ТШВНС входят также датчики метеорологических параметров (атмосферное давление, температура, влажность), регистратор уровня грунтовых вод, измеритель квазистационарного электрического поля, пункты регистрации электромагнитных колебаний в частотном диапазоне от долей Гц до десятков кГц, оснащенные антеннами в виде петли из кабеля длиной  $\sim 1500$  м, и доплеровский ионозонд на слабонаклонной радиотрассе.

Иллюстрацией перспективности проводимого на комплексе детекторов ТШВНС поиска характерных эффектов-индикаторов сейсмической активности служат данные по синхронной записи интенсивности импульсных сигналов от гамма- и акустических детекторов, которые были получены в период, предшествующий одному из землетрясений с близким расположением эпицентра. 30 декабря 2017 года в 15:55:45 UT вблизи г. Алматы произошло землетрясение магнитудой  $M_{PV}=4.2$  и энергетическим классом  $K=8.1$ . Эпицентр землетрясения находился на глубине  $\sim 10$  км и на расстоянии  $\sim 5$  км от ТШВНС. Результаты мониторинга радиационного и акустического фона детекторами глубинной скважины станции, который проводился на протяжении трех предшествующих землетрясению недель, представлены на рис. 2.

Как следует из этих графиков, за семь суток до землетрясения в скважине был зарегистрирован аномальный всплеск интенсивности гамма-излучения, который был



Рис. 1: Схема размещения детекторов в глубокой скважине ТШВНС.

ограничен диапазоном энергий (60–180) кэВ, а его общая продолжительность составляла  $\sim 5$  ч. На протяжении трех последующих суток вплоть до землетрясения в скважине сохранялся повышенный уровень низкоэнергичного гамма-фона. За семь суток до начала возрастания радиационного фона (и за 10 суток до момента землетрясения) в скважине наблюдалась квазирегулярная последовательность возрастаний интенсивности импульсов геоакустической эмиссии, причем длительность каждого такого возрастания составляла (1–2) ч, а разделяющие их временные промежутки варьировались в пределах (5–12) ч. За пределами предшествующего данному землетрясению десятидневного периода подобных аномалий в поведении регистрируемых характеристик не наблюдалось.

Отклик на активизацию сейсмических процессов был обнаружен также в вариациях потока гамма-квантов в приземной атмосфере, временной график которых показан на рис. 3. Следует подчеркнуть, что на интенсивность потока гамма-квантов кэВ-ных энергий над поверхностью земли оказывают сильное влияние выпадения осадков в виде дождя, снега и града [10], а также изменения температуры воздуха и атмосферного давления, что мешает однозначной идентификации сейсмогенных эффектов. Например, в то время, как в вариациях потока гамма-квантов, наблюдавшихся в скважине нака-

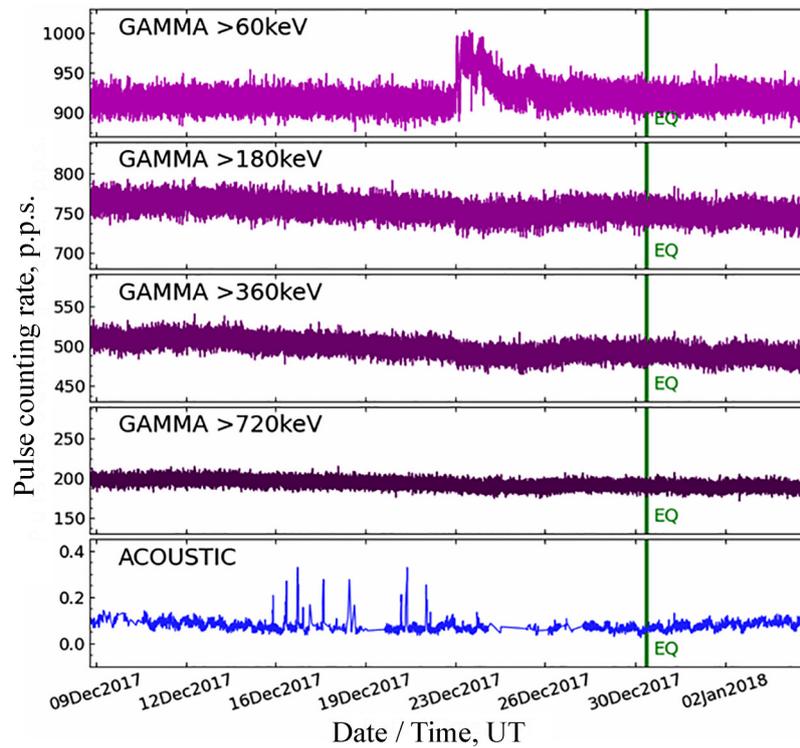


Рис. 2: Мониторинговые записи скорости счета импульсных сигналов для находящихся в глубинной скважине Тянь-Шаньской станции гамма-детектора и акустического датчика, регистрировавшиеся в подготовительный период близкого землетрясения 30.12.2017. Момент землетрясения (EQ) отмечен вертикальной линией.

нуне землетрясения, был отчетливо зарегистрирован не только всплеск, но и тонкая структура возмущения, в приземной атмосфере отклик на активизацию сейсмических процессов имеет существенно более сглаженную форму. Кроме того, возрастание интенсивности гамма-излучения в приземной атмосфере запаздывает относительно всплеска ионизации в скважине на  $\sim 5$  ч, что, по-видимому, соответствует продолжительности процесса миграции радиоактивных элементов из глубины подпочвенных слоев на поверхность. Такие особенности полученных распределений служат иллюстрацией существенного преимущества, которое для поставленной задачи имеет размещение регистрирующей аппаратуры на различных глубинах ниже поверхности грунта.

Повышение интенсивности потока гамма-квантов (всплески), наблюдавшиеся сначала в скважине, а затем, с задержкой, и в приземном слое воздуха, с большой вероятностью связаны с дополнительной эксхалацией радона и его дочерних продуктов распада из горных пород при активизации сейсмических процессов [11]. Аналогичная после-

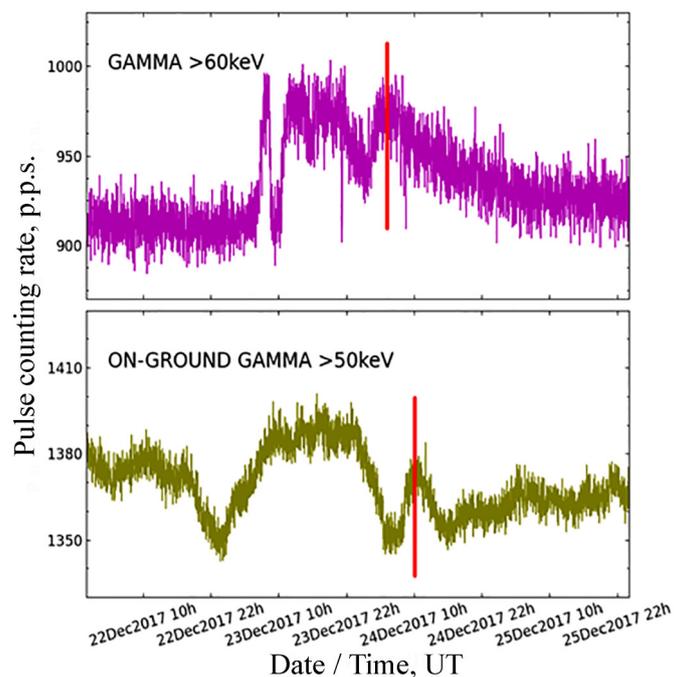


Рис. 3: Предшествующий землетрясению 30.12.2017 выброс интенсивности радиационного фона по данным подземного (вверху) и наземного гамма-детекторов. Два соответствующих друг другу пика в скорости счета гамма-квантов отмечены вертикальной линией.

довательность – повышение потока гамма-квантов вслед за аномальным увеличением концентрации почвенного радона, отмечалась также за несколько дней до землетрясений на севере Тайваня [12].

Записи вариаций интенсивности нейтронного фона в окружающей среде, полученные в период как предшествующий, так и последующий землетрясению 30.12.2017, представлены на рис. 4. Для этих измерений на ТШВНС использовались два детектора, построенные на базе чувствительных к потоку тепловых нейтронов газоразрядных счетчиков “Гелий-2”, и установленные в двух пунктах на территории станции, разделенных расстоянием  $\sim 170$  м. При этом детектор № 1 находился непосредственно вблизи поверхности грунта в легком деревянном укрытии, а детектор № 2 – на втором этаже капитального здания с бетонными перекрытиями. Время набора импульсных сигналов от нейтронных счетчиков для каждой точки представленных распределений составляло 1000 с, а в указанные на графиках значения скорости счета были внесены поправки, учитывающие изменения атмосферного давления на протяжении периода измерений.

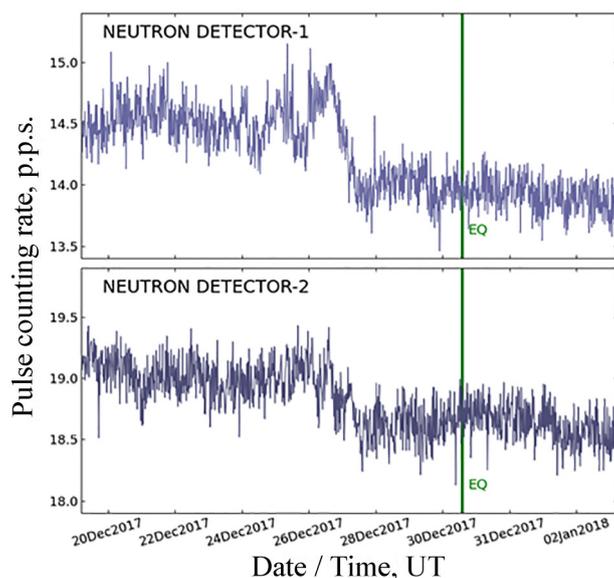


Рис. 4: Временной ход фона тепловых нейтронов по данным двух детекторов ТШВНС в период, предшествующий землетрясению 30.12.2017. Момент землетрясения (EQ) на обоих графиках отмечен вертикальной линией.

На рис. 4 видно, что приблизительно за четверо суток до момента землетрясения интенсивность фоновых нейтронов в обоих, независимых друг от друга, пунктах регистрации скачкообразно (за время  $\sim 20$  ч) уменьшилась, причем скачок нейтронного фона запаздывал на  $\sim (2-2.5)$  суток относительно периода вариаций интенсивности гамма-излучения. Относительная амплитуда уменьшения составила  $\sim (2-3)\%$  от средней скорости счета нейтронных сигналов, и более отчетливо этот эффект наблюдался в данных детектора № 1, находящегося практически на открытом воздухе у поверхности грунта. При этом согласно данным метеостанции ТШВНС, в период скачкообразного спада интенсивности регистрируемых сигналов не было осадков и значительных изменений толщины снежного покрова. Отмеченные особенности позволяют предполагать, что, как и в случае вариаций радиационного гамма-фона, эффект, наблюдавшийся во временном ходе скорости счета нейтронных сигналов, может объясняться резким изменением условий эксхалляции радиоактивных продуктов из грунта, которое произошло в результате процессов, приведших к землетрясению 30.12.2017.

Исходя из представленных в настоящем сообщении результатов, авторы полагают, что непрерывный многофакторный мониторинг может улучшить понимание взаимосвязи между изменениями радона, гамма-излучения, фона тепловых нейтронов и региональными деформациями земной коры в периоды, предшествующие землетрясениям.

Работа выполнена при поддержке грантов AP09260262 “Мониторинг и исследование межгеосферных взаимодействий в системе литосфера-атмосфера-ионосфера в геодинамических активных регионах” и ИРН: AP09258896 “Исследование проникающей компоненты космических лучей по данным гибридного ионизационно-нейтронного калориметра “Адрон-55” с инфраструктурой сцинтилляционных детекторов” Министерства образования и науки Республики Казахстан.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] N. M. Salikhov, G. D. Pak, O. N. Kryakunova, Известия НАН РК (серия физико-математическая), № 5, 138 (2013).
- [2] N. M. Salikhov, A. L. Shepetov, A. P. Chubenko, et al., arXiv: 1301.6965 [physics.geoph], 2013.
- [3] Г. А. Гусев, В. В. Жуков, Г. И. Мерзон и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(12), 43 (2011). DOI: 10.3103/S1068335611120037.
- [4] Л. И. Вильданова, Г. А. Гусев, В. В. Жуков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(3), 31 (2013). DOI: 10.3103/S1068335613030019.
- [5] K. M. Mukashev, T. Kh. Sadykov, V. A. Ryabov, et al., Acta Geophysica **67**, 1241 (2019). DOI: 10.1007/s11600-019-00303-4.
- [6] Н. М. Салихов, Я. В. Дробжева, В. М. Краснов и др., Известия НАН РК, № 4, 129 (2011).
- [7] Н. М. Салихов, Известия НАН РК (серия физико-математическая), № 4(308), 27 (2016).
- [8] A. Shepetov, O. Kryakunova, S. Mamina, et al., Physics of Atomic Nuclei **84**(6), 1128 (2021). DOI: 10.1134/S1063778821130330.
- [9] S. A. Pulinet, D. P. Ouzounov, A. V. Karelin, D. V. Davidenko, Geomagnetism and Aeronomy **55**(4), 521 (2015). DOI: 10.1134/S0016793215040131.
- [10] Н. М. Салихов, О. Н. Крякунова, А. Л. Щепетов, Г. Д. Пак, Известия НАН РК (серия физико-математическая), № 4, 142 (2011).
- [11] H. Friedmann, Radiation Protection Dosimetry **149**(2), 177 (2012). DOI: 10.1093/rpd/ncr229.
- [12] C. Fu, L. C. Lee, T. F. Yang, et al., American Geophysical Union, Fall Meeting, 2015, abstract #NH21A-1813.

Поступила в редакцию 9 августа 2022 г.

После доработки 26 августа 2022 г.

Принята к публикации 27 августа 2022 г.