

УДК 53.06

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЯТРСЕНИЙ

<sup>1,2)</sup> Исакаев Б.А., <sup>1)</sup> Аргынова А.Х., <sup>1)</sup> Аргынова К.А., <sup>1)</sup> Бейсенова А., <sup>1)</sup> Застрожнова Н.Н.,  
<sup>3)</sup> Пискаль В.В., <sup>4)</sup> Салихов Н.М., <sup>2)</sup> Тастанова К., <sup>1,2)</sup> Таутаев Е.М., <sup>2)</sup> Хабаргельдина М.

<sup>1)</sup> *Сатпаев Университет, ТОО «Физико-технический институт», Алматы, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

<sup>3)</sup> *Физический институт академии наук России им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия*

<sup>4)</sup> *Институт ионосферы, Алматы, Казахстан*

Исследование радиационной эрозии началось в 50-70-х годах прошлого века. Сравнительно быстро было показано, что удаление атомов и молекул с поверхности при облучении слаботочными пучками ускоренных ионов с энергиями  $10^2$ – $10^4$  эВ происходит в результате парных столкновений быстрых частиц с атомами вещества, т.е. так называемого столкновительного распыления. Мюоны космических лучей тоже являются высокоэнергетическими заряженными частицами и, следовательно, есть вероятность, что они тоже могут разрушить структуру твердых тел при попадании. Именно это свойство мюонов привело на мысль, что их можно использовать для прогноза и мониторинга землетрясений в сейсмически активных зонах. Мюоны при прохождении в земной коре порождают широкий атмосферный ливень (ШАЛ) и частицы ШАЛ при взаимодействии с атомами определенных пород могут разрушить их структуру и в результате это разрушение (трещины) сопровождается акустическими эффектами.

### ВВЕДЕНИЕ

В 90-е годы учеными из Физического института им. П. Н. Лебедева и Института физики Земли был предложен новый метод прогноза землетрясений, а точнее использование для прогноза землетрясений сигнала от упругих колебаний в акустическом диапазоне частот, которые, предположительно, могут генерироваться под воздействием локальной ионизации, образованной в момент прохождения проникающих частиц космического излучения — мюонов высокой энергии, — через сейсмически напряженную среду в глубинных слоях земной коры. В случае, если бы такой подход оказался осуществимым, зондирование земной коры пучком проникающих энергичных мюонов, постоянным источником которых являются космические лучи высокой энергии, позволило бы вести непосредственный мониторинг внутреннего состояния литосферы на глубинах 1–20 км, что максимально близко к зоне формирования очагов землетрясений. В комплексе с сейсмоакустическим мониторингом отклика глубинной среды на триггерное воздействие мюонного пучка, такое зондирование представляет собой уникальный метод непосредственного проникновения в сравнительно близкую, по сравнению с другими методами, окрестность очаговой зоны. Каждое отдельное измерение при мюонном мониторинге является локальным, а в совокупности все измерения, выполненные в течение некоторого интервала времени, позволяют контролировать значительный объем очаговой зоны, величина которого зависит от чувствительности сейсмоакустических приемников, уровня сейсмоакустического шума и чувствительной площади установки для детектирования мюонного потока. Впоследствии этот метод получил количественное обоснование, где путем численного

моделирования исследовалось прохождение мюонов с энергией  $\sim 10$ – $100$  ТэВ через грунт, и были получены конкретные оценки множественности таких мюонов в ШАЛ с энергией  $10^{16}$ – $10^{18}$  эВ, глубины их проникновения внутрь земной коры и число взаимодействий (микротрещин), которые такие мюоны могут вызывать внутри сейсмически напряженных областей коры, в зависимости от энергии мюонов и запасенной энергии упругой деформации. Появление проникающих частиц связано с развитием широких атмосферных ливней в атмосфере, для выделения акустической эмиссии на шумовом фоне можно применять поиск корреляций между акустическими сигналами и сигналами о прохождении ШАЛ, либо сигналами мюонного детектора.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предварительный поиск кратковременных сигналов акустической эмиссии в событиях, связанных с групповым прохождением мюонов высокой энергии, проводился в специальном эксперименте на Тянь-Шаньской высокогорной станции с 2012 г. По завершении модификации Тянь-Шаньской ливневой установки и переходу к регулярной регистрации широких атмосферных ливней эксперименты подобного рода предполагается продолжить в полном объеме, то есть с привлечением к анализу зарегистрированных акустических событий подробной информации о параметрах (первичная энергия, расстояние от оси и т.п.) наблюдавшихся в их временной окрестности ШАЛ.

Высокочувствительный микрофон с чувствительностью 25 мВ/Па в акустическом диапазоне частот 500–1000 Гц размещается на глубине 50 м от поверхности земли внутри скважины, пробуренной в скальном грунте. Расстояние между скважиной и системой ливневых детекторов составляет примерно 200 м.

Передача электрических сигналов от микрофона из глубины скважины производится по образованной витой парой проводов кабельной линии через посредство трансформаторной развязки, при этом микрофон и служащий для передачи сигнала промежуточный малогабаритный трансформатор представляют собой единый конструктивный блок, который целиком опускается в скважину. Постоянное напряжение  $\pm 3$  В для питания микрофона вырабатывается независимым источником питания, который построен на основе отдельного трансформатора с незаземленной вторичной обмоткой и не имеет непосредственного электрического контакта ни с остальной частью электронной схемы, ни с силовыми линиями внешней электрической сети. От источника питания к микрофону это напряжение подается по второй паре витых проводов. Таким образом, микрофонный узел измерительной системы оказывается электрически изолированным от всех общих линий заземления и подвода питания к электронным схемам, на которых могут присутствовать значительные электромагнитные наводки и шумы, в частности, синусоидальная помеха с частотой 50 Гц от внешней сети переменного тока.

Регистрация сигналов акустического детектора производится в специальном помещении, которое располагается непосредственно у верхнего края скважины и в котором размещаются остальные узлы формирующей сигнал аппаратуры: дифференциальный усилитель и селектор низкочастотной огибающей микрофонного сигнала. Сигнал от микрофона через усилители передается к компьютеру. Всё устройство обеспечивается энергией от солнечных панелей (рисунок 1).



Рисунок 1. Специальное помещение с установленными в его крыше солнечными панелями

В рамках эксперимента была спроектирована и реализована в подземном помещении ТШВНС на глубине 20 м. водного эквивалента комплексная установка «Мюонный луч» для синхронных измерений потока проникающих мюонов и акустической эмиссии, излу-

чаемой при раскрытии микротрещин в напряженной сейсмоактивной среде. Функциональная схема установки представлена на рисунке 2.

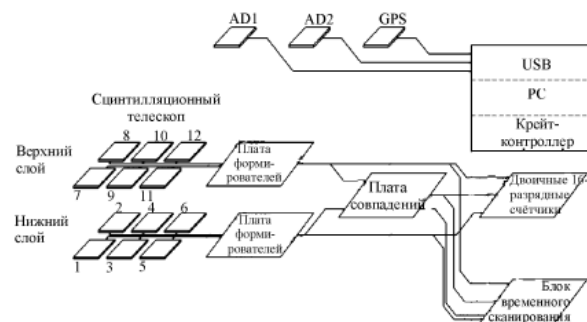


Рисунок 2. Функциональная схема установки «Мюонный луч» для апробации космофизического метода прогноза сильных землетрясений из работы

Толща горной породы над установкой обеспечивает поглощение высокоэнергичной компоненты ШАЛ, так что сцинтилляционных детекторов достигает лишь мюонная компонента ливня. Непрерывный мониторинг акустических сигналов, синхронизированных по времени с мюонным триггером, начат в 2012 г. Результаты показали, что акустический отклик возникает только для ШАЛ, рожденных первичной частицей с энергией  $E_0 > 10^{15}$  эВ, при этом, поток мюонов составляет порядка 10, а амплитуда акустического импульса зависит от суммарной энергии мюонной компоненты, то есть, от энергии ШАЛ. Также было обнаружено, что каждому событию, в котором наблюдалось превышение акустического сигнала над его средним фоновым уровнем, обычно можно поставить в соответствие не одно, а ряд ливневых событий, случившихся на протяжении одной минуты до начала первого временного интервала в акустическом скане.

На рисунке 3 приведен, для примера, результат измерений для 17 ноября 2016 г. Видно, что в 18:46:53 наблюдался резкий выброс акустической эмиссии, а повышенная плотность потока заряженных частиц в широком атмосферном ливне наблюдалась в 18:45:48, то есть, за 1 мин. 5 сек. до акустического импульса.

Для работы с данными акустического детектора разработана программа визуализации *k09007*, которая, при запуске в графическом режиме работы позволяет просматривать в своем окне хранящиеся в этих файлах результаты измерений в виде интерактивных графиков. Программа производит загрузку усредненных параметров акустического сигнала в специально предназначенную для них таблицу *асои* одноименной базы данных. Хранящаяся в этой таблице информация может быть запрошена web-сервере для отображения в текстовой или графической

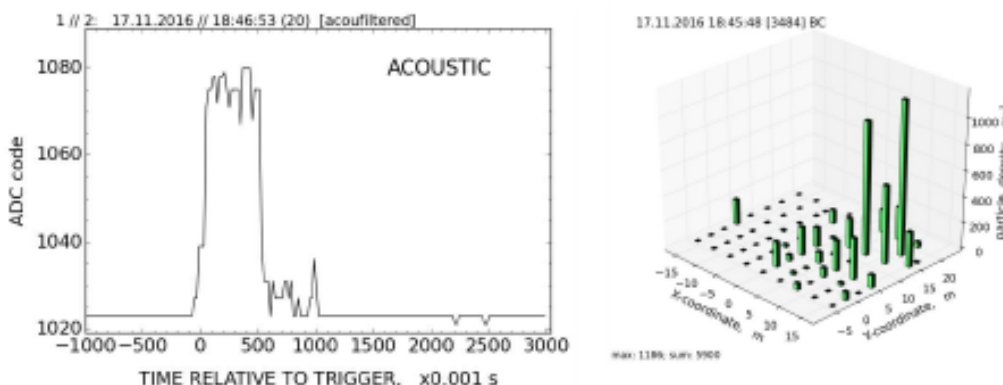


Рисунок 3. Временной скан интенсивности акустических сигналов и распределение плотности потока частиц в ливневом событии 17 ноября 2016 г.

форме на web-странице Тянь-Шаньской станции в виде, представленном на рисунке 4, где показана среднеквадратичная амплитуда акустического сигнала на протяжении двух суток 15–16 ноября 2017 г. (вверху) и количество событий с амплитудным кодом огибающей свыше 300, приходящихся на одну минуту наблюдений (внизу).

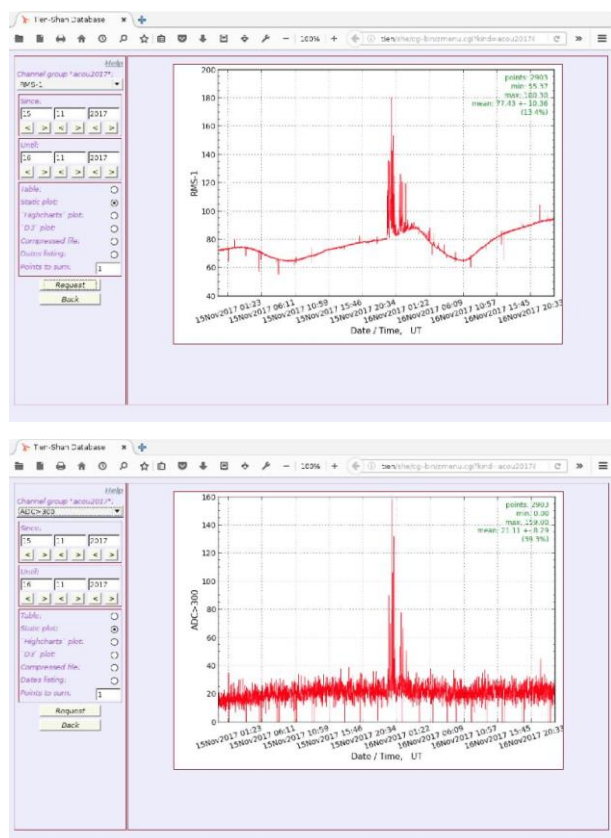


Рисунок 4. Среднеквадратичная амплитуда акустического сигнала, измеренная акустическим детектором на Тянь-Шаньской станции на протяжении двух суток 15–16 ноября 2017 г. (вверху) и количество событий с амплитудным кодом огибающей свыше 300, приходящихся на одну минуту наблюдений (внизу)

Записи одновременных измерений амплитуды акустического сигнала и плотности потока высокоэнергичных заряженных частиц в широком атмосферном ливне (ШАЛ) приведены на рисунке 4 для 15 и 12 ноября 2017 г. Четко выделяются кратковременные события со значительным возрастанием, как амплитуды акустического сигнала, так и плотности потока заряженных частиц. Обращает внимание тот факт, что момент прохождения ШАЛ предшествует моменту акустического сигнала, опережая его примерно на 100 с. Эта информация, несомненно, будет полезна в дальнейшем при разработке модели геокосмического взаимодействия.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

В целом можно заключить, что Тянь-Шаньская станция, расположенная в горной местности непосредственно в зоне глубинных разломов земной коры, совместно с системой ливневых детекторов, обеспечивающей возможность мониторинга в режиме реального времени моментов прохождения мощных ШАЛ и связанных с ними пучков энергичных мюонов, представляет собой удобную экспериментальную площадку для исследования возможностей космо-геофизического метода прогноза сильных землетрясений. Разработанная система MAC1 обеспечивает приемлемый уровень чувствительности к акустическому сигналу, коррелированному с проникающим потоком мюонов космических лучей, что позволяет ставить вопрос о поиске сейсмических сигналов, возникающих после прохождения широких атмосферных ливней.

Получены разновидности акустических эффектов, которые предположительно связаны с развитием и распадом микротрещин в напряженной сейсмически активной среде при воздействии на них высокоэнергичных мюонов космических лучей, рожденных в широком атмосферном ливне; акустические эффекты проявляют себя как резкие, но быстро затухающие возрастания интенсивности микрофонного сигнала с типичной длительностью 10–20 мс. Возрастания уровня сигналов в микрофоне сопровождаются кратковременными выбросами амплитуды их огибаю-

щей, при этом, отношение сигнал/шум составляет не менее 5–7 раз для сигнала, снимаемого непосредственно с микрофона, и ~30 раз для его огибающей, что говорит о статистической обеспеченности наблюдаемых акустических эффектов; количество акустических эффектов изменяется с течением времени и обычно варьируется в пределах 1–5 событий/сутки, при этом, акустические импульсы могут быть одиночные, длительностью 4–5 с., в виде «пачек», продолжительностью несколько первых минут, а также в виде цуга колебаний, продолжительностью несколько первых часов; одновременные наблюдения импульсных возрастных амплитуды акустического сигнала и плотности потока частиц в широких атмосферных ливнях показывают, что момент прохождения широкого атмосферного ливня предшествует моменту возрастания акустического сигнала, опережая его, в среднем, на 80–100 секунд.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка для мониторинга геоакустических сигналов, коррелированных по времени с потоком высокоэнергичных мюонов космических лучей, рожденных в широких атмосферных ливнях, функциони-

рующая на базе экспериментального комплекса «ATHLET» на Тянь-Шаньской Высокогорной Научной Станции на территории Алматинского сейсмоактивного региона, совместно с созданной здесь представительной региональной сетью сейсмических станций, представляют собой уникальный экспериментальный полигон для набора статистического материала по влиянию потока мюонов космических лучей на сейсмоактивную среду, что в итоге не только расширит фундаментальные знания в области геокосмических связей, но и позволит решить прикладную задачу – разработать новый космо-геофизический метод прогноза сильных землетрясений в регионе.

*Благодарности:* Работа выполнена при поддержке проекта № BR05236291 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. A. Gusev, V. V. Zhukov, G. I. Merzon et al. // Cosmic rays as a new instrument of seismological studies // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2011. – Vol. 38, No. 12. – P. 374–379.
2. L. I. Vil'danova, G. A. Gusev, V. V. Zhukov et al. // The first results of observations of acoustic signals generated by cosmic ray muons in a seismically stressed medium // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2013. – Vol. 40, No. 3. – P. 74–79.
3. Хачикян Г.Я., Садыкова А.Б., Джанабилова С. Связь частоты повторяемости землетрясений и сейсмической энергии Земли с вариациями солнечной активности. // Научный журнал-приложение международного журнала «Высшая школа Казахстана». Поиск-Izdenis. – 2014. – № 2. – С. 55–61.
4. Shepetov A.L., T.Kh. Sadykov, V.V. Zhukov and etc., Seismic signal Registration with an acoustic detector at the Tian Shan Mountain Station, Series of geology and technical sciences, 2018. Vol. 3, No. 429, P. 47–56.
5. Shepetov A.L., T.Kh. Sadykov, V.V. Zhukov and etc., Seismic signal registration with an acoustic detector at the Tian Shan Mountain Station, Series of geology and technical sciences, 2018. Vol. 3, No. 429, P. 47–56.

#### ЖЕР СІЛКІНІСІН БОЛЖАУ ҮШІН ҒАРЫШ МЮОНДАРЫНЫҢ ЕНУ ҚАБІЛЕТІН ПАЙДАЛАНУ

<sup>1,2)</sup> Б.А. Искаков, <sup>1)</sup> А.Х. Аргынова, <sup>1)</sup> К.А. Аргынова, <sup>1)</sup> А. Бейсенова, <sup>1)</sup> Н.Н. Застрожнава,  
<sup>3)</sup> В.В. Пискаль, <sup>4)</sup> Н.М. Салихов, <sup>2)</sup> К. Тастанова, <sup>1,2)</sup> Е.М. Таутаев, <sup>2)</sup> М. Хабаргельдина

<sup>1)</sup> Сәтбаев Университеті, ТОО «Физика-техникалық институт», Алматы, Қазақстан

<sup>2)</sup> Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

<sup>3)</sup> П.Н. Лебедева атындағы Ресей ғылым академиясының физикалық институты, Мәскеу, Ресей

<sup>4)</sup> Ионосфера институты, Алматы, Қазақстан

Радиациялық эрозияны зерттеу өткен ғасырдың 50–70 жылдарында басталды.  $10^2$ – $10^4$  эВ энергиясымен тездетілген иондардың төменгі ағымдық сәулелерімен сәулелендірілген кезде бетіндегі атомдар мен молекулалардың алыну жылдамдығы бөлшектердің атомдарымен жұптасқан соқтығысу нәтижесінде орын алады, яғни, соқтығысқан шашырау деп аталатын. Ғарыштық сәулелердің мюоны да жоғары энергиялы зарядталған бөлшектер болып табылады, сондықтан олар соққы кезінде қатты бөлшектердің құрылымын бұзуы мүмкін. Мюондардың бұл қасиеті сейсмикалық белсенді аймақтардағы жер сілкіністерін болжау және бақылау үшін пайдалануға болады. Жер қыртысына түсіп жатқан мюондар түрлі бөлшектердің ағындарын тудырады, кейбір заттар атомдары өзара әрекеттесуі кезінде олардың құрылысын бұзады және нәтижесінде бұл бұзылу (жарықтар) акустикалық әсерлермен қатар жүреді.

**USING THE PENETRATING ABILITY OF COSMIC MUONS  
FOR THE EARTHQUAKE PREDICTION**

<sup>1,2)</sup> B.A. Iskakov, <sup>1)</sup> A.Kh. Arginova, <sup>1)</sup> K.A. Argynov, <sup>1)</sup> A. Beisenova, <sup>1)</sup> N.N. Zastrozhnova,  
<sup>3)</sup> V.V. Piskal, <sup>4)</sup> N.M. Salikhov, <sup>2)</sup> K. Tastanova, <sup>1,2)</sup> E.M. Tautaev, <sup>2)</sup> M. Khabargeldina

<sup>1)</sup> *Satpayev University, Physical and Technical Institute, Almaty, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

<sup>3)</sup> *P.N. Lebedeva Physical Institute of the Academy of Sciences of Russia, Moscow, Russia*

<sup>4)</sup> *Institute of the Ionosphere, Almaty, Kazakhstan*

The study of radiation erosion began in the 50–70 s of the last century. It was relatively quickly shown that the removal of atoms and molecules from the surface when irradiated with low-current beams of accelerated ions with energies of  $10^2$ – $10^4$  eV occurs as a result of pairwise collisions of fast particles with atoms of matter, i.e. so-called collision spraying. Cosmic ray muons are also high-energy charged particles, and therefore there is a possibility that they, too, can destroy the structure of solids when hit. It is this property of muons that suggested that they can be used to predict and monitor earthquakes in seismically active zones. Muons falling into the earth's crust gives rise to EAS and streams of different particles when interacting with atoms of certain rocks can destroy their structure and, as a result, this destruction (cracks) is accompanied by acoustic effects.