

Геоакустическая эмиссия при прохождении через земную кору высокоэнергетических мюонов космического происхождения

Б. А. Искаков^{1,2*}, Д. Безноско³, В. В. Жуков⁴, Т. Х. Садыков^{1,2},
Н. М. Салихов⁵, Е. М. Таутаев^{1,2}, А. Л. Щепетов^{4,6}

¹ Сатбаев Университет, ТОО «Физико-технический институт», Алматы, Казахстан

² Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³ Университет Гарвард, Кембридж, США

⁴ Тянь-Шанская высокогорная научная станция, Алматы, Казахстан

⁵ Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

⁶ ФИАН имени А. П. Лебедева, Москва, Российская Федерация

* leodel@mail.ru

Нерешенной проблемой традиционной сейсмологии на сегодняшний день остается выделение из потока регистрируемой многочисленными сейсмическими датчиками информации строго определенного сигнала о приближении конкретного во времени и пространстве катастрофического землетрясения. Такой сигнал обычно теряется на постоянном фоне от большого числа других событий. На рубеже 1980-х и 1990-х гг. учеными из Физического института и Института физики Земли была разработана предварительная концепция нового перспективного направления в сейсмологии. Для прогноза землетрясений используются сигналы от упругих колебаний в акустическом диапазоне частот, которые сигналы могут генерироваться под воздействием ионизации. Ионизация образуется в момент прохождения мюонов высокой энергии через сейсмически напряженную среду в глубинных слоях земной коры. Есть надежда, что этот метод может стать одним из способов прогнозирования землетрясения в будущем.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; мюоны; сейсмология; Земля; космические лучи; микрофон

Поступила в редакцию 02.02.2021; после рецензии 10.02.2021; принята к опубликованию 19.02.2021

RAPID COMMUNICATION

Geoacoustic emission during the passage through the Earth's crust of high-energy cosmic ray muons

В. А. Iskakov^{1,2*}, D. Besnosko³, V. V. Zhukov⁴, T. Kh. Sadykov^{1,2},
N. M. Salikhov⁵, Y. M. Tautayev^{1,2}, A. L. Shepetov^{4,6}

¹ Satbayev University, LLP “Institute of Physics and Technology”, Almaty, Kazakhstan

² Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³ Harvard University, Cambridge, USA

⁴ Tien-Shan High-mountain Scientific Station, Almaty, Kazakhstan

⁵ Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

⁶ A. P. Lebedev Institute of Physics of RAS, Moscow, Russian Federation

* leodel@mail.ru

The unresolved problem of traditional seismology to date is the separation from the stream of information recorded by numerous seismic sensors of a strictly defined signal about the approach of

a catastrophic earthquake specific in time and space. Such a signal is usually lost against a constant background from a large number of another events. At the turn of the 1980s and 1990s, scientists from the Physics Institute and the Institute of Physics of the Earth developed a preliminary concept for a new promising direction in seismology. Using the signal from elastic vibrations in the acoustic frequency range for earthquake prediction. These signals can be generated by ionization. Ionization is formed at the moment of the passage of high-energy muons through a seismically stressed medium in the deep layers of the earth's crust. It is hoped that this method may be one way to predict earthquakes in the future.

Keywords: Acoustic emission, muons, seismology, Earth, cosmic rays, microphone

Received 02.02.2021; revised 10.02.2021; accepted 19.02.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-1-05-11

Геоакустическая эмиссия (ГЭ) природных сред возникает, как правило, в виде отклика на деформационные изменения. Например, сильные возмущения геоакустической эмиссии, возникающие в сейсмоактивных зонах, могут рассматриваться в качестве индикаторов деформационных изменений и предвестников землетрясений, но только после установления их связи с характеристиками деформационного процесса [1–4].

Изучение и использование сейсмических шумов начались очень давно и одними из первых были авторы [5], где сейсмические шумы (СШ) предлагались как способ мониторинга сейсмически активных зон. А также с помощью сейсмических шумов были изучены землетрясения на Аляске и в Мексике в 1979 г. [6].

На рубеже 1980-х и 1990-х гг. учеными из Физического института им. П. Н. Лебедева и Института физики Земли была разработана предварительная концепция нового перспективного направления в сейсмологии: 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 [7–9]. Основная идея этого метода иллюстрируется на рис. 1.

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.

Взаимодействие мюонов с геологической средой сопровождается диссипацией энергии и тепловыделением, способным образовать в земной породе зародышевую микротрещину, которая в сейсмически активной среде начинает быстро рас-

ти, что приводит к высвобождению упругой энергии, запасенной в напряженной среде, и генерации акустической энергии. Оценки спектрального потока акустической энергии, излучаемой при взаимодействии мюонов с земными породами, выполнены в работе [8] для двух различных механизмов – «теплого» и «деструкционного». Для «теплого» механизма элементарным источником акустической волны служит либо трек мюона, либо каскад, возникающий при взаимодействии мюона с грунтом. При этом происходит выделение энергии от проникающих частиц, приводящее к быстрому разогреву и расширению вещества пород. Оценки показали, что этот механизм вносит малый вклад в генерацию акустического шума до 1 кГц.

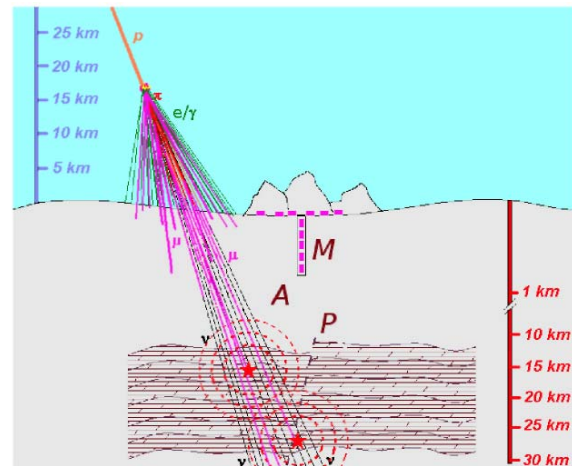


Рис. 1. Идея глубинного сканирования земной коры на основе мюонов из ствола энергичных ШАЛ: P – зона глубинного разлома, A – упругие колебания, которые генерируются в сейсмически напряженной среде под воздействием локальной ионизации от прохождения мюонов μ и распространяются в виде акустической волны, M – система чувствительных микрофонов

«Деструкционный» механизм развивается при взаимодействии энергичных мюонов с сейсмически активной (напряженной) средой, в процессе

которого возникает ядерно-электромагнитный каскад. В этом случае элементарными источниками акустического шума будут раскрывающиеся трещины, возникающие внутри объема каскада. Оценки показали, что даже для случая умеренной трещины 1 мм акустическая энергия увеличивается на 21 порядок. Однако для образования столь мощного импульса под влиянием ядерного взаимодействия должно выполняться жесткое требование на напряжение в среде: оно должно быть чрезвычайно близко к предельному напряжению разрушения горной породы.

Изучение геоакустической эмиссии при прохождении высокоэнергетических мюонов космического происхождения через земную кору проводится на Тянь-Шанской высокогорной научной станции (ТШВНС). Прежде всего осуществлено моделирование пробега мюона в грунте. Моделирование проводилось с помощью пакета CORSICA [10]. Оказалось, что пробег мюонов в грунте с плотностью 2 г/см³ составляет примерно 8–10 км в зависимости от их энергии. Кроме того, рассчитывалось полное число мюонов с энергией больше 3 ТэВ в зависимости от энергии первичных протонов (энергия более 10¹⁵ эВ), вызвавших ШАЛ (рис. 2).

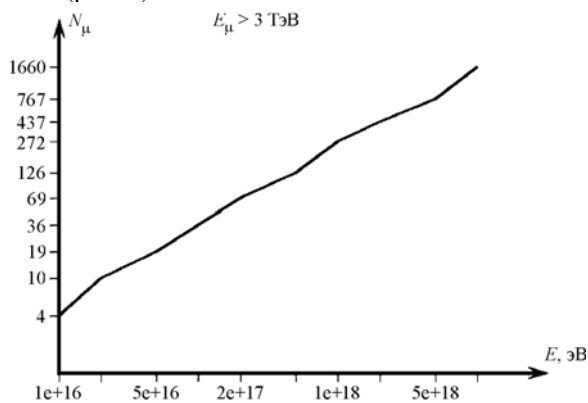


Рис. 2. Зависимость числа мюонов от энергии первичных протонов, вызвавших ШАЛ

Как показывает моделирование, мюоны могут достичь больших глубин Земли и взаимодействовать с сейсмически активной средой, находящейся около очага в метастабильном состоянии. При этом сигнал акустической эмиссии, который может усиливаться на много порядков по сравнению с обычным термоэмиссионным сигналом, можно зарегистрировать на поверхности Земли или в скважине.

После проведения моделирования был создан прототип установки для апробации космофизического метода в подземном помещении ТШВНС на глубине 20 м водного эквивалента [11]. Функциональная схема установки представлена на рис. 3.

Для регистрации мюонной компоненты ШАЛ в установке использовано 12 пластиковых СЦ счет-

чиков размером 1 м² с оптоволоконным съемом сигнала. Разнесенная система СЦ детекторов сгруппирована в два слоя, между которыми находится слой поглотителя толщиной 5.5 кг/см². Электронно-оптический модуль каждого СЦ счетчика состоит из ФЭУ-115М и регистрирующей электроники. Для регистрации акустических и сейсмических сигналов в области частот от 1 Гц до 11 кГц использованы многофункциональные измерители ЭКОФИЗИКА-110А с чувствительными микрофонами. Временная привязка акустических приемников AD1 и AD2 и мюонных детекторов осуществляется по триггерному сигналу и GPS. Пороговая энергия для мюона, попадающего на установку вертикально, составляет 5 ГэВ и возрастает пропорционально косинусу угла падения для наклонного потока мюонов.

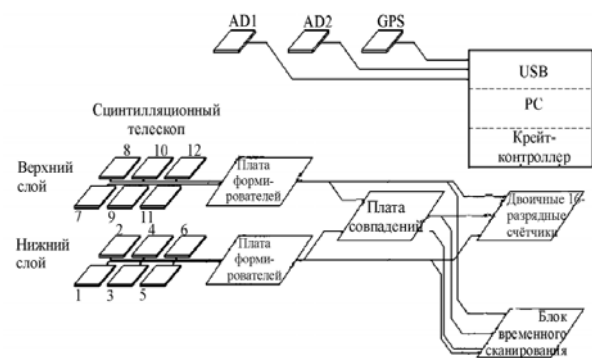


Рис. 3. Схема установки для апробации космофизического метода

Начиная с июля 2012 г. был начат непрерывный мониторинг акустических сигналов и были получены первые результаты (рис. 4). Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы. Воздействие мюонного пучка на горную породу в сейсмоопасном регионе может проявляться различным образом. Во-первых, попадание мюонного пучка в трещину, готовую к раскрытию, служит спусковым механизмом к «мгновенному» раскрытию с выделением акустической эмиссии в широкой полосе частот с временной огибающей в виде биполярного импульса (рис. 4, б). Во-вторых, если трещина не готова к мгновенному раскрытию, мюонный пучок может активировать ее таким образом, что она «дозревает» в течение нескольких секунд и затем раскрывается, также излучая биполярный широкополосный импульс и имитируя приход «мгновенно» излученного импульса с большого расстояния (рис. 4, а). Наконец, возможна ситуация, когда мюонный пучок попадает в кластер из большого числа близкорасположенных трещин, так что одна из них раскрывается «мгновенно» и вызывает за счет сброса напряжения в окрестности соседней трещины ее раскрытие с небольшой задержкой (примерно 1 с). Затем по эстафете процесс повто-

ряется с остальными ближайшими соседями, так что полная звуковая эмиссия во времени оказывается порядка минуты (рис. 4, в).

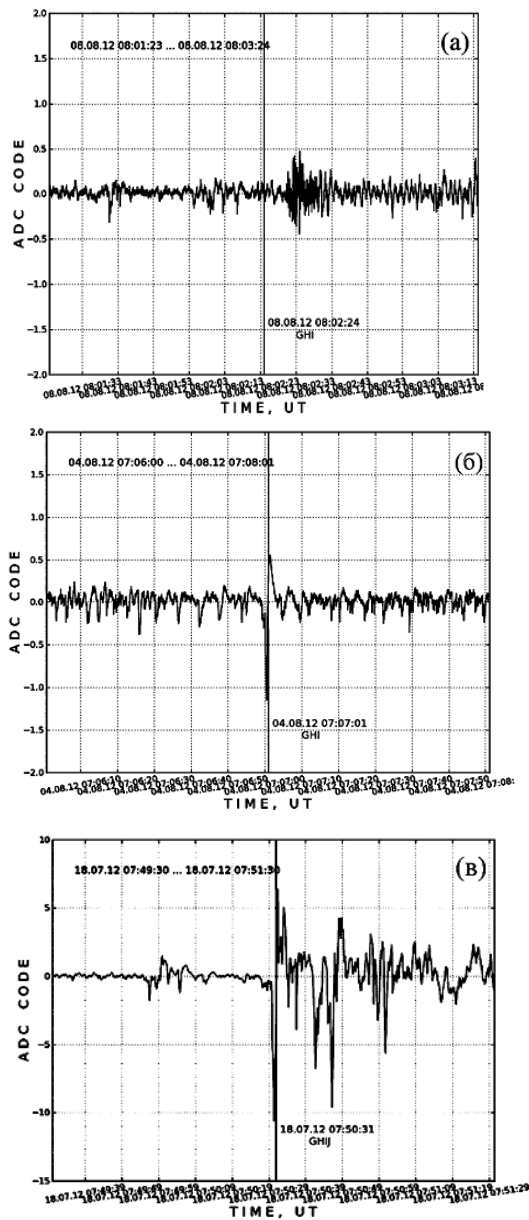


Рис. 4. Примеры регистрации акустических сигналов, коррелированных по времени с мюонным триггером, выработанным при прохождении группы мюонов через СЦ детекторы установки

Следует отметить, что в этом эксперименте показана только принципиальная возможность использования космофизического метода для прогнозирования сейсмической опасности. Для краткосрочного прогноза землетрясений с помощью космофизического метода необходимо проводить непрерывный длительный мониторинг, в результате которого возможно выявить характерные особенности сейсмической активности. Для этой цели в 2018 г. была построена новая экспе-

риментальная установка, с помощью которой можно более детально, подробно изучить космофизический метод [12–13].

Для поиска возможных корреляций между широкими атмосферными ливнями и сигналом упругих колебаний из глубины земной коры создана специальная система акустических детекторов (чувствительных микрофонов), предназначенных для совместной синхронной работы с ливневой установкой. Всю установку энергией обеспечивают две панели солнечных батарей, расположенные на крыше помещения (рис. 5).



Рис. 5. Помещение для экспериментальной установки

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 посредством 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 $\pm 3\text{В}$ 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 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. Дифференциальный усилитель обеспечивает ~100-кратное усиление полезного сигнала с одновременным подавлением синфазных помех, которые возникают на длинной линии связи. Коэффициент подавления синфазного сигнала усилителем данного типа составляет ~70 дБ. На выходе дифференциального усилителя формируются биполярные сигналы синусоидальной формы, принадлежащие к акустическому диапазону ($\sim 10^2$ – 10^4 Гц) и готовые для оцифровки посредством системы АЦП. Построенный на операционных усилителях селектор низких частот служит для выделения модулирующей амплитуды акустического сигнала низкочастотной огибающей, которая выдается для регистрации по отдельному каналу АЦП.

Для регистрации сигналов акустического детектора была разработана специальная малогабаритная система АЦП с малым энергопотреблением, которая размещается вместе со схемами формирования непосредственно у верхнего края скважины. Основу системы АЦП образует одноплатный компьютер Raspberry Pi B+ на микропроцессоре типа Broadcom BCM2835 с тактовой частотой 700 МГц. Этот компьютер, через посредство линий встроенного в него цифрового порта ввода-вывода общего назначения, управляет двумя элементами АЦП микросхемами типа AD7887 производства Analog Devices [14–16].

Установка для мониторинга геоакустических сигналов, коррелированных по времени с потоком высокоэнергичных мюонов космических лучей, рожденных в широких атмосферных ливнях, функционирующая 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, представляет собой уникальный экспериментальный полигон для набора статистического материала о влиянии потока мюонов космических лучей на сейсмоактивную среду. В итоге это не только позволит расширить фундаментальные знания в области геокосмических связей, но и решить прикладную задачу – разработать новый космогеофизический метод прогноза сильных землетрясений в регионе.

Список литературы

1. *Hardy H. R.* Acoustic emission. Microseismic activity, Vol. 1: Principles, techniques and geotechnical applications. London: Taylor & Francis, 2003, 300 p.

2. *Ohtsu M., Ono K.* A generalized theory of acoustic emission and Green's function in a half space // *J. Acoustic Emission*. 1984. N. 3. P. 27–40.
3. *Ono K.* Current understanding of mechanisms of acoustic emission // *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2005. V. 40. N. 1. P. 1–15.
4. *Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., Куницын А. В., Ларионов И. А., Марапулец Ю. В., Рутенко А. Н., Шевцов Б. М.* Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // *Доклады Академии наук*. 2006. Т. 407. С. 669–672.
5. *Brune J. N., Oliver J.* The seismic noise of the Earth's surface // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1959. V.49. N. 4. P. 349–353.
6. *Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В.* Анализ спектров огибающей высокочастотных микросейсм после Аляскинского и Мексиканского землетрясений в марте 1979 г. // *Докл. АН СССР*. 1980. Т. 252. № 4. С. 836–838.
7. *Царев В. А.* О геофизических приложениях нейтринных пучков // *УФН*. 1985. Т. 147. № 10. С. 426–427.
8. *Царев В. А., Чечин В. А.* Атмосферные мюоны и высокочастотные сейсмические шумы. Препринт ФИАН. 1988. № 179, 21 с.
9. *Салеев В. А., Царев В. А., Чечин В. А.* Термоакустический сигнал от пучка «прямых» нейтрино // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 1984. № 5. С. 30.
10. *Гусев Г. А., Жуков В. В., Мерзон Г. И., Митько Г. Г., Степанов А. С., Рябов В. А., Чечин В. А., Чубенко А. П., Щепетов А. Л.* Космические лучи как новый инструмент сейсмологических исследований // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2011. №12. С. 43.
11. *Вильданова Л. И., Гусев Г. А., Жуков В. В., Мерзон Г. И., Митько Г. Г., Наумов А. С., Рябов В. А., Степанов А. В., Чечин В. А., Чубенко А. П., Щепетов А. Л.* Первые результаты наблюдения акустических сигналов, генерируемых мюонами космических лучей в сейсмически-напряженной среде // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2013. № 3. С. 31.
12. *Искаков Б. А., Аргынова А. Х., Аргынова К. А., Бейсенова А., Застрожнова Н. Н., Пискаль В. В., Салихов Н. М., Тастанова К., Тавтаев Е. М., Хабаргельдина М.* Использование проникающей способности космических мюонов для прогноза землетрясений // *Вестник НЯЦ*. 2019. Т. 4. № 80. С. 23–27.
13. *Mukashev K. M., Vildanova L. I., Sadykov T. Kh., Shepetov A. L., Salikhov N. M., Muradov A. D., Zhukov V. V., Argynova A. Kh.* Seismic signal registration with an acoustic detector at the Tien Shan mountain station // *News of the NAS RK. Series of Geology and Technical Sciences*. 2019. V. 3. N. 429. P. 47–56.
14. *Iskakov B. A., Tautayev Y. M., Sadykov T. Kh., Shepetov A. L., Salikhov N. M.* The development and creation of a software system for the monitor-

- ing system MAC1 // *International Journal of Mathematics and Physics*. 2019. V. 10. N. 1. P. 107–111
15. Mukashev K. M., Sadykov T. Kh., Ryabov V. A., Shepetov A. L., Khachikyan G. Ya., Salikhov N. M., Muradov A. D., Novolodskaya O. A., Zhukov V. V., Argynova A. Kh. Investigation of acoustic signals correlated with the flow of muons of cosmic rays, in connection with seismic activity of the north Tien Shan // *Acta Geophysica*. 2019. V. 64. P. 1241–1251.
 16. Zhukov V. V., Idrisova T. K., Mukashev K. M., Muradov A. D., Sadykov T. Kh., Sadyev N. O., Umarov F. F., Shepetov A. L. Acoustic signal associated with the passage of penetrating cosmic radiation through a seismically stressed environment // *Resent Contributions to Physics*. 2020. V. 74. N. 3. P. 75–83.
- ### References
1. Hardy H. R. *Acoustic emission. Microseismic activity*, Vol. 1: Principles, techniques and geotechnical applications. London: Taylor & Francis, 2003, 300 p.
 2. Ohtsu M., Ono K. A generalized theory of acoustic emission and Green's function in a half space. *J. Acoustic Emission*, 1984, no. 3, pp. 27–40.
 3. Ono K. Current understanding of mechanisms of acoustic emission. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 1–15.
 4. Gordienko V. A., Gordienko T. V., Kuptsov A. V., Larionov I. A., Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M., Rutenko A. N. Geoacoustic location of earthquake preparation areas. *Doklady Earth Sciences*, 2006, vol. 407, no. 3, pp. 474–477.
 5. Brune J. N., Oliver J. The seismic noise of the Earth's surface. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1959, vol. 49, no. 4, pp. 349–353.
 6. Rykunov L. N., Khavroshkin O. B., Tsyplakov V. V. Spectra of high-frequency microseism envelope after the Alaskan and Mexican earthquakes of March 1979. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1980, vol. 252, no. 4, pp. 836–838 (In Russian).
 7. Tsarev V. A. Geophysical applications of neutrino beams. *Sov. Phys. Usp.* 1985, vol. 28, no. 10, pp. 940.
 8. Tsarev V. A., Chechin V. A. Atmospheric muons and high-frequency seismic noise. *LPI preprints*, 1988, N. 179, 21 p. (In Russian).
 9. Saleev V. A., Tsarev V. A., Chechin V. A. Thermoacoustic signal from “direct” neutrino beam. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 1984, no. 5, p. 30 (In Russian).
 10. Gusev G. A., Zhukov V. V., Merzon G. I., Mit'ko G. G., Stepanov A. S., Ryabov V. A., Chechin V. A., Chubenko A. P., Shchepetov A. L. Cosmic rays as a new instrument of seismological studies. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2011, no. 12, pp. 374–379.
 11. Vil'danova L. I., Gusev G. A., Zhukov V. V., Merzon G. I., Mit'ko G. G., Naumov A. S., Ryabov V. A., Stepanov A. V., Chechin V. A., Chubenko A. P., Shchepetov A. L. The first results of observations of acoustic signals generated by cosmic ray muons in a seismically stressed medium. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2013, no. 3, pp. 74–79.
 12. Iskakov B. A., Argynova A. Kh., Argynova K. A., Beisenova A., Zastrozhnova N. N., Piskal V. V., Salikhov N. M., Tastanova K., Tautayev E. M., Khabargeldina M. Using the penetrating ability of cosmic muons for the earthquake prediction. *NNC RK Bulletin*, 2019, vol. 4, no. 80, pp. 23–27 (In Russian).
 13. Mukashev K. M., Vildanova L. I., Sadykov T. Kh., Shepetov A. L., Salikhov N. M., Muradov A. D., Zhukov V. V., Argynova A. Kh. Seismic signal registration with an acoustic detector at the Tien Shan mountain station. *News of the NAS RK. Ser. of Geology and Technical*, 2019, vol. 3, no. 429, pp. 47–56.
 14. Iskakov B. A., Tautayev Y. M., Sadykov T. Kh., Shepetov A. L., Salikhov N. M. The development and creation of a software system for the monitoring system MAC1. *International Journal of Mathematics and Physics*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 107–111
 15. Mukashev K. M., Sadykov T. Kh., Ryabov V. A., Shepetov A. L., Khachikyan G. Ya., Salikhov N. M., Muradov A. D., Novolodskaya O. A., Zhukov V. V., Argynova A. Kh. Investigation of acoustic signals correlated with the flow of muons of cosmic rays, in connection with seismic activity of the north Tien Shan. *Acta Geophysica*, 2019, vol. 64, pp. 1241–1251.
 16. Zhukov V. V., Idrisova T. K., Mukashev K. M., Muradov A. D., Sadykov T. Kh., Sadyev N. O., Umarov F. F., Shepetov A. L. Acoustic signal associated with the passage of penetrating cosmic radiation through a seismically stressed environment. *Resent Contributions to Physics*, 2020, vol. 74, no. 3, pp. 75–83.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Исаков Б. А., Безноско Д., Жуков В. В., Садыков Т. Х., Салихов Н. М., Таутаев Е. М., Щепетов А. Л. Геоакустическая эмиссия при прохождении через земную кору высокоэнергетических мюонов космического происхождения // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2021. № 1. С. 05–11. doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-05-11

Please cite this article in English as:

Iskakov B. A., Besnosko D., Zhukov V. V., Sadykov T. Kh., Salikhov N. M., Tautayev Y. M., Shepetov A. L. Geoacoustic emission during the passage through the Earth's crust of high-energy cosmic ray muons. Bulletin of Perm University. Physics. 2021, No. 1, pp. 05–11. doi: 10.17072/1994-3598-2021-1-05-11

Сведения об авторах

1. *Бахтияр Абуталипович Искаков*, научный сотрудник, ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, г. Алматы, Республика Казахстан, 050032
2. *Дмитрий Безноско*, PhD, наставник, Гарвардский Университет, 1 Oxford str., Cambridge, USA, MA 02138
3. *Виталий Валерьевич Жуков*, канд. физ.-мат. наук, директор, Тянь-Шаньская Высокогорная научная станция, ул. Митина, д. 3, г. Алматы, Республика Казахстан, 050020
4. *Турлан Хамзинович Садыков*, д-р. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, г. Алматы, Республика Казахстан, 050032
5. *Назиф Мунипович Салихов*, канд. физ.-мат. наук., ДТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», д. 117, г. Алматы, Республика Казахстан, 050020
6. *Ернар Мадуарович Таутаев*, научный сотрудник, ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, г. Алматы, Республика Казахстан, 050032
7. *Александр Леонидович Щепетов*, д-р. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, ФИАН имени А.П. Лебедева, Ленинский проспект, д.53, г. Москва, Российская Федерация, 119991

Author information

1. *Bakhtiyar Abutalipovich Iskakov*, Researcher, Institute of Physics and Technology, Ibragimov str. 11, 050032, Almaty, Republic of Kazakhstan
2. *Dmitry Beznosko*, PhD, Preceptor, Harvard University, 1 Oxford str., Cambridge, MA 02138, USA
3. *Vitaly Valerievich Zhukov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Station Director, Tien Shan High-Mountain Scientific Station, Mitin str. 3, 050020, Almaty, Republic of Kazakhstan
4. *Turlan Khamzinovich Sadykov*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory, Institute of Physics and Technology, Ibragimov str. 11, 050032, Almaty, Republic of Kazakhstan
5. *Nazif Munipovich Salikhov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of the Ionosphere, 050020, Almaty, Republic of Kazakhstan
6. *Ernar Maduarovich Tautayev*, Researcher, Institute of Physics and Technology, Ibragimov str. 11, 050032, Almaty, Republic of Kazakhstan
7. *Alexander Leonidovich Shchepetov*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, A.P. Lebedev Institute of Physics of RAS, Leninskii av. 53, 119991, Moscow, Russian Federation