

**В.В. Жуков¹, Т.К. Идрисова², К.М. Мукашев^{3*}, А.Д. Мурадов³,
Т.Х. Садыков², Н.О. Садуев³, Ф.Ф. Умаров⁴, А.Л. Шепетов⁵**

¹Тянь-Шаньская высокогорная научная станция космических лучей, Казахстан, г. Алматы

²КазНИТУ им. Сатпаева К.И., Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы

³НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы,

⁴Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

⁵Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Россия, г. Москва

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОХОЖДЕНИЕМ ПРОНИКАЮЩЕГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ СЕЙСМИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННУЮ СРЕДУ

Обнаружены спорадические акустические сигналы, предположительно связанные с процессами сейсмической активности в районе разрушения глубокой земной коры. Была обнаружена статистически значимая временная корреляция между такими сигналами и моментами прохождения мюонов космических лучей высоких энергий. Это обстоятельство подтверждает предположение о возможном триггерном эффекте малой ионизации, создаваемой проникающими частицами глубоко под землей, что может вызвать высвобождение энергии упругой деформации, накопленной на краях сейсмического разлома. В случае подтверждения данный эффект может представлять значительный научный и практический интерес при решении проблем прогноза землетрясения. Такие сложные эксперименты можно провести на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции. Станция расположена на высоте 3340 м над уровнем моря близ г. Алматы в сейсмически активном регионе. Станция оснащена широкой сетью детекторов для регистрации широких атмосферных ливней космических излучений. Эти ливни являются источником мюонов высокой энергии. Сеть состоит из 72 сцинтилляционных детекторов и занимает площадь 1000 м². Для обнаружения и регистрация акустических сигналов используется специальный микрофонный датчик высокой чувствительности. Датчик размещается в скважине на глубине 50 м не далеко от оси широких атмосферных ливней. О прохождении мюонной компоненты космических лучей еще можно судить по отклику детекторов нейтронов. Эти детекторы размещены под землей на глубине 20 м водного эквивалента. Была обнаружена статистически значимая корреляция между моментами прохождения мюонов космических лучей высокой энергии и последующим появлением акустических событий.

Ключевые слова: мюоны космических лучей, широкие атмосферные ливни, сейсмология, прогноз землетрясений.

V.V. Zhukov¹, T.K. Idrisova², K.M. Mukashev^{3*}, A.D. Muradov³,
T.Kh. Sadykov², N.O. Saduyev³, F.F. Umarov⁴, A.L. Shepetov⁵

¹Tien Shan high-alpinee scientific station of cosmic rays, Kazakhstan, Almaty

²Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty

³IETP Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty,

⁴Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty

⁵Lebedev P.N. Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI), Russia, Moscow

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Acoustic signals associated with the passage of penetrating cosmic radiation through a seismically stressed environment

We detected the sporadic acoustic pulses presumably connected with the processes of seismic activity in the region of a deep earth's crust fracture near Almaty city. It was found a statistically significant time correlation between such pulses and the passage moments of high energy cosmic ray muons. This observation is in favor of a theoretic supposition about possible trigger effect of small ionization created by penetrative particles deep underground which may provoke releasing the energy of elastic deformation accumulated at the edges of a seismic fault. If confirmed, this effect could be of interest for the earthquake forecast problem. Such complex experiments can be carried out at the Tien Shan high-mountain scientific station. The station is located at an altitude of 3340m above sea level near the city of Almaty in

a seismically active region. The station is equipped with a wide network of detectors to register extensive air showers of cosmic radiation. These showers are the source of high energy muons. The network consists of 72 scintillation detectors and covers an area of 1000 m². A special high-sensitivity microphone sensor is used to detect and register acoustic signals. The sensor is placed in a borehole at a depth of 50 m, not far from the axis of extensive air showers. The passage of the muon component of cosmic rays can still be judged by the response of neutron detectors. These detectors are located underground at a depth of 20 m water equivalent. A statistically significant correlation was found between the times of passage of high-energy cosmic ray muons and the subsequent appearance of acoustic events.

Key words: cosmic rays muons, extensive air shower, seismology, earthquake forecast.

В.В. Жуков¹, Т.К. Идрисова², Қ.М. Мұқашев^{3*}, А.Д. Мұрадов³,
Т.Х. Садықов², Н.О. Садуев³, Ф.Ф. Умаров⁴, А.Л. Шепетов⁵

¹Тянь-Шань таулы ғарыш сәулесінің ғылыми станциясы, Қазақстан, Алматы қ.

²Қ.И. Сәтбаев атындағы ҰҒЗТУ, Физика-техникалық институты, Қазақстан, Алматы қ.

³ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,

⁴Қазақ-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

⁵П.Н. Лебедев атындағы Физика институты, РФА, Ресей, Москва қ.

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com.

Сейсмикалық белсенді жер қыртысы арқылы өтімділігі жоғары ғарыш нұрының өтуіне байланысты туындайтын акустикалық сигналдар

Терең кеңістікте орналасқан жер қыртысының сейсмикалық құбылыстарға байланысты бүлінуі кезінде дербес түрдегі дараланған акустикалық сигналдардың пайда болатыны көрсетілген. Табиғаты осы тектес сигналдармен қосарласа туындаған ғарыш сәулесінің энергиясы жоғары мюондары арасында уақытқа байланысты айтарлықтай статистикалық мағынасы бар корреляцияның қалыптасатыны белгілі болды. Бұл жағдай өтімділігі жоғары мюон бөлшектерінің жер асты тереңдігінде әлсіз ионизация арқылы триггерлік әсерді туғызуы туралы болжамды дәлелдеуінің куәсі болса керек. Нәтижесінде сейсмикалық белсенділігі жоғары жер қыртысының бүлінуімен қатар, оның айналасында қорланған серпімді энергияның босануына, сол арқылы дербес акустикалық сигналдың таралуына мүмкіндік туады. Егер бұл құбылыстар нақты эксперименттермен толық дәлелденетін болса, оның нәтижелері жер сілкінісі туралы болжамдық мағынадағы пікірлерді шешу жолындағы маңызды және құнды еңбектер қатарына қосылатыны сөсіз. Мұндай күрделі экспериментті Тянь-Шань биік таулы ғылыми станциясында орындауға болады. Станция теңіз деңгейінен 3400 м биіктікте, сейсмикалық белсенді ауданда орналасқан. Станция кең ауқымды атмосфералық нөсерді тіркеу үшін арнайы құрылған детекторлар жүйесімен жабдықталған. Жүйе 72 сцинтилляциялық детектордан тұрады және 1000 м² ауданды қамтиды. Атмосфералық нөсер энергиясы жоғары мюондар көзі болып табылады. Акустикалық сигналдарды анықтап, қатесіз тіркеу үшін айрықша сезімтал микрофонды датчик қолданылады. Датчик атмосфералық нөсердің осі өтетін жерге жақын, тереңдігі 50 м скважинаға орналастырылған. Сонымен қатар, ғарыш сәулесінің мюондық құраушысы туралы ақпарат арнайы құрылған жер асты нейтрондар детекторларының көмегімен өндіріледі. Нәтижесінде үздіксіз 6800 сағат уақытқа созылған эксперимент нәтижесінде ғарыш сәулесінің мюондық құраушысы мен акустикалық сигналдардың арасындағы корреляцияның бар екендігі анықталды.

Түйін сөздер: ғарыш сәулесінің мюондары, ауқымды атмосфералық нөсер, сейсмология, жер сілкінісі туралы болжам.

Введение

Известно, что значительная энергия упругой деформации на краях сейсмического разлома, возникающая из-за их взаимного смещения, может дать начало микротрещинам, сопровождающимся генерацией упругих колебаний в литосферной среде. Эти вибрации распространяются через земную кору в форме звуковой волны, называемой акустической эмиссией, которые в принципе могут быть обнаружены с помощью чувствительных микрофонных датчиков, рас-

положенных вблизи земной поверхности [1-3]. Регулярный мониторинг интенсивности этих сигналов может быть полезным для установления текущих состояний на глубине литосферы в реальном времени и для оперативного прогнозирования землетрясений [4,5]. Любое выделение значительной энергии деформации, накопленной в области сейсмического разлома, вместе с последующим образованием микротрещин может быть спровоцировано извне довольно небольшим триггерным эффектом. В теоретических исследованиях, ранее проведен-

ных в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) [6,7], утверждалось, что ионизация, создаваемая в литосфере взаимодействием проникающих элементарных частиц, вполне достаточна для того, чтобы играть роль такого триггерного эффекта. Соответственно, в работе [8] было предложено реальный метод решения этой проблемы, основанный на использовании мюонов высокой энергии, способных достигать глубоких подземных областей и взаимодействовать с веществом литосферы на глубине порядка нескольких километров.

Подходящим местом для экспериментальной проверки этой гипотезы является Тянь-Шаньская высокогорная станция космических излучений ФИАН, которая расположена в сейсмически активном регионе, чуть выше древнего разлома земной коры. В свое время в работе [9] сообщалось о некоторых предварительных результатах эксперимента на Тянь-Шане по поиску задержанных коротких временных сигналов акустической эмиссии после прохождения моментов энергичных мюонов космических лучей. В настоящее время на станции действует широкая сеть детекторов, позволяющая обнаруживать и регистрировать широкие атмосферные ливни (ШАЛ), которые могут быть источником энергетических мюонов, и довольно точно определять параметры этих ШАЛ – их размер, первичную энергию, местоположение оси и т.д. Для обнаружения сигналов акустической эмиссии можно использовать специальный датчик, который построен на основе высокочувствительного микрофона и установлен в непосредственной близости от центра ливневой установки, в 50 м под землей в пробуренной скважине на территории станции Тянь-Шань. Следовательно, можно провести статистический временной корреляционный анализ между событиями ШАЛ и любыми акустическими сигналами сейсмического происхождения, чтобы прояснить вопрос о предполагаемой связи между ними. Предметом настоящей публикации являются результаты такого корреляционного анализа, выполненного по данным 6800-часового эксперимента по одновременному обнаружению ШАЛ и акустического сигнала, который проводился на станции Тянь-Шань в 2017–2019 годах.

Экспериментальное обеспечение исследований

В эксперименте в Тянь-Шане широкие атмосферные ливни регистрируются системой из

72 сцинтилляционных детекторов заряженных частиц, которые расположены почти на равном расстоянии на площади 1000 м² и называются «ковер-детектор». События ШАЛ обнаруживаются с помощью специальной схемы дискриминатора, которая вырабатывает управляющий импульс – триггер ливня в моменты, когда амплитуда сцинтилляции, суммируемая по всем детекторам ковра, превышает предварительно установленное некоторое пороговое значение. При текущих настройках эта система генерирует около 3–5 триггеров в минуту, что соответствует эффективному выбору всех ШАЛ с первичной энергией выше 10¹⁵ эВ, оси которого падали на детектор. Каждое событие триггерного эффекта, включенное в банк данных станции Тянь-Шаня, сопровождается его точной отметкой во времени. Любое сравнение данных событий ШАЛ с наборами данных других экспериментальных установок производится на основе этих временных меток.

Основные параметры ШАЛ – две координаты (x ; y) местоположения оси ливня и общее количество заряженных частиц в ливне (его размер N_0) определяются поперечным распределением экспериментально измеренной плотности частиц по плоскости детекторов ковра. Эта оценка производится путем аппроксимации экспериментального двумерного (x ; y) распределения набором теоретических функций, принадлежащих семейству Нисимура-Камата-Грайзен (НКГ) [10]. Согласно оценкам, выполненным во время экспериментов на станции Тянь-Шаня, вышеупомянутый энергетический порог в 10¹⁵ эВ соответствует минимальному значению размера ШАЛ [11,12]. Как правило, в каждом таком ливне присутствуют некоторые мюоны с энергией выше 0,1–1 ТэВ, которые способны проникать в земную кору на глубину порядка километра. При дальнейшем увеличении первичной энергии общее количество высокоэнергетических мюонов в ШАЛ растет почти пропорционально ε_0 [13, 14].

Помимо использования данных ШАЛ, на станции Тянь-Шань имеется еще один источник информации о мюонной компоненте космических лучей. Нахождение мюонов высоких энергий может свидетельствовать наблюдение событий множественного рождения нейтронов в подземном детекторе нейтронов станции Тянь-Шань. Этот детектор находится в подземной комнате, прямо под ковриком детектора ШАЛ, под слоем поглотителя породы толщиной 2000г/см² [10].

Процесс образования нейтронов в подземном детекторе подробно рассмотрен в работе [15], где было показано, что такие события в основном происходят из-за взаимодействия мюонов высокой энергии ($>5\text{ГэВ}$) во внутреннем материале подземного детектора. Это может быть либо прямое ядерное взаимодействие мюонов, либо процесс тормозного излучения с дальнейшим образованием нейтронов путем фотоядерной реакции жестких гамма-квантов. В любом случае нейтроны испарения, возникающие в результате таких процессов, могут регистрироваться газоразрядными нейтронно-чувствительными счетчиками, которые являются частью подземного детектора. Общее количество электрических импульсных сигналов, полученные от этих счетчиков в течение некоторого ограниченного промежутка времени после первичного мюонного взаимодействия, могут быть мерой как кратности, так и энергии проходящих мюонов. Продолжительность периода накопления импульсов, необходимого для этой цели, ограничена сверху временем жизни нейтрона во внутреннем объеме детектора, а для подземного детектора станции Тянь-Шань она составляет порядка нескольких миллисекунд [10]. Как и в случае с ШАЛ, информация о каждом обнаруженном событии нейтронной генерации в подземном детекторе сохраняется в специальной таблице базы данных, сопровождаемой точной отметкой времени для сравнения с другими данными.

Следующий комплекс данных, крайне важный в данном случае, был получен в измере-

ниях с помощью акустического датчика высокогорной научной станции Тянь-Шаня. Этот детектор состоит из высокочувствительного микрофонного блока и последующей специализированной электроники, которая необходима для усиления, формирования и записи выходного микрофонного сигнала. Микрофон с чувствительностью 20 мВ/Па в диапазоне частот $0,5\text{--}10\text{ кГц}$ установлен на глубине 50 м ниже поверхности земли, в скважине глубиной 300 м . Расстояние между центром этой скважины и центром детекторной системы ШАЛ составляет около 250 м . В работах [16, 17] можно найти более подробное описание акустического детектора Тянь-Шаня, а также схему электроники, которая применялась для обработки его выходного сигнала.

Акустические события и их статистика

Как выяснилось, в целом записи мониторинга сигнала акустического детектора имеют довольно равномерный характер с небольшими случайными колебаниями вокруг среднего уровня. Тем не менее, иногда кратковременные всплески интенсивности сигнала происходят спорадически и накладываются на это регулярное поведение. Как правило, длительность этих возмущений составляет порядка нескольких долей секунды, а их пиковая интенсивность превышает на порядок значения стандартного отклонения обычных колебаний. Пример такой формы сигнала показан на левом графике рис. 1.

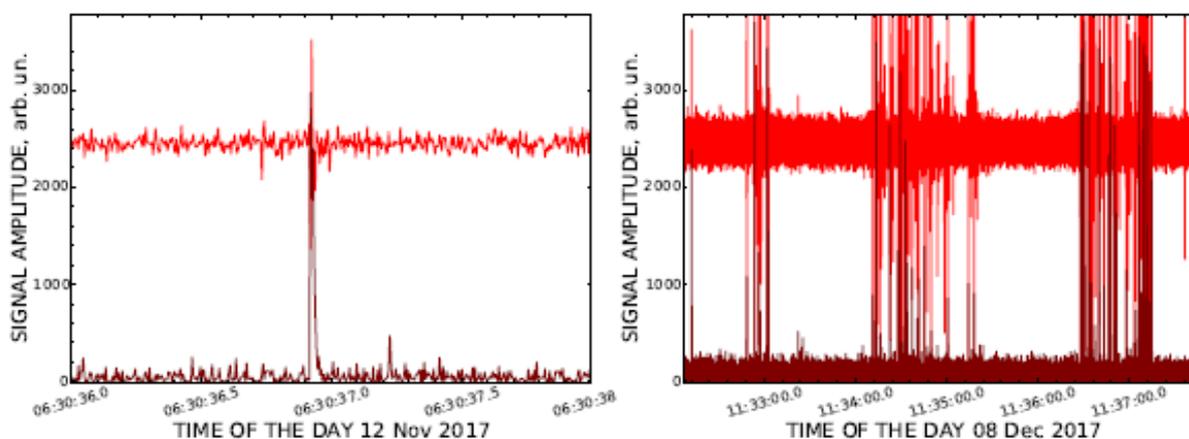


Рисунок 1 – Слева: типичное спорадическое нарушение в регулярной форме волны сигнала акустического детектора («акустическое событие»). Справа: период множественных нарушений, выявленных в течение дня с высокой сейсмической активностью. Верхние кривые на графиках представляют прямой микрофонный сигнал, нижние – его интегральную низкочастотную огибающую.

Как правило, между моментами таких интенсивных всплесков не было выявлено никакой закономерности, поэтому частота их наблюдения может варьироваться от нуля до нескольких сотен событий в день без какой-либо очевидной закономерности. Также не было выявлено какой-либо корреляции между этими всплесками и метеорологическими явлениями, электромагнитными помехами, человеческой активностью и т. д. Из-за их краткости, высокой амплитуды и временной нерегулярности в сочетании, тем не менее, с постоянным внешним фактором в течение двухлетнего непрерывного периода наблюдения, можно предположить, что обнаруженные всплески амплитуды сигнала микрофона действительно могут быть видимым проявлением акустических импульсов сейсмического происхождения, которые были получены на основании выше упомянутого теоретического предположения. В дальнейшем такие амплитудные всплески будут обозначаться как «акустические события».

Для численного анализа свойств их статистики было принято следующее формальное правило во время данного исследования: акустическое событие – это любой случай, когда 12-разрядный код аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сглаженной низкочастотной огибающей микрофонного сигнала на мгновение превысит минимальный порог в $\times 700$. Как видно на рис. 1, событие, представленное на его левом графике, вполне удовлетворяет этому критерию. Для выяснения природы акустических событий может быть полезно рассмотреть статистику их ча-

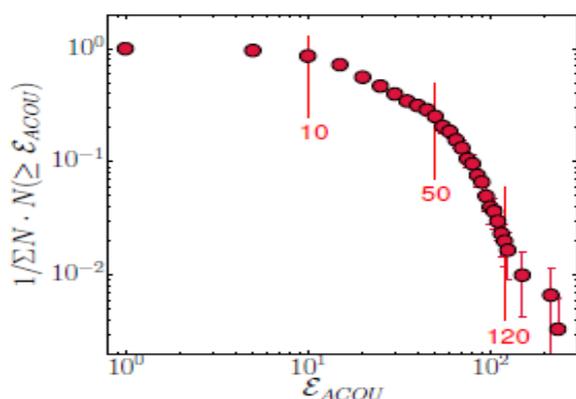


Рисунок 2 – Интегральное распределение ежедневных счетных чисел $\varepsilon_{ACOУ}$ событий. Распределение нормируется на общее число ΣN всех обнаруженных событий

стоты появления. Интегральное распределение ежедневных количественных показателей таких событий $\varepsilon_{ACOУ}$ представлено на рис. 2. Как правило, это распределение имеет вид мощности, но испытывает изменение своего показателя мощности около некоторого граничного значения $\varepsilon_{ACOУ} = 10, 50$ и 100 . Предположительно, эти изменения могут отражать некоторое различие в лежащих в основе специфики модели генерации акустических событий. В качестве другой иллюстрации такого различия в ежедневных частотах акустических событий можно провести сравнение между двумя кадрами на рис. 1: левый график с одним событием, видимым в течение всего дня ($\varepsilon_{ACOУ} = 1$), и тем, что справа с некоторыми сериями импульсов, обнаруженными через короткие промежутки времени в течение дня при чрезвычайно высоком значении $\varepsilon_{ACOУ}$.

Два распределения значений пиковой амплитуды, которые были обнаружены в низкочастотном канале во время акустических событий, представлены на рис. 3 отдельно для данных с низким ($\varepsilon_{ACOУ} < 10$) и высоким ($\varepsilon_{ACOУ} > 50$) количеством ежедневных событий. (Амплитуда сигнала тут выражается в кодах А системы АЦП регистрации данных акустического датчика). Из рис. 3 видно, что оба распределения амплитуд пиков имеют сходную, почти экспоненциальную форму, но отличаются друг от друга на порядок по абсолютной интенсивности. Это отличие может быть связано, опять же, с некоторым различием в происхождении событий, которые были обнаружены в течение периодов времени с различной множественностью акустических событий.

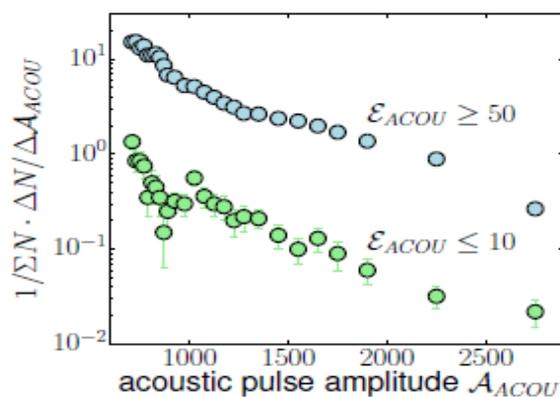


Рисунок 3 – Распределение амплитуд акустических событий, обнаруженных в дни с малыми ($\varepsilon_{ACOУ} < 10$) и большими ($\varepsilon_{ACOУ} > 50$) числами отсчета событий. Распределения нормированы на сумму событий ΣN в каждой группе

Распределение временной задержки между ШАЛ и акустическими событиями

Исходя из предположения о сейсмическом происхождении акустических событий и их связи с выделением энергии упругой деформации при спусковом воздействии проникающих мюонов в глубокой области сейсмического разлома, логично искать некоторую временную корреляцию между моментами прохождения мюонов и временем прихода акустического сигнала. Известно, что высокоэнергетические мюоны, в том числе обладающие энергией выше $(0,1-1)$ ТэВ и способные проникать в глубину порядка нескольких километров в литосфере, присутствуют в центральной области мощного ШАЛ. Следовательно, момент их прохождения может быть строго зарегистрирован с помощью триггера ШАЛ, установленного на Тянь-Шаньской установке ливневых детекторов. Любая другая информация, полученная из этой установки, в первую очередь о размере ε_0 соответствующего ливня, также может быть полезна для предполагаемого анализа. На практике последнее можно свести к исследованию распределения значений задержки $T = t_{ACOU} - t_{ш\text{ал}}$ между временными моментами акустических событий t_{ACOU} и моментами $t_{ш\text{ал}}$ всех предшествующих ливней с достаточно большой первичной энергией ε_0 . Фактически, в таком исследовании нам приходится иметь дело с двумя последовательностями по существу случайных явлений, и члены обоих явлений могут иметь или не иметь никакой причинно-следственной связи друг с другом. Следовательно, возникает проблема устранения влияния случайных совпадений между моментами времени полностью независимых событий от ожидаемого полезного эффекта. Для этого при работе с экспериментальными данными были применены следующие правила.

В рассмотрение были включены только те события ШАЛ, которые имели достаточно большую первичную энергию $\varepsilon_0 > 10^{15}$ эВ, оси которых проходили на расстоянии до 150 м от скважины с установленным акустическим датчиком. Интегральная интенсивность таких ШАЛ составляет около $\sim (20-30)\text{ч}^{-1}$, и каждый из них имел, по крайней мере, несколько высокоэнергетических мюонов в своей центральной области. Это условие позволяет исключить множество низкоэнергетических ливней, которые, безусловно, неэффективны с точки зрения влияния триггера на глубине литосферы, но дают большое количество случайных совпадений в любом статистическом распределении. Данное фор-

мальное правило, касающееся минимального кода амплитуды отбора акустических событий $A > 700$, также было принято с учетом необходимости подавления случайного фона.

Кроме того, все периоды времени, когда средняя скорость ветра на территории станции Тянь-Шань превышала предел 11 м/с., были исключены из процесса анализа. Это есть условие фильтрации помех по ветреным дням, когда в записях сигналов акустического детектора были возможны помехи из-за шума со стороны верхней части отверстия скважины. Относительная доля измерений, отклоненных по этой причине, составляет около 5% от общего рабочего времени экспериментальной установки. Распределение временной задержки, которое было определено по исходному экспериментальному временному ряду, можно сравнить с довольно аналогичным распределением, построенным для набора пар меток времени, выбранных для моментов, которые, конечно, не могут иметь какой-либо причинной взаимосвязи с друг с другом. При таком сравнении полезно иметь в виду существенное различие, рассмотренное выше, между периодами различных суточных чисел ε_{ACOU} акустических событий. Соответственно, распределения T и T^* задержки, представленные на рис. 4 и рис. 5, были построены отдельно для дней с $\varepsilon_{ACOU} < 10$, $10 < \varepsilon_{ACOU} < 50$ и $\varepsilon_{ACOU} > 50$.

Как видно на рис. 4, в «тихие» периоды с небольшим ежедневным количеством акустических событий распределения временной задержки значений T и T^* практически накладываются друг на друга, поэтому разница между ними остается в пределах $(1-1.5) \sigma$ коридора во всем диапазоне оси абсцисс, начиная с нуля и до 0,5 ч. времени задержки. Отсутствие каких-либо заметных различий в построении распределений для экспериментальных и искусственно рандомизированных наборов данных означает совершенно случайный характер любых совпадений, которые могут быть обнаружены между ШАЛ и акустическими событиями в те дни.

Акустические события и мюонные данные подземного детектора

Как было изложено в разделе «Инструментарий», альтернативный метод обнаружения прохождения высокоэнергетических мюонов космических лучей в эксперименте на Тянь-Шане основан на данных подземного детектора нейтронов. При таком подходе в качестве маркера мюонов космических лучей можно использовать наблюдение «нейтронного со-

бытия» – нестационарной генерации множества нейтронов испарения внутри детектора.

Наиболее важным параметром нейтронного события является его кратность M – общее количество импульсных сигналов, обнаруженных счетчиками нейтронов подземного детектора. Для настоящего корреляционного анализа с акустическими данными были приняты только те

события, кратности которых были равны или превышали $M_{\min} = 10$. Как было показано в [15], такие события соответствуют прохождению мюонов с энергией 100 ТэВ, которые способны проникать на глубину (5–10) км в земную кору. Частота обнаружения таких событий на подземном детекторе станции Тянь-Шань составляет около (10–15) ч⁻¹.

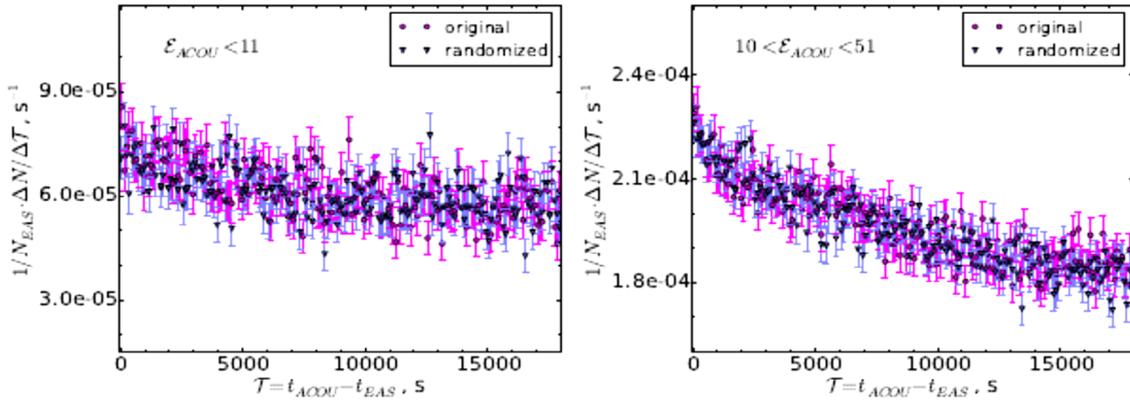


Рисунок 4 – Распределение задержки по времени между моментами мощного ШАЛ и последующими акустическими событиями, построенными по данным «тихих» периодов с ежедневными числами акустических событий $\varepsilon_{ACO} < 10$ (слева) и $10 < \varepsilon_{ACO} < 50$

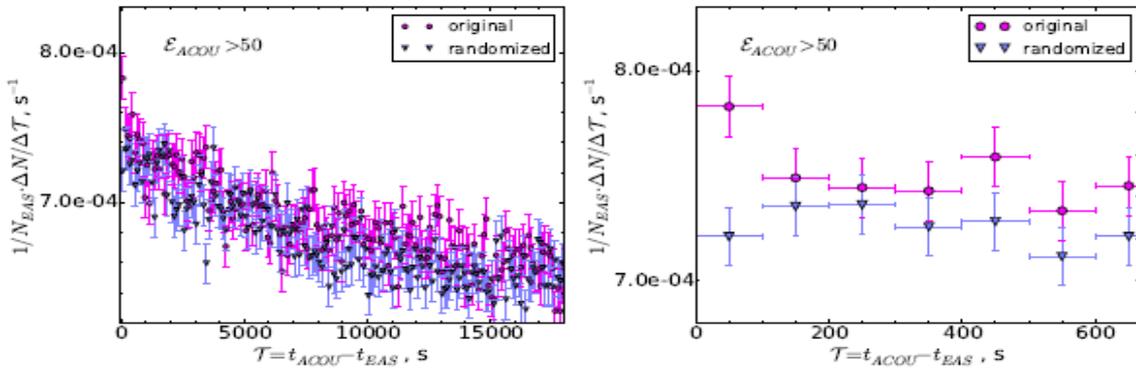


Рисунок 5 – Распределение временной задержки между ШАЛ и моментами акустических событий, построенными для данных с большим ежедневным количеством акустических событий $\varepsilon_{ACO} > 50$. На правом графике горизонтальная ось растянута вокруг своего начала. Обозначения такие же, как на рис. 4.

Процесс работы, основанный на подземных нейтронных событиях в роли маркера мюонного прохождения, был выполнен точно так же, как и в случае ШАЛ: значения разности во времени $T = t_{M>10} - t_{ACO}$ были рассчитаны между моментами акустического воздействия события и нейтронные события с кратностью $M > 10$. Затем было построено распределение задержек. Далее вся процедура повторялась для тех же наборов данных, но со всеми исходными моментами вре-

мени $t_{M>10}$ изменялись на совершенно случайные значения t .

На рис. 6 приведено сравнение распределений времени и задержки T и T^* , построенных соответственно для исходного и рандомизированного временных рядов подземных нейтронных событий. Поскольку события $M > 10$ под землей, как правило, являются довольно редким явлением, временной интервал столбцов гистограммы здесь был установлен равным 800 с

вместо 100-секундных интервалов, принятых в случае данных ШАЛ. Основываясь на предыдущем опыте, при выборе данных для этого графика были рассмотрены только даты с большим количеством ежедневных акустических событий $\varepsilon_{ACOU} > 50$. Как видно из рис. 6, в интервале времени задержки $T < 800$ с наблюдается статистически значимое превышение целочисленных значений экспериментально обнаруженного распределения задержки выше ожидаемого фоновое уровня случайных совпадений. Кроме того, систематическое превышение точек экспериментальных данных над рандомизированным распределением также заметно, хотя и с меньшей статистической достоверностью по всей продолжительности оси T от нуля до порядка нескольких часов времени. Оба этих факта могут рассматриваться как еще одно свидетельство существования какой-то нетривиальной связи между высокоэнергетическими мюонами космических лучей и кратковременными вспышками акустической эмиссии, обнаруженными под поверхностью Земли.

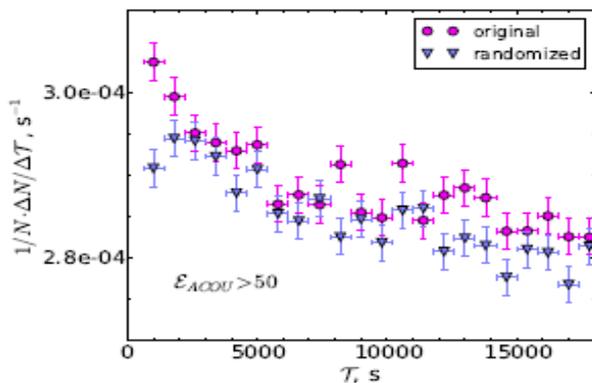


Рисунок 6 – Распределение временной задержки между прохождением энергетических мюонов, детектируемое событиями подземных нейтронов с $M > 10$, и последующими акустическими событиями. Были рассмотрены только дни с большим числом акустических событий $\varepsilon_{ACOU} > 50$. Распределение нормируется на количество N нейтронных событий, используемых анализом. Ширина одного временного интервала составляет 800 с.

Заключение

Все рассмотренные выше результаты настоящего исследования могут быть обобщены следующим образом:

На высокогорной станции Тянь-Шаня было заложено начало экспериментальным исследо-

ваниям с целью практического использования сигнала акустической эмиссии, предположительно связанного с процессами, происходящими в области глубокого сейсмического разлома.

Во время этого эксперимента короткие интенсивные вспышки, называемые «акустическими событиями», были обнаружены среди обычно однородных записей акустической эмиссии. Как правило, пиковая амплитуда, обнаруженная в этих событиях, на порядок выше среднего уровня дисперсии акустического сигнала, и их типичная длительность не превышает доли секунды.

Скорость счета акустических событий варьируется в широком диапазоне – от нуля до нескольких сотен событий в день. По-видимому, статистические свойства распределения событий, обнаруженных в дни с большим количеством ежедневных счетов ≥ 50 , существенно отличаются от свойств данных с низким счетом.

Была обнаружена статистически значимая корреляция между моментами прохождения мюонов космических лучей высокой энергии (≥ 100 ТэВ) и последующим появлением акустических событий в течение времени задержки (100–1000 с). Такая корреляция проявляется в основном только в дни с высокой скоростью счета акустических событий.

Поскольку мюоны указанной энергии способны проникать непосредственно вблизи глубокого сейсмического разлома, расположенного под горной станцией Тянь-Шаня, обнаруженная временная корреляция может быть экспериментальным подтверждением теоретического предположения о стимуляции акустической эмиссии в сейсмически активной области под небольшим триггерным влиянием частиц космического излучения. Если эта гипотеза будет подтверждена дальнейшими исследованиями, систематическое изучение таких корреляций может стать перспективным инструментом для оперативного мониторинга текущих условий в зоне сейсмического разлома, включая проблему прогноза землетрясения. Подходящим местом для развития такой экспериментальной деятельности является высокогорная станция Тянь-Шаня, благодаря существующему в настоящее время многоцелевому детекторному комплексу.

Благодарность

Данная работа выполнена при поддержке МОН РК по программно-целевому финансированию BR05236497.

Литература

- 1 Chavroshkin O.B., Nikolaev A.V., Rykunov L.N., and Tsyplakov V.V. Methods, results and perspectives of the high frequency seismic noise and vibrosignals //In 6th Rep IASPEL Comm. Microseismol. 18 IUGG, Hamburg, Germany, 1983.
- 2 Paparo G., Gregori G.P., De Ritis R., and Taloni A. Acoustic emission (AE) as a diagnostic tool in geo-physics //Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 45(2). – P.401–416.
- 3 Lei X. and Ma S. Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process. //Earthq. Sci. – 2014. – Vol.27. – P.627-646.
- 4 Jasperson H., Bolton C., Johnson P., et al. Unsupervised classification of acoustic emissions from catalogs and fault time-to-failure prediction. //arXiv:1912.06087 [physics.geo-ph]. – 2019. – 10 p.
- 5 Rouet-Leduc B., Hulbert C., Lubbers N., et al. Machine learning predicts laboratory earthquakes. //Geophys. Res. Lett. – 2017. – Vol. 44. – P.9276-9282.
- 6 Tsarev V.A. Geophysical applications of neutrino beams. //Soviet Physics Uspekhi. – 1985. – Vol. 28(10). – P.940.
- 7 Tsarev V.A. and Chechin V.A. Atmospheric muons and high-frequency seismic noise. //LPI Preprint. – 1988. –No.179.
- 8 Gusev G.A., Zhukov V.V., Merzon G.I., et al. Cosmic rays as a new instrument of seismological studies //Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2011. – Vol.38(12). – P.374-379.
- 9 Vildanova L.I., Gusev G.A., Zhukov V.V., 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(3). – P.74-79.
- 10 Chubenko A.P., Shepetov A.L., Antonova V.P., et al. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station. //Nucl. Instrum. Methods A. – 2016. – Vol. 832. – P.158-178.
- 11 Ryabov V.A., Almenova A.M., Antonova V.P., et al. Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station. //EPJ Web of Conf. – 2017. – Vol.145. – P.12001.
- 12 Adamov D.S., Afanasjev B.N., Arabkin V.V., et al. Phenomenological characteristics of EAS with $N_e = 2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^7$ obtained by the modern Tien-Shan installation “Hadron” //In Proceedings of the 20th ICRC, Moscow. – 1987. – Vol.5. – P.460-463.
- 13 Antoni T., Apel W.D., Badea A.F., et al. Muon density measurements with the KASCADE central detector //Astropart. Phys. – 2002. – Vol.16. – P.373–386.
- 14 Pierog T. and Werner K. Muon production in extended air shower simulations //Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol.101. N 171101.
- 15 Shepetov A., Chubenko A., Kryakunova O. et al. Under-ground neutron events at Tien Shan //J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1181. – N 012017.
- 16 Shepetov A.L., Sadykov T.Kh., Mukashev K.M., et al. Seismic signal registration with an acoustic detector at the Tien Shan mountain station //News of the National academy of sciences of the RK, series of geology and technical sciences. – 2018. – Vol.429(3). – P.47–56.
- 17 Mukashev K.M., Sadykov T.Kh., Ryabov V.A., et al. Investigation of acoustic signals correlated with the flow of cosmic ray muons in connection with seismic activity of Northern Tien Shan. //Acta Geophys., – 2019. – Vol.67(4). – P.1241–1251.

References

- 1 O.B. Chavroshkin, A.V. Nikolaev, L.N. Rykunov, and V.V. Tsyplakov, Methods, results and perspectives of the high frequency seismic noise and vibrosignals, In 6th Rep IASPEL Comm. Microseismol, (18 IUGG, Hamburg, Germany, 1983).
- 2 G. Paparo, G.P. Gregori, R. De Ritis, and A. Taloni, Ann. Geophys., 45(2), 401–416 (2002).
- 3 X. Lei and S. Ma, Earthq. Sci., 27, 627–646 (2014).
- 4 H. Jasperson, C. Bolton, P. Johnson, et al, arXiv:1912.06087 [physics.geo-ph] (2019).
- 5 B. Rouet-Leduc, C. Hulbert, N. Lubbers, et al, Geophys. Res. Lett., 44, 9276–9282 (2017).
- 6 V.A. Tsarev, Soviet Physics Uspekhi, 28 (10), 940 (1985).
- 7 V.A. Tsarev and V.A. Chechin, LPI Preprint No. 179 (1988).
- 8 G.A. Gusev, V.V. Zhukov, G.I. Merzon, et al, Bull. Lebedev Phys. Inst., 38(12), 374–379 (2011).
- 9 L.I. Vildanova, G.A. Gusev, V.V. Zhukov, et al, Bull. Lebedev Phys. Inst., 40(3), 74–79 (2013).
- 10 A.P. Chubenko, A.L. Shepetov, V.P. Antonova, et al, Nucl. Instrum. Methods A, 832, 158-178, (2016).
- 11 V.A. Ryabov, A.M. Almenova, V.P. Antonova, et al, EPJ Web of Conf., 145, 12001 (2017).
- 12 D.S. Adamov, B.N. Afanasjev, V.V. Arabkin, et al. Phenomenological characteristics of EAS with $N_e = 2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^7$ obtained by the modern Tien-Shan installation “Hadron”. In Proceedings of the 20th ICRC, Moscow, 5, 460–463 (1987).
- 13 T. Antoni, W.D. Apel, A.F. Badea, et al, Astropart. Phys., 16, 373-386 (2002).
- 14 T. Pierog and K. Werner, Phys. Rev. Lett., 101, 171101 (2008).
- 15 A. Shepetov, A. Chubenko, O. Kryakunova, et al, J. Phys.: Conf. Ser., 1181, 012017 (2019).
- 16 A.L. Shepetov, T.Kh. Sadykov, K.M. Mukashev, et al, News of the National academy of sciences of the RK, series of geology and technical sciences, 429(3), 47–56 (2018).
- 17 K.M. Mukashev, T.Kh. Sadykov, V.A. Ryabov, et al, Acta Geophys., 67(4), 1241-1251 (2019).