

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г. А. Гусев, В. В. Жуков, Г. И. Мерзон, Г. Г. Митько,
А. С. Степанов, В. А. Рябов, В. А. Чечин,
А. П. Чубенко, А. Л. Щепетов

Рассмотрено современное состояние проблемы краткосрочного прогноза землетрясений. Предложен новый метод мониторинга объёмно-напряжённого состояния в сейсмоопасной зоне с использованием мюонов высокой энергии в космических лучах и одновременной регистрации акустических и сейсмических сигналов в области частот от 1 Гц до 1–2 кГц. Для реализации этого метода необходима регистрация мюонов детекторами с одновременной регистрацией широких атмосферных ливней на площади в несколько квадратных километров.

Ключевые слова: космические мюоны, высокочастотные сейсмические шумы, мониторинг, объёмно-напряжённое состояние, прогноз, предвестники землетрясений.

Человеческая история наблюдений за землетрясениями указывает на существование приблизительно 100-летнего цикла повторения разрушительных землетрясений в тех районах, где они происходили в прошлом. Необходимо сделать все, чтобы минимизировать материальный ущерб, и особенно постараться избежать людских жертв от землетрясения силой 8–10 баллов. Для этого важно иметь надёжный краткосрочный (или хотя бы среднесрочный) прогноз возникновения такого разрушительной силы землетрясения.

Разрушительные не предсказанные землетрясения в недалеком прошлом показали, что проблема прогноза землетрясений в настоящее время не имеет эффективного решения. Обычные сети сейсмических станций и геофизические сети не способны решить эту задачу. Анализ существующего положения с прогнозом землетрясений свидетельствует о его неблагополучии. Примером может служить серия землетрясений, произо-

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: gusevgag@mail.ru.

шедших в Японии 11 марта 2011 г., которые не были спрогнозированы. Эта природная катастрофа стала крупнейшей за всю историю страны. Масштабы бедствия были впечатляющими: ушедшие под воду населенные пункты, рухнувшие здания, горящие блоки атомной электростанции.

Можно сказать, что сейсмологическая наука в настоящее время переживает кризис [1]. Поставлены под сомнения некоторые подходы к земной коре как к упругой среде, на которых базировалось развитие сейсмологии на протяжении последних 100 лет [2]. Но если отсутствует удовлетворительная теория возникновения землетрясений, то проблема предсказания землетрясений в настоящее время не может иметь надёжный теоретический фундамент и эффективное решение. Тем не менее, новые экспериментальные исследования новыми методами необходимы.

Выход из кризиса только один, а именно, в инновационном развитии сейсмологии, для создания которого необходимо проводить серьезные научные исследования по разным направлениям, где имеется, пусть даже небольшая, вероятность успеха обнаружения новых предвестников разрушительных землетрясений и критериев отделения их от слабой и средней сейсмичности. Такой подход имеет полное право на существование, по крайней мере, для тех сейсмоопасных регионов, где детерминированная компонента сейсмического процесса преобладает над стохастической (например, Камчатка и Курилы). Весь исторический опыт науки свидетельствует, что только в результате такого подхода можно сделать прорыв в понимании механизмов землетрясений и выйти на решение проблемы их прогноза.

В конце 80-х и начале 90-х годов прошлого столетия советскими учеными из Физического института им. П. Н. Лебедева и Московского института физики Земли была разработана предварительная концепция нового перспективного направления инновационной сейсмологии. Пришло время вернуться к работе над этим направлением.

К настоящему времени известно около 200 предвестников землетрясений, с помощью которых делается попытка создания методов предсказания по различным предвестникам землетрясений или их комбинациям. Рассмотрим некоторые из них. Поскольку землетрясения в среднем имеют очаги на глубине 15 км, то даже для мелкофокусных землетрясений необходимо иметь информацию об объёмно-напряжённом состоянии (ОНС) не только на поверхности (где она может ослабляться и искажаться), но и на соответствующих глубинах, где геологическая среда сильно отличается от поверхностной.

Практически все методы (кроме чисто сейсмологических) мониторинга ОНС и прогнозирования землетрясений имеют дело с физическими эффектами на поверхности Земли:

- 1) измерения проводимости среды, электрических и магнитотеллурических токов на небольших глубинах;
- 2) измерения полей скоростей движения отдельных областей поверхности (деформаций) с помощью лазерных деформографов;
- 3) измерения полей скоростей движения отдельных областей поверхности (деформаций) со спутников;
- 4) измерения акустической и сейсмической эмиссии в неглубоких скважинах в разных диапазонах частот;
- 5) измерения уровня грунтовых вод в неглубоких скважинах;
- 6) измерения радиоактивного радона и других газов на поверхности;
- 7) измерения поверхностной температуры Земли со спутников;
- 8) измерения электрических и магнитных полей на поверхности;
- 9) измерения тепловых нейтронов;
- 10) поведение живых организмов.

Недостатком обычно предлагаемых методов прогноза по предвестникам землетрясений, наблюдаемым в перечисленных выше эффектах на поверхности Земли, является их крайняя ненадежность, вызванная тем, что указанные геофизические и биологические явления не всегда однозначно связаны с готовящимся землетрясением именно в данном районе. Эти предвестники могут быть связаны либо с локальными флуктуациями, либо с более удалёнными очагами готовящегося другого более сильного землетрясения. Исключения составляют гравитационные измерения, глубинное зондирование электрической проводимости с помощью МГД-генераторов, активное сейсмическое зондирование или просвечивание сейсмическими волнами от землетрясений с целью определения вариаций разности скоростей продольных волн (акустических) и поперечных (сейсмических).

Известны также методы прогнозирования землетрясений, основанные на мониторинге прохождения сигналов от когерентных источников сверхдлинных радиоволн (СДВ), расположенных в различных местах земного шара, а также методы, основанные на наблюдениях за изменениями параметров электромагнитных полей в сейсмоактивных районах. Однако эти методы включают промежуточные механизмы передачи возмущений через земную кору, атмосферу и ионосферу, что требует построения до-

полнительной и весьма непростой теории этих механизмов, то есть методы являются косвенными. Отметим также комплексные спутниковые измерения шумов в акустическом диапазоне частот, измерения магнитных полей и плотности плазмы в ионосфере, включая энергичные электроны до 40 КэВ, которые могут быть связаны с подготовкой к землетрясению [4]. Другим направлением является метод космических изображений, который даёт локализацию возможного очага землетрясения [5].

Перечисленные выше традиционные методы мониторинга сейсмической опасности требуют дополнительного критического анализа. По нашему мнению, они сильно уступают прямым методам мониторинга объёмно-напряжённого состояния (ОНС), использующим глубинный мониторинг, максимально приближенный к области, где формируется очаговая зона. Именно зондирование глубоко проникающими энергичными мюонами, источником которых являются космические лучи высоких энергий, позволяет, в принципе, контролировать ОНС в слоях, которые по сравнению с поверхностью более связаны с очаговой зоной, то есть дают более достоверную информацию.

Рассмотрение существующих методов предсказания землетрясений показывает, что обычные сети сейсмических станций, геофизические, по указанным выше причинам не способны решить проблему прогноза. В настоящее время мировая сейсмическая служба, как правило, может заниматься анализом землетрясений только постфактум. Проблема в традиционной сейсмологии до сих пор состояла в том, чтобы выделить из огромного потока информации, регистрируемой сейсмическими датчиками, информацию о приближении конкретного (локализованного во времени и пространстве) катастрофического землетрясения. Дело в том, что она теряется на фоне большого числа небольших и совершенно не опасных землетрясений. Кроме того, она также маскируется флуктуациями крупномасштабных геодинамических процессов. Исключение могут составлять некоторые спутниковые методы.

Использование мюонного пучка высоких энергий для зондирования глубинных слоёв, в комплексе с сейсмоакустическим мониторингом отклика сейсмоактивной среды на триггерное воздействие мюонного каскада, является уникальным с точки зрения непосредственного проникновения измерительного “щупа” (мюонов) в сравнительно близкую (по сравнению с другими методами) окрестность очаговой зоны. Каждое отдельное измерение при мюонном мониторинге является локальным, а в совокупности все измерения в течение некоторого интервала времени контролируют значительный объём очаговой зоны, величина которого зависит от чувствительности сейсмоакустических при-

ёмников, уровня сейсмоакустического шума и площади совместной регистрации ШАЛ и мюонов.

Одним из направлений разработки методов прогноза землетрясений является исследование и анализ временного поведения высокочастотного сейсмического шума. Метод использования сейсмической акустической эмиссии основан на представлениях о том, что процессы подготовки землетрясений генерируют аномальное поведение высокочастотного сейсмического шума [3].

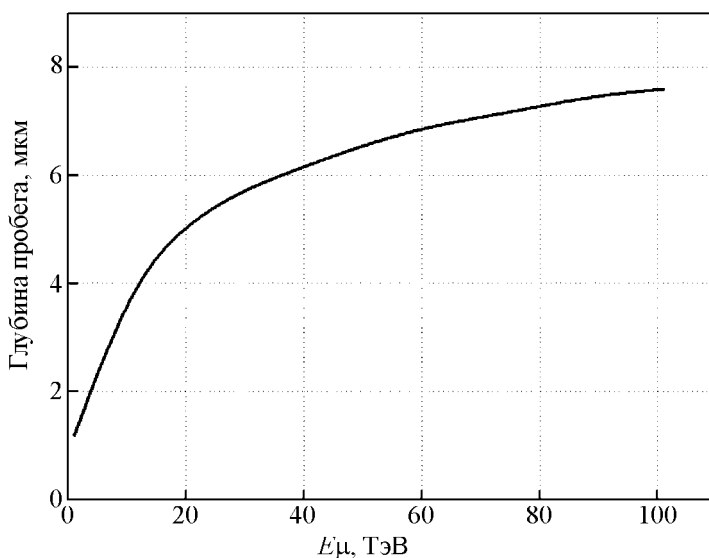


Рис. 1: Зависимость глубины пробега мюона от его энергии.

Поиск предвестников землетрясений на установке, которую предполагается создать на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС), базируется на современной концепции “аномального акустического отклика” напряженной среды при воздействии на нее энергичных проникающих частиц. Эта концепция теоретически была разработана в трудах ученых Физического института им. П. Н. Лебедева и Института физики Земли РАН [3]. В этих работах было впервые показано, что роль триггера высокочастотного сейсмического сигнала может играть мюонная компонента космических лучей.

Нами было проведено моделирование пробега мюона в грунте, а также зависимости числа мюонов от энергии первичных протонов, вызвавших ШАЛ. Моделирование проводилось с помощью пакета CORSIKA 6.970 [6, 7]. Результаты расчета пробега мюона в грунте плотностью 2 г/см^3 (гравийно-песчаная смесь) приведены на рис. 1.

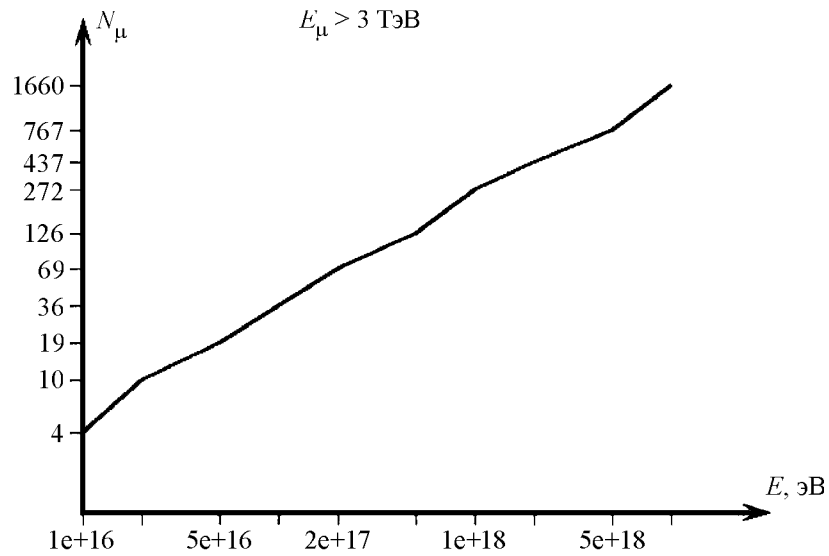


Рис. 2: Зависимость числа мюонов от энергии первичных протонов, вызвавших ШАЛ.

Также рассчитывалось полное число мюонов с энергией, превышающей 3 ТэВ, в зависимости от энергии первичных протонов, генерирующих ШАЛ. Эта зависимость приведена на рис. 2.

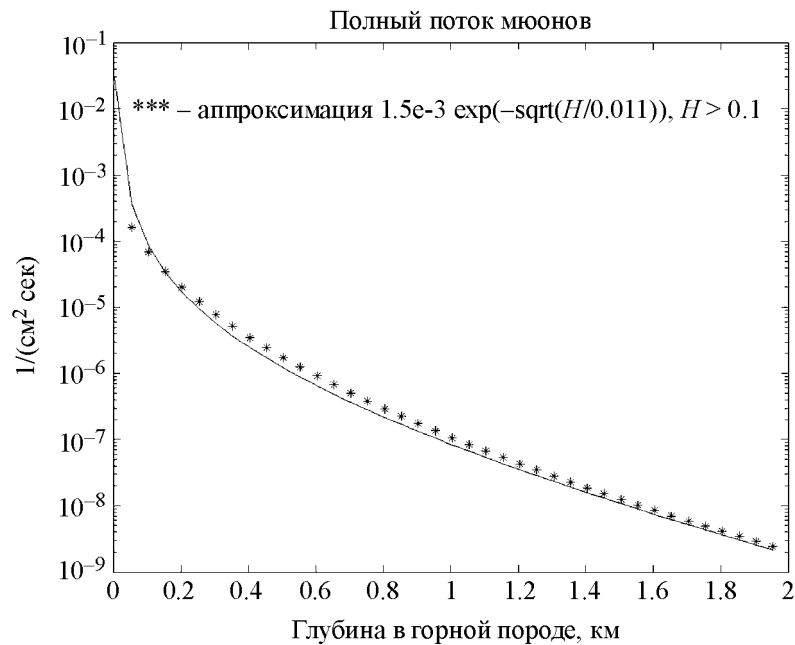


Рис. 3: Полный поток мюонов в зависимости от глубины горной породы.

Представляет интерес зависимость потока мюонов от первичных космических лучей при их взаимодействии с атмосферой Земли. Полный поток мюонов энергией больше нескольких ГэВ от глубины горной породы представлен на рис. 3.

Как показывает моделирование, мюоны могут достигать больших глубин (до 10 км) Земли и взаимодействовать с сейсмически-активной средой, находящейся около очага в метастабильном состоянии. При этом сигнал акустической эмиссии (АЭ) может усиливаться на много порядков по сравнению с обычным термоэмиссионным сигналом [3] и может быть зарегистрирован на поверхности Земли или в скважине.

Дальнейшее моделирование процесса регистрации акустического сигнала при условии, что могут образоваться трещины размером в 1 см, демонстрирует возможность выделения полезного акустического отклика на фоне высокочастотного сейсмического шума (ВСШ). На рис. 4 показано распределение числа трещин, образованных мюонами в круге радиуса $R = 1$ км и в течение одних суток.

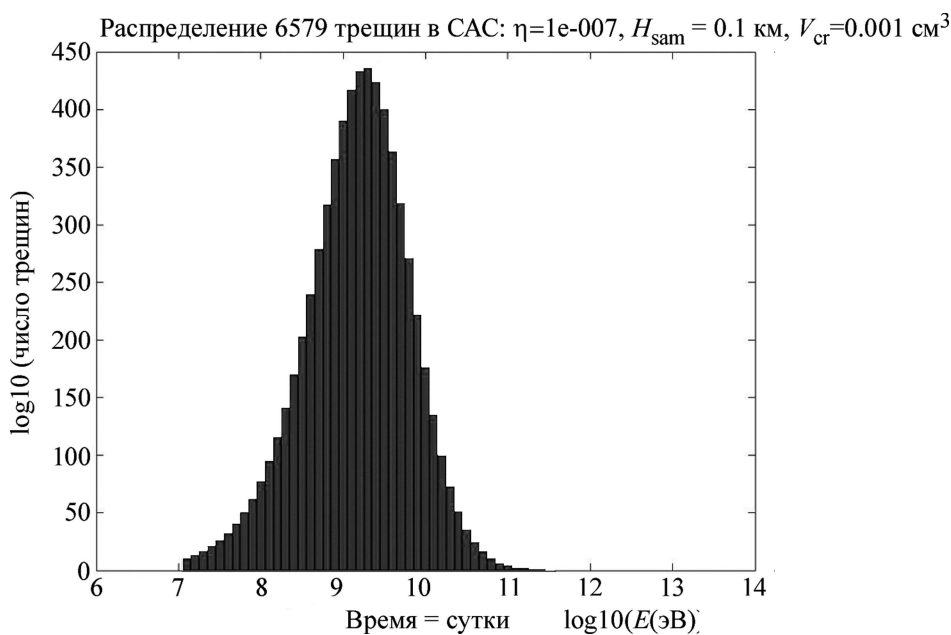


Рис. 4: Распределение числа трещин, образованных мюонами, по их энергиям, в круге $R = 1$ км в течение суток.

Если спектральную мощность ВСШ взять в виде $w_{\mu\text{sam}}^{\text{noise}}$ (Ватт/см²Гц) $\approx 10^{-12}/f^2$, то заметная часть этих трещин даст регистрируемый акустический сигнал в области частот около 1–2 кГц. Распределение числа событий по энергиям мюонов показано на рис. 5.

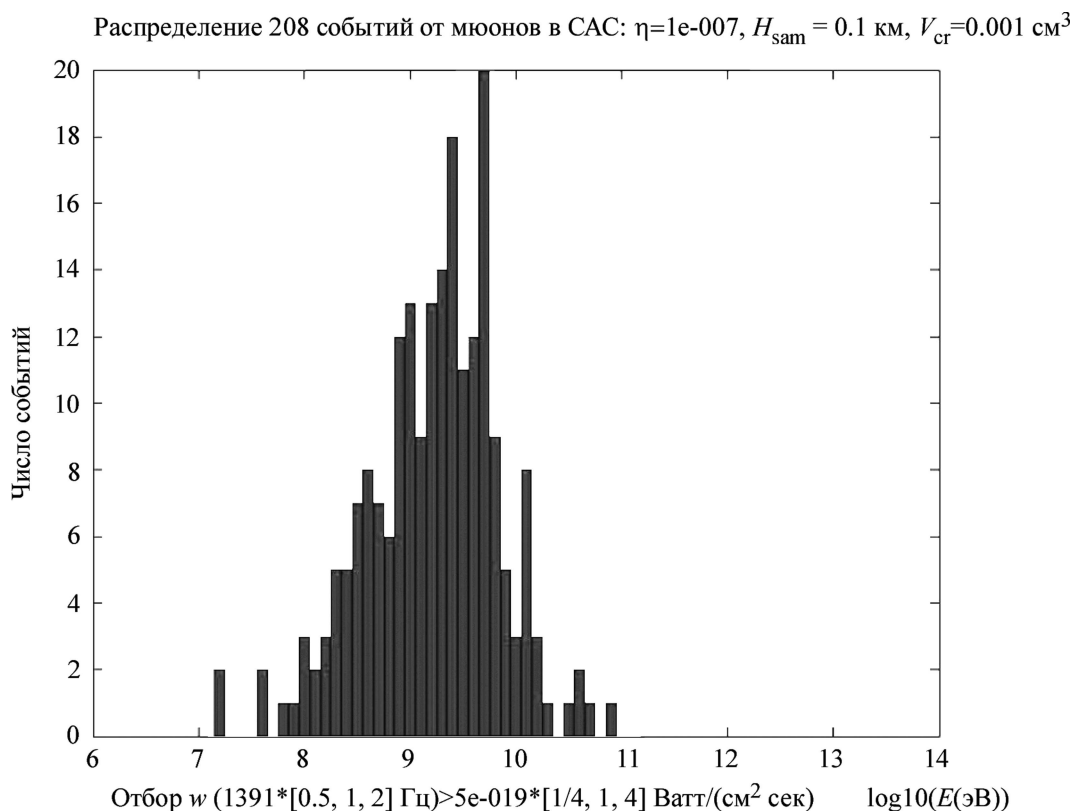


Рис. 5: Распределение мюонных событий в сейсмически-активной среде.

Так как появление проникающих частиц связано с развитием ШАЛ в атмосфере космическими частицами сверхвысоких энергий (до 10^{18} эВ и выше), то для надежного выделения сигнала АЭ и СЭ на фоне шумовых планируется применить корреляционный метод регистрации сигналов АЭ и СЭ, совпадающих по времени с ШАЛ или с сигналом от мюонного детектора. В настоящее время мы имеем теоретическое обоснование для разработки нового метода краткосрочного прогноза землетрясений. Необходимо провести большой цикл экспериментальных исследований для реализации теоретических идей в этом направлении, чтобы новый метод приобрел практическое значение.

В настоящее время на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН создается установка “Горизонт”, которая предназначена для регистрации космических частиц сверхвысоких энергий. Ожидается, что на установке в год будет в среднем регистрироваться 3000 событий с энергией больше 10^{17} эВ и 30 событий с энергией больше 10^{18} эВ. Установка “Горизонт” предназначена для изучения ШАЛ в диапазоне энергий первичных частиц от 10^{16} эВ до 10^{18} эВ, приходящих под большими зенитными углами (до 85°). В составе таких высокоэнергичных ШАЛ содержится много мюонов с энергиями

$10^{12} - 10^{13}$ эВ и выше. Направление движения мюонов определяется с точностью не менее 3° .

Следовательно, полученные в работе [3] и настоящей работе результаты открывают возможность экспериментального наблюдения корреляций между моментами появления широких атмосферных ливней как источников пучков энергичных мюонов и отдельных импульсов АЭ и СЭ, имея в виду создание нового инструмента изучения сейсмического процесса и нового метода краткосрочного прогноза землетрясений.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки, государственный контракт № 16.515.11.5055 от 07.09.2011 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. Л. Гуфельд, М. И. Матвеева, ДАН **438**(2), 253 (2011).
- [2] Г. А. Соболев, *Основы прогноза землетрясений* (М., Наука, 1993).
- [3] В. А. Царев, В. А. Чечин, Препринт ФИАН № 179 (Москва, ФИАН, 1988).
- [4] В. И. Ларкина, В. В. Мигулин, Н. И. Гершензон и др., Геомагнетизм и аэрономия **23**(5), 832 (1983).
- [5] В. Г. Бондур, А. Т. Зверев, ДАН **402**(1), 98 (2005).
- [6] Н. Н. Калмыков, С. С. Остапченко, А. И. Павлов, Изв. РАН сер. физ. **58**(12), 21 (1994).
- [7] S. S. Ostapchenko, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **151**, 143 (2006).

Поступила в редакцию 21 ноября 2011 г.