



**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ**

**FUNDAMENTAL AND APPLIED  
PROBLEMS OF PHYSICS**

**ТРУДЫ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**PROCEEDINGS  
OF INTERNATIONAL CONFERENCE**

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ»**

**UZBEKISTAN ACADEMY OF SCIENCES  
PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE OF SPA “PHYSICS-SUN”**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ**

---

**FUNDAMENTAL AND APPLIED  
PROBLEMS OF PHYSICS**



**ТРУДЫ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

---

**PROCEEDINGS  
OF INTERNATIONAL CONFERENCE**

**22 - 23 сентября**

**Ташкент 2020 г.**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Т. Садыков<sup>1,2</sup>, Б. Искаков<sup>1,2</sup>, А. Аргынова<sup>1</sup>, Н. Салихов<sup>3</sup>, Е. Таутаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самбаев Университет, Физико-технический институт  
г. Алматы, 050032, Казахстан, [info\\_ipt@mail.ru](mailto:info_ipt@mail.ru), [leodel@mail.ru](mailto:leodel@mail.ru)

<sup>2</sup>Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби  
г. Алматы, 050014, Казахстан, [info@kaznu.kz](mailto:info@kaznu.kz)

<sup>3</sup>Институт ионосферы  
г. Алматы, 050020, Казахстан, [admion1@mail.ru](mailto:admion1@mail.ru)

### Аннотация

Мюоны космических лучей являются высокоэнергетическими заряженными частицами и, следовательно, есть вероятность, что они 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.

**Ключевые слова:** мюоны, космические лучи, мониторинг, землетрясение, акустика.

### 1. Введение

Прогноз и мониторинг сейсмической активности местности представляет собой актуальную проблему современной сейсмологии. Нерешенной проблемой традиционной сейсмологии к настоящему времени остается выделение из потока регистрируемой многочисленными сейсмическими датчиками информации строго определенного сигнала о приближении конкретного, локализованного во времени и пространстве, катастрофического землетрясения. Такой сигнал обычно теряется на постоянном фоне от большого числа небольших и неопасных землетрясений, а также маскируется флуктуациями крупномасштабных геодинамических процессов, и, как правило, по этой причине он обнаруживается только постфактум. В данной работе мы рассмотрим новый и уникальный метод для мониторинга сейсмической активности в сейсмически активных зонах.

### 2. Метод исследования

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 (1). Основная идея этого метода иллюстрируется рисунком 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. 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  $\sim 10\text{--}100$  ТэВ через грунт, и были получены конкретные оценки множественности таких мюонов в ШАЛ с энергией  $10^{16}$  -  $10^{18}$  эВ, глубины их проникновения внутри

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.

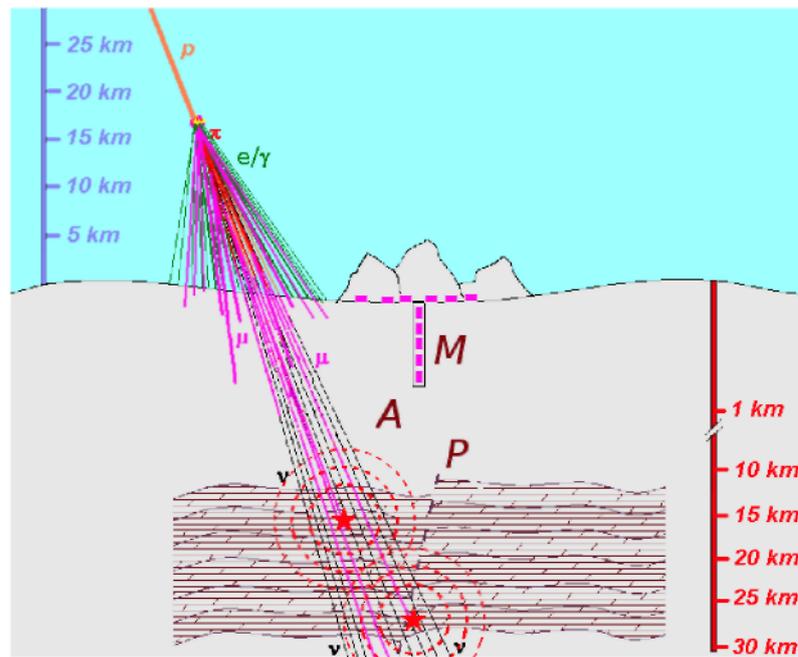


Рис.1 — Идея глубинного сканирования земной коры на основе мюонов из ствола энергичных ШАЛ.  $P$  — зона глубинного разлома,  $A$  — упругие колебания, которые генерируются в сейсмически напряженной среде под воздействием локальной ионизации от прохождения мюонов  $\mu$  и распространяются в виде акустической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

### 3. Установка для регистрации сейсмической активности

Предварительный поиск кратковременных сигналов акустической эмиссии в событиях, связанных с групповым прохождением мюонов высокой энергии, проводился в специальном эксперименте на Тянь-Шаньской высокогорной станции в 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 (2).

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 обеспечивает две панели солнечных батарей расположенный на крыше помещения (Рис. 2).

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  $\pm 3\text{В}$  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 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.



*Рис. 2. Помещение для экспериментальной установки*

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 PiB+ 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 фирмы Analog Devices.

Микрокомпьютер Raspberry PiB+, который обеспечивает процесс оцифровки сигналов акустического детектора, работает под управлением специально адаптированной для него версии операционной системы Linux. Входящие в состав этой системы программы обеспечивают выполнение обычных операций по поддержке нормального функционирования всего измерительного процесса: автоматический запуск необходимых служебных программ-утилит, контроль и автоматическая коррекция системных часов, возможность удаленного подключения по линиям связи для контроля работы системы в режиме on-line и т.п (3,4).

#### **4. Заключение**

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, 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 космогеофизический метод прогноза сильных землетрясений в регионе.

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

### **Литература**

1. G. A. Gusev et al. 2011. Cosmic rays as a new instrument of seismological studies. Bull. Lebedev Phys. Inst. Vol. 38, № 12. P. 374–379.
2. L. I. Vil'danova et al. 2013. The first results of observations of acoustic signals generated by cosmic ray muons in a seismically stressed medium. Bull. Lebedev Phys. Inst. Vol. 40, № 3. P. 74–79.
3. Исакаев и др. 2019. Исследование проникающей способности космических мюонов для прогноза землетрясении. Вестник НЯЦ, №4. 23-27 стр.
4. Argynova A. K. et al.. 2019. The perspective fundamental cosmic rays physics and astrophysics investigations in the Tien Shan high-mountain scientific station. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 6(438), 121–128. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.163>