

**Жантаев Ж.Ш.<sup>1</sup>, Мукашев К.М.<sup>2</sup>, Мурадов А.Д.<sup>2</sup>,  
Садыков Т.Х.<sup>3</sup>, Хачикян Г.Я.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>АО «Национальный центр космических исследований и технологий» АКК МИР РК, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан МОН РК. e-mail: mukash\_kanat@mail.ru

<sup>3</sup>Физико-Технический Институт АО ННТХ «Парасат» МОН РК, г. Алматы, Казахстан

<sup>4</sup>ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ» АКК МИР РК, г. Алматы, Казахстан

## **О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НОВОГО КОСМОГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПУТЕМ РЕГИСТРАЦИИ МЮОНОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА**

Рассматривается возможность воздействия высокоэнергичных мюонов на сейсмически активную среду. Если напряжение этой среды близко к критическому порогу разрушения, может произойти мгновенный сброс напряжения. В результате поток космических лучей может спровоцировать землетрясение, сопровождаемое сильными акустическими шумами. Исходя из этого, можно предложить идею нового космогеофизического метода краткосрочного прогноза сильных землетрясений. Данный метод может быть реализован на базе экспериментального высокогорного комплекса «ATHLET» (Almaty Three Level Experiment Technique) близ г. Алматы с привлечением чувствительных параметрических акустических приемников ультразвукового диапазона. Комплекс «ATHLET» расположен на трех уровнях 800, 1400 и 3340м. Каждый уровень оснащен наземными и подземными установками для регистрации мюонной компоненты космических лучей. Регистрация мюонов осуществляется синхронно на всех установках совместно с акустическим детектором. Задержка между мюонным и акустическим сигналами определяется временной задержкой, требуемой для прохождения упругих колебаний земной коры от очага землетрясения до акустического детектора. Она зависит от скорости распространения упругих колебаний через земную кору и расстояния до очага землетрясения. По этим параметрам можно оценить расстояние до очага землетрясения.

**Ключевые слова:** космические лучи, мюоны, сейсмика, земная кора, прогноз землетрясения, параметрическая антенна.

Zhantaev Zh.Sh.<sup>1</sup>, Mukashev K.M.<sup>2</sup>, Muradov A.D.<sup>2</sup>, Sadykov T.Kh.<sup>3</sup>, Khachikyan G.Ya.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>JSC "NCITC", Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh National University al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kanat-kms@mail.ru

<sup>3</sup>Physico-Technical Institute of JSC «NNTKh Parasat», Almaty, Kazakhstan

<sup>4</sup>Institute of the ionosphere JSC «NCKIT», Almaty, Kazakhstan

**About the possibility of creating a new cosmogeophysical method  
of forecasting seismic processes in the earth crust with the registration  
of muons of cosmic origin and acoustic noise**

The possibility of the action of high-energy muons on a seismically active medium is considered. If the voltage of this medium is close to the critical destruction threshold, an instantaneous voltage drop can occur. As a result, the stream of cosmic rays can provoke an earthquake. Proceeding from this, it is possible to propose the idea of a new cosmogeophysical method of short-term forecast of strong earthquakes. This method can be implemented on the basis of the experimental high-altitude complex

“ATHLET” (Almaty Three Level Experiment Technique) near Almaty with the use of sensitive parametric acoustic antennas of the ultrasonic range. The complex “ATHLET” is located on three levels 800, 1400 and 3340m. Each level is equipped with ground and underground installations for recording the muon component of cosmic rays. The muon registration is carried out synchronously on all installations together with an acoustic detector. The delay between the muon and acoustic signals is determined by the time delay required to propagate the elastic oscillations of the earth’s crust from the source of the earthquake to the acoustic detector. It depends on the speed of propagation of elastic vibrations through the earth’s crust and the distance to the source of the earthquake. By these parameters, it is possible to estimate the distance to the source of the earthquake.

**Key words:** cosmic rays, muons, seismic, earth crust, earthquake forecast, parametric antenna.

Жантаев Ж.Ш.<sup>1</sup>, Мұқашев Қ.М.<sup>2</sup>, Мұрадов А.Д.<sup>2</sup>, Садықов Т.Х.<sup>3</sup>, Хачикян Г.Я.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ҚР ҚАҒ ӨМ «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ,  
Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: mukash\_kanat@mail.ru

<sup>3</sup>ҚР БҒМ Физика-техникалық институт «Парасат» АҚ, Алматы қ., Қазақстан

<sup>4</sup>ҚР ҚАҒ ӨМ “ҰҒЗТО” «Ионосфера Институты», Алматы қ., Қазақстан

**Ғарыштық мюондар мен акустикалық шуларды тіркеу арқылы  
жер қыртысындағы сейсмикалық процестерді болжаудың  
жаңа космогеофизикалық тәсілін жасау мүмкіндігі**

Жоғары энергетикалық мюондардың сейсмикалық белсенді ортаға әсер ету мүмкіндігі қарастырылады. Егер осы ортаның кернеуі бүлінудің сындарлы табалдырығына жақын болса, кернеудің шұғыл түрде төмендеуі ықтимал. Нәтижесінде ғарыш сәулелерінің ағыны акустикалық шулардың көзі болатын жер сілкінісін туғызуы мүмкін. Осы құбылысқа сүйене отырып қысқа мерзімді жер сілкінісін болжаудың жаңа космогеофизикалық әдісінің идеясын ұсынуға болады. Бұл әдісті Алматы қаласы маңындағы биік таулы «ATHLET» (Almaty Three Level Experiment Technique) эксперименталдық кешеннің базасында жүзеге асыруға болады. Сол үшін сезімталдығы жоғары ультрадыбыстық диапазонда жұмыс істейтін параметрлік акустикалық қабылдағыштарды пайдалануға болады. «ATHLET» кешені теңіз деңгейінен жоғары 800, 1400 және 3340 м биіктіктерде орналасқан қодырғылардан құралады. Әрбір деңгейдегі қондырғы мюондық құраушыларды тіркеуге арналған жер бетіндегі және жер асты құрылғыларымен жабдықталған. Мюондық құраушыларды тіркеу процесі акустикалық детектордан келетін сигналмен синхронды түрде жүргізіледі. Екі арадағы кешігу мерзімі акустикалық сигналдың жер қыртысы арқылы өтетін серпімді тербелістердің таралу жылдамдығына байланысты. Кешігуді анықтау арқылы жер сілкінісі орын алған жердің қашықтығы анықталады.

**Түйін сөздер:** ғарыш сәулелері, мюондар, сейсмика, жер қыртысы, жер сілкінісін болжау, параметрлік антенна.

## Введение

В последние годы активно обсуждается вопрос о возможной реализации на базе высокогорного комплекса «ATHLET» космофизического метода краткосрочного прогноза сильных землетрясений на территории Алматинского региона [1-5], В этом методе требуется проводить постоянный одновременный мониторинг потока мюонов космических лучей и акустических, а возможно и сейсмических сигналов, которые возникают в геологической среде при воздействии на нее проникающих мюонов. На настоящий момент имеется теоретическое обоснование космофизического метода [6], (образно называемого «мюонный луч»), подкрепленное до некоторой степени модельными расчетами [1] и первыми, пробными измерениями [2]. Поскольку

ку полномасштабная реализация метода потребует дополнительных финансовых затрат, имеет смысл провести более широкие исследования в этом направлении и получить дополнительные результаты, пусть даже косвенно поддерживающие целесообразность реализации данного метода сейсмического прогноза. При обсуждении метода «мюонный луч» одним из первых возникает вопрос о глубине проникновения мюонов в земную кору, поэтому в данной статье собраны современные результаты модельных расчетов и непосредственных измерений концентрации подземных мюонов международным сообществом ученых. Другой вопрос касается экспериментальных свидетельств о соответствии между вариациями потока космических лучей и характеристик геологической среды, которое ожидаемо, если космические лучи действитель-

но оказывают на нее воздействие. В данной работе приведены результаты по соответствию между вариациями солнечной активности и/или космических лучей и вулканической и сейсмической активности на территории Японии, а также между вариациями солнечной активности и сейсмичностью в Алматинском регионе.

### Характеристики космических лучей

Под космическими лучами обыкновенно понимаются потоки заряженных релятивистских частиц, начиная от протонов и ядер гелия и кончая ядрами более тяжёлых элементов вплоть до урана, рождённых и ускоренных до высоких и предельно высоких (вплоть до  $10^{20}$  эВ) энергий вне пределов Земли. При этом в потоке частиц с энергией до  $10^9$  эВ доминирует вклад Солнца, а частицы более высоких энергий имеют галактическое (и, возможно, при самых высоких энергиях экстрагалактическое) происхождение. В составе галактических космических лучей (ГКЛ) преобладают протоны, на долю остальных ядер приходится менее 10%. Протоны остаются доминирующей компонентой, по крайней мере, до энергий  $\sim 1$  ТэВ, хотя доля ядер возрастает с увеличением энергии частиц. Приходящие к Земле (первичные) космические лучи с энергией частиц ( $E_0 > 10^{13}$  эВ) порождают в атмосфере каскад вторичных частиц – широкий атмосферный ливень (ШАЛ). В 80-ые годы 20 века, с ростом производительности вычислительных машин, широкое распространение получили схемы расчета каскада вторичных частиц, основанные на методе Монте-Карло. Одним из широко используемых компьютерных кодов расчета каскада по методу Монте-Карло является программа CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade). Для примера, на рисунке 1 приведен результат моделирования ШАЛ в работе [7] с использованием программы CORSIKA.

Максимум ШАЛ приходится на высоту порядка 15 км, а область, занимаемая ШАЛ на земной поверхности, составляет примерно  $70 \times 70$  м<sup>2</sup>. На практике, структуру ШАЛ можно представить в виде тонкого диска, состоящего из отдельных частиц (пионов, электронов, протонов, нейтронов, мюонов и нейтрино) движущихся со скоростью, близкой к скорости света, по направлению первичной частицы. В центре толщина диска минимальна ( $\sim 1,5$  м), а на больших расстояниях увеличивается и на расстоянии 100 м от оси может достигать 50 м. На высоте  $\sim 15$  км (в максимуме ШАЛ), доминирующей является

электронно-фотонная компонента, и примерно 10% от числа электронов составляют мюоны, количество которых зависит от энергии первичной частицы. В работе [1] проводилось компьютерное моделирование для мюонов с энергией  $E \geq 3$  ТэВ, рождаемых в ШАЛ при энергиях первичных частиц  $E_0$  от  $10^{16}$  эВ до  $10^{19}$  эВ. Получено, что при  $E_0 = 10^{16}$  эВ, в ШАЛ может содержаться примерно 4 мюона с энергией  $E \geq 3$  ТэВ, а при  $E_0 = 10^{19}$  эВ, – более 1500 мюонов с энергией  $E \geq 3$  ТэВ.

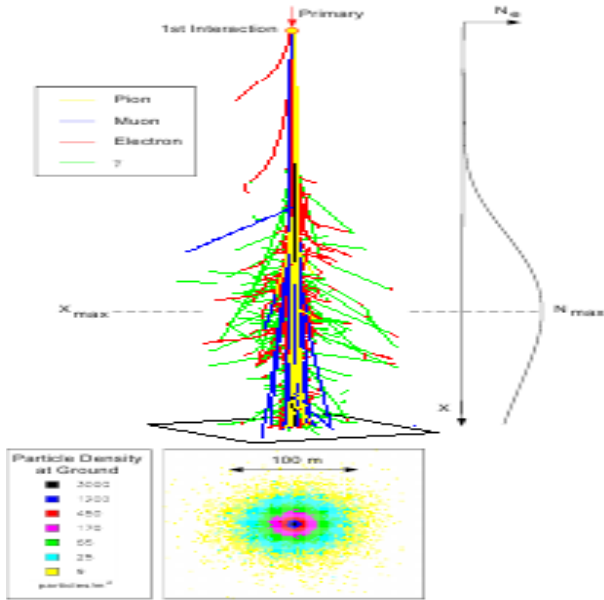
Проходя через атмосферу и приближаясь к земной поверхности, частицы ШАЛ теряют свою энергию в основном в процессе ионизации, тормозного излучения, образования пар, фотоядерных взаимодействий. Масса мюона почти в 200 раз больше массы электрона, поэтому эффективность взаимодействия мюонов с атмосферными газами в 40000 раз меньше, чем у электронов, и в результате, на уровне земной поверхности поток мюонов становится доминирующим. Этот эффект демонстрирует рисунок 2 по данным работы [8], где сплошными кривыми показаны рассчитанные концентрации пионов, электронов, протонов, нейтронов, мюонов и нейтрино, а цветными символами показаны экспериментальные измерения концентрации мюонов ( $\mu$ ) с энергиями  $E_\mu > 1$  GeV. Экспериментальные данные, систематизированные в [8] и представленные на рисунке 2, были получены разными авторами в разных экспериментах, реализованных, как на уровне земной поверхности, так и на высотах атмосферы с использованием баллонов и самолетов.

Согласно современным данным, только мюоны и нейтрино проникают в земную кору на существенные глубины. При этом, мюоны порождают третичные потоки фотонов, электронов и адронов. Мюоны теряют энергию в ионизационных и радиоактивных процессах (тормозное излучение, прямое рождение пар  $e^+e^-$ , и фотоядерные взаимодействия). Полная потеря энергии мюона может быть выражена в виде функции от массы пройденного вещества как:

$$-dE_\mu/dX = a + bE_\mu, \quad (1)$$

где  $a$  – ионизационные потери,  $b$  – потери за счет трех перечисленных выше радиоактивных процессов. Оба параметра в (1) изменяются с изменением энергии. Отношение  $a/b$ , равное ( $\approx 500$  GeV в стандартной горной породе) определяет критическую энергию ниже которой ионизационные потери становятся преобладающими над

радиоактивными потерями. В таблице 1 приведены данные о среднем пути пробега мюона в стандартной горной породе [9] и значения параметров  $a$ ,  $b$  в зависимости от энергии мюона.



**Рисунок 1** – Схема широкого атмосферного ливня, смоделированная с использованием компьютерных кодов CORSIKA [7]

**Таблица 1** – Средний путь пробега  $R$  (в километрах водного эквивалента или в  $10^5 \text{ г см}^{-2}$ ) мюона с энергией  $E_\mu$  и значения коэффициентов потерь в ионизационных и радиоактивных процессах ( $a$ ,  $b$ , соответственно) по данным [9]

| $E_\mu$<br>ГэВ | $R$<br>км. в..э. | $a$<br>МэВ $\text{г}^{-1} \text{см}^2$ | $b$<br>$10^{-6} \text{г}^{-1} \text{см}^2$ |
|----------------|------------------|--|--|
| 10             | 0,05             | 2,17                                   | 1,90                                       |
| 100            | 0,41             | 2,44                                   | 3,04                                       |
| 1000           | 2,45             | 2,68                                   | 3,92                                       |
| 10000          | 6,09             | 2,93                                   | 4,35                                       |

Значения параметров в таблице несколько изменяются в зависимости от химического состава горной породы и должны оцениваться для конкретно исследуемого района. Интенсивность подземных мюонов зависит от энергии мюона в атмосфере и его потерь в горной породе. Если пренебречь зависимостью коэффициентов  $a$ ,  $b$  от энергии мюона, то проинтегрировав уравнение (1) можно получить соотношение связи между энергией мюона в атмосфере ( $E_{\mu,0}$ ) и его

энергией ( $E_\mu$ ) после пробега слоя горной породы толщиной  $X$  в виде [8]:

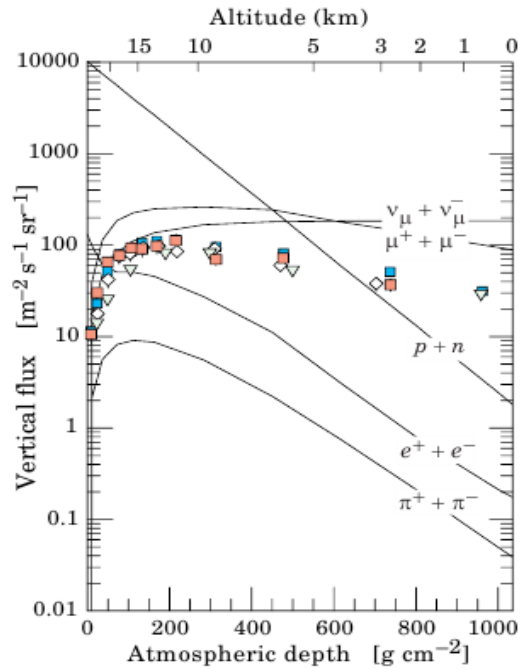
$$E_{\mu,0} = (E_\mu + a/b) \exp(bX) - a/b \quad (2)$$

В общем, спектр мюонов на глубине  $X$  можно представить в виде [8]:

$$\frac{dN_\mu(X)/dE_\mu}{dN_\mu/dE_{\mu,0}} = \frac{dN_\mu/dE_{\mu,0}}{dE_{\mu,0}/dE_\mu} = \frac{dN_\mu/dE_{\mu,0}}{\exp(bX)} \quad (3)$$

где  $E_{\mu,0}$  есть решение уравнения (2) для случая, когда можно пренебречь флуктуациями.

На рисунке 3 показаны результаты расчета и измерения мюонов глубоко в земной коре до глубин более 100 км водного эквивалента из работы [8].

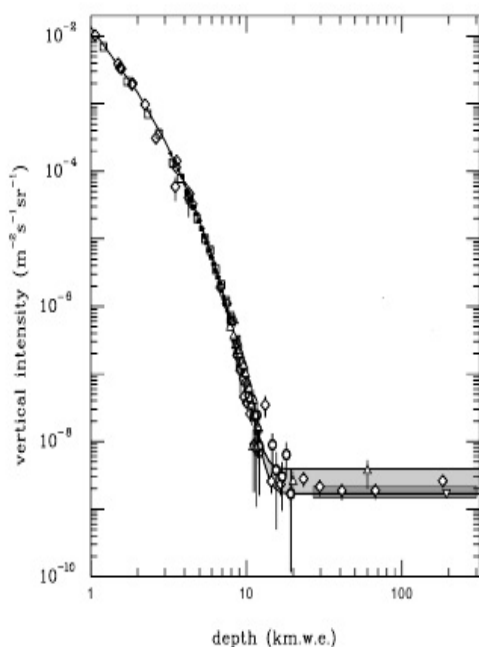


Сплошные кривые – результаты расчетов, символы – измеренные концентрации отрицательных мюонов

**Рисунок 2** – Вертикальные потоки частиц космических лучей с энергией  $E > 1 \text{ GeV}$  на разных высотах [8].

Линиями на рисунке 3 показаны результаты расчетов с использованием программы CORSIKA, а символами результаты измерений в разных экспериментах: черные ромбы – компиляция данных в экспериментах Stouch [10] и Baksan [11], светлые круги – данные эксперимента LVD [12], темные круги – компиляция

данных в экспериментах MACRO [13] и Frejus [14], треугольники – данные эксперимента SNO [15]. Серая область на больших глубинах представляет мюоны с энергией более 2 ГэВ, которые были индуцированы при взаимодействии с нейтрино. Верхняя линия – для горизонтальных потоков индуцированных мюонов, нижняя – для мюонов, распространяющихся вертикально вверх. Более темно закрашенная область показывает мюонный поток, измеренный в эксперименте SuperKamiokande, который расположен в горах Японии на глубине 1 км под землей и имеет детектор в виде огромного резервуара (40м x 40м) из нержавеющей стали, который заполнен 50000 тонн чистой воды – мишень для нейтрино.



Ромбы, светлые и темные круги, треугольники – данные в экспериментах: Crouch и Baksan, LVD, MACRO и Frejus, SNO, соответственно.

**Рисунок 3** – Интенсивность потока мюонов в зависимости от глубины в единицах водного эквивалента (1 км в.э. =  $10^5$  г см<sup>-2</sup> стандартной горной породы) из работы [8].

Результаты модельных расчетов, а также непосредственная регистрация мюонов на глубинах до нескольких км.в.э. (рисунок 3), поставили вопрос о возможности их влияния на процессы в земной коре. К настоящему времени уже получены результаты о возможности такого влияния на активизацию как вулканической, так и сейсмической деятельности планеты. Так, в работе

[16] были проанализированы 11 извержений за последние 306 лет (1700 – 2005гг) четырех вулканов на территории Японии (Fuji, Usu, Myojinsho, Satsuma-Iwo-jima). Обнаружено, что 9 из 11 извержений произошли на фазе минимума солнечной активности, когда интенсивность потока космических лучей, в том числе мюонов, ожидается максимальной. Однако, такой связи не было обнаружено для извержений другого японского вулкана – Izu-Ohshima. Анализ состава магмы в этих вулканах показал различие – магма четырех вулканов, извержения которых приурочены в основном к фазе минимума солнечной активности, обогащена силикатами (SiO<sub>2</sub>), в то время как концентрация силикатов в магме вулкана Izu-Ohshima низкая. Поскольку обогащенные силикатом магмы имеют относительно высокое поверхностное натяжение ( $\sim 0,1$  Нм<sup>-1</sup>), скорость нуклеации в них настолько низкая, что такие магмы существует в сверх перенасыщенном состоянии без значительного распада твердого раствора, даже когда находится относительно близко к земной поверхности, в пределах проникновения сюда мюонов космических лучей в диапазоне энергий (1-10 ГэВ). Эти мюоны могут способствовать нуклеации пересыщенной магмы путем ионизационных потерь, как описано многими авторами, изучавшими процессы в пузырьковой камере. Радиационно-индуцированная нуклеация в богатых кремнеземом магмах может спровоцировать распад H<sub>2</sub>O, предшествующий извержению вулкана. В работе [16] даже предположили, что извержение вулкана Пинатубо в 1991 году возможно было вызвано тем же механизмом: увеличением потока космических лучей в связи с развитием в это время тайфуна Юпуа (резкое падение атмосферного давления в тайфуне должно было привести к увеличению потока космических лучей, достигающих земной поверхности).

Дополнительно к анализу вулканов, в работе [16] обращено внимание, что из 12 сильнейших землетрясений (с магнитудой более 7.5), произошедших в регионе Японии, 9 событий были приурочены к периоду низкой солнечной активности. Информация об этих землетрясениях приведена в Таблице 2, а даты их возникновения на фоне вариаций солнечной активности показаны на рисунке 4.

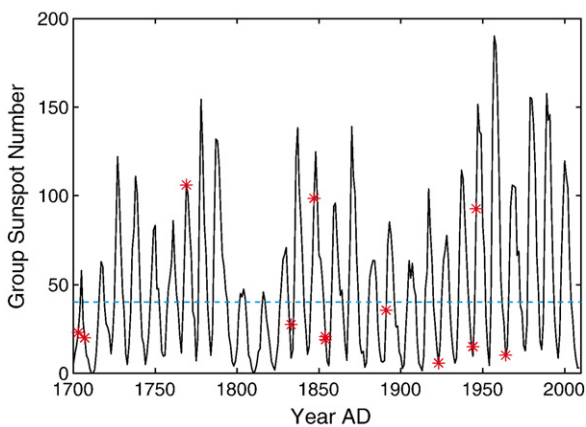
В работе [16] не был предложен физический механизм, чтобы объяснить тенденцию приуроченности сильных землетрясений к периодам низкой солнечной активности, когда поток космических лучей максимален. Однако замечено,

что эта корреляция может быть связана неким образом с циркуляцией воды из субдуцирующего слэба под Японской островной дугой, чему посвящены работы [17-19]. Так, в [19] по данным сейсмической томографии показано, что вода, возникающая при дегидратации слэба и

последующей конвекции **in the mantle wedge**, отвечает за генерацию магмы в районе Японских островов. Циркуляция воды из субдуцирующего слэба приводит к увеличению электрической проводимости земной коры и верхней мантии в этом регионе, как показано в работе [17].

**Таблица 2** – Землетрясения с магнитудой более 7.5, произошедшие в регионе Японии с 1700 по 2010гг по данным [16] (год, число солнечных пятен, магнитуда, регион)

| №  | Год  | Число солнечных пятен | Магнитуда | Регион, название                             |
|----|------|-----------------------|-----------|--|
| 1  | 1703 | 23                    | 7.9-8.2   | Kanto (Genroku Earthquake)                   |
| 2  | 1707 | 20                    | 8,4       | Tokai and Nankai (Houei Earthquake)          |
| 3  | 1769 | 106.1                 | 7,75      | East Kyushu                                  |
| 4  | 1883 | 27,5                  | 7,5       | Yamagata, Akita, and Niigata                 |
| 5  | 1847 | 98.5                  | 7.5       | Nagano and Niigata (Zenkoji Earthquake)      |
| 6  | 1854 | 20.6                  | 8.4       | Tokai and Nankai (Ansei Tokai Earthquake)    |
| 7  | 1854 | 20.6                  | 8.4       | Nankai (Ansei Earthquake)                    |
| 8  | 1891 | 35.6                  | 8,0       | Aichi and Gifu (Nobi Earthquake)             |
| 9  | 1923 | 5,8                   | 7,9       | Kanto (Great Kanto Earthquake)               |
| 10 | 1944 | 15                    | 7,9       | Tokai and Nankai (Showa Tonankai Earthquake) |
| 11 | 1946 | 92,6                  | 8,0       | Nankai (Showa Nankai Earthquake)             |
| 12 | 1964 | 10,2                  | 7,5       | Niigata                                      |



**Рисунок 4** – Вариации солнечной активности (черная кривая) и даты (красные звездочки) возникновения сильных землетрясений ( $M > 7.5$ ) в регионе Японии (таблица 2) из работы [16].

По поводу связи сейсмичности с космическими лучами можно добавить, что несколько лет назад академик РАН Голицин Г.С. обратил внимание на соответствие между энергией космических лучей и частотой, с которой они приходят

на Землю, и между энергией землетрясений и частотой их возникновения [20]. Он попытался найти то общее, что типично для столь разных процессов и показал, что если в систему вводится энергия, то начинают действовать определенные закономерности, типичные как для звездных систем, так и для Земли. В результате были получены достаточно схожие зависимости между энергией и частотой прихода к Земле космических частиц, а также между энергией и частотой возникновения землетрясений. В целом, в [20] продемонстрирована необходимость и полезность общего взгляда на окружающий нас мир, однако, конкретный вопрос о вкладе энергии космических лучей в активизацию сейсмических процессов в [20] не затрагивался. Этому вопросу посвящена работа [6], выполненная почти 30 лет назад, где получены количественные оценки отклика геологической среды на энергию проникающей в земную кору мюонной компоненты космических лучей. Показано, что при взаимодействии мюонов с земными породами, в последних могут возникать микротрещины, раскрытие которых должно сопровождаться генерацией акустических шумов. В принципе, на зем-

ной поверхности акустические шумы постоянно регистрируют во всех сейсмоактивных регионах планеты, и в диапазоне частот до 1 кГц их спектральная энергия варьирует в пространстве и во времени в пределах  $10^{-10}$ – $10^{-18}$  втсм<sup>2</sup>Гц [6]. Оценки [6] показали, что при взаимодействии мюонов с обычными земными породами спектральная энергия акустических волн в диапазоне частот до 1 кГц может составлять  $\sim 10^{-36}$  втсм<sup>2</sup>Гц, что более чем на 18 порядков меньше экспериментально наблюдаемой на земной поверхности. Однако, при взаимодействии мюонов с сейсмически активной средой, напряжение в которой близко к порогу разрушения горной породы, выделяемая энергия может увеличиваться на 21 порядок, что способно привести к генерации не только акустической, но и сейсмической волны, то есть, к землетрясению.

Как уже отмечалось выше, в [16] показано, что не для всех вулканов Японии время их извержения тяготеет к минимумам солнечной активности, когда повышен поток космических лучей, а только для тех, чья магма перенасыщена силикатами. Это говорит о том, что земные породы могут избирательно реагировать на воздействие солнечной активности и/или потока космических лучей – в зависимости от их геологического строения. В поддержку такой избирательной реакции свидетельствуют и результаты почти десятилетнего изучения связи сейсмотектонической деформации земной коры на Северном Тянь-Шане с вариациями солнечной активности, обзор результатов которых приведен в недавней работе [21]. По данным о механизмах очагов землетрясений с энергетическим классом  $K=7-9$ , за период 1982–2012 гг. установлено, что только на локальной территории, расположенной в высокогорной части хребтов Заилийский и Кунгей Алатау, между Алматинской впадиной на севере и Иссыкульской – на юге, Аксайским и Тургенским разломами – на западе и востоке, режим сейсмотектонической деформации земной коры коррелирует с вариациями солнечной активности – находится в состоянии одноосного сжатия в годы низкой солнечной активности, но одноосного растяжения в годы высокой солнечной активности. Как показано в [22], строение литосферы этого локального района отличается от соседних. А именно, результаты скоростного моделирования литосферы по субширотному Тянь-Шаньскому геотраверсу показывают, что земная кора данного локального района подстилается наиболее мощным слоем активной мантии (горячим мантийным потоком), и как по-

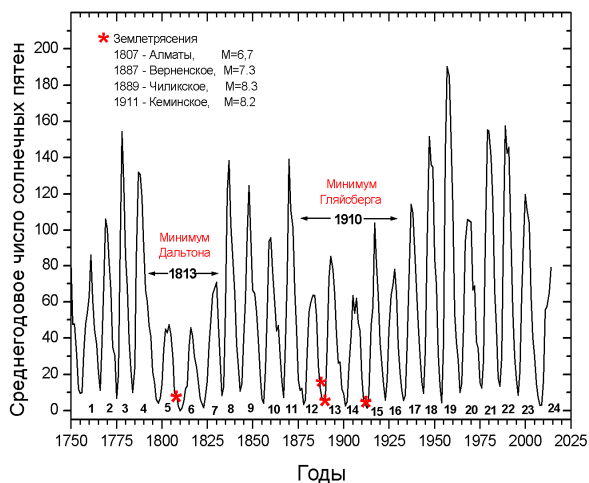
казывает магнитотеллурическое зондирование, низкоомные (высокопроводящие) объемы земных пород территориально совпадают с горячим мантийным потоком [23].

На локальной территории, где обнаружен отклик сейсмотектонической деформации земной коры [21] в недалеком прошлом произошли сильнейшие землетрясения: Верненское 1887 г.,  $M=7.3$ , Чиликское, 1889 г.,  $M=8.3$  и Кеминское, 1911 г.,  $M=8.2$ . Ранее, в 1807 г. на этой территории также произошло сильное землетрясение, по поводу которого отмечено [http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2013-11-13-11621\\_0.pdf](http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2013-11-13-11621_0.pdf): «Мы практически ничего не знаем о землетрясении, разрушившем г. Алматы в 1807 г., кроме упоминания в каталоге И.В. Мушкетова и А.П. Орлова, составленном в 1893 г. "В 1807 году в Алматах произошла страшная катастрофа". Поразительно, но, как и для случая сильнейших землетрясений в Японии [16], сильнейшие землетрясения на Северном Тянь-Шане также произошли в годы минимумов солнечной активности. Этот факт демонстрирует рисунок 5, где приведены среднегодовые числа солнечных пятен за период с 1750 по 2014 гг. (1–24 солнечных цикла), а красными звездочками отмечены даты четырех сильнейших землетрясений на Северном Тянь-Шане.

За период инструментальных наблюдений за Солнцем идентифицировано 24 солнечных 11-ти летних циклов (номера в нижней части рисунка 5). Как видим, амплитуды 11-ти летних циклов не постоянны, что приводит к появлению долговременных солнечных максимумов и минимумов [25, 26]. В литературе активно обсуждается минимум Маундера (1645–1715 гг.), установленный по палеоданным, а за инструментальный период солнечных наблюдений зафиксировано еще два солнечных минимума [25, 26]: Дальтона, середина которого пришлась примерно на 1813 г. (5–7 солнечных циклы), и Гляйсберга, середина которого пришлась примерно на 1910 г., а самыми низкоамплитудными были 12-ый и 14-ый циклы. Из рисунка 5 видно, что четыре землетрясения, разрушавших г. Алматы, произошли в периоды долговременных солнечных минимумов Дальтона и Гляйсберга, при этом, они были приурочены к годам солнечных минимумов, завершавших низкоамплитудные 11-ти летние циклы (5-ый, 12-ый и 14-ый).

Для реализации изложенной теоретической идеи, то есть, для реализации метода мониторинга объёмно-напряжённого состояния среды на глубине формирования очагов землетрясений

с использованием мюонов космических лучей, необходима регистрация мюонов в широких атмосферных ливнях на площади в несколько квадратных километров и одновременная регистрация акустических сигналов от раскрывающихся в геологической среде трещин. Экспериментальный комплекс «ATHLET», состоящий из установок на высотах 3340 м (станция Тянь-Шань), 1700 м (Промежуточная станция) и 850 м (центр г. Алматы) позволяет определить момент зарождения ШАЛ, его размер и энергию первичной частицы. Мюонная установка комплекса размещена в подземном помещении с 15-ти сантиметровым поглотителем мягкой (электронно-фотонной) компоненты космических лучей. С 2013 года комплекс «ATHLET» дополнен установкой «Горизонт-Т», расположенной также на высоте 3340 м над уровнем моря. Количество вещества от границы атмосферы до уровня установки в направлении под зенитным углом 70 градусов составляет 2000 г/см<sup>2</sup>. На такой толщине вещества атмосферы, электронно-фотонная компонента ШАЛ практически полностью поглощается, а заряженные частицы, которые достигают уровня установки, в основном, являются мюонами.



**Рисунок 5** – Среднегодовые числа солнечных пятен в 1750-2014 гг (1-24 цикла) и даты сильнейших исторических землетрясений на Северном Тянь-Шане (звездочки)

Установка «Горизонт-Т» позволит определять энергетический спектр первичного космического излучения в области энергий больше 1016эВ, а также поток наклонных мюонов. То есть, к настоящему времени на территории Северного Тянь-Шаня уже создана основная наукоемкая часть системы для реализации космофизического метода прогноза сильных землетрясений. С установлением на территории комплекса акустических приемников и сейсмической станции, появится возможность экспериментального наблюдения корреляций между моментами появления широких атмосферных ливней, как источников пучков энергичных мюонов, и вызванных ими импульсов акустической и сейсмической эмиссий. В результате может быть создан новый инструмент изучения сейсмического процесса – мониторинг объемного напряженного состояния среды на глубине формирования потенциально-очага землетрясения и новый космогеофизический метод краткосрочного прогноза сильных землетрясений, сочетающий в себе как методы регистрации проникающей мюонной компоненты космических лучей и акустические шумы в широком диапазоне частот. Последние могут быть эффективно зарегистрированы высокочувствительными акустическими параметрическими преобразователями [3, 29,30].

## Заключение

Проникающая в земную толщу мюонная компонента космических лучей при взаимодействии с напряженной сейсмически активной средой может порождать микротрещины с генерацией акустической и даже сейсмической волн. Одновременная регистрация мюонов в широких атмосферных ливнях и энергии акустической и сейсмической эмиссий вблизи оси ливня позволила бы создать новое средство изучения сейсмического процесса, пригодного для проведения мониторинга объемного напряженного состояния среды на глубине формирования потенциально-очага землетрясения, что стало бы основой для разработки нового космогеофизического метода краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

## Литература

- 1 Mukashev K.M., Vildanov L.I., Sadykov T.H., Chubenko A.P. Atmospheric electricity and radiation that occur when storm events.- Almaty. 2012. – 253 p.
- 2 Gusev, G.A., Zhukov V.V., Ryabov V.A., Chechin V.A., Chubenko A.P., Shepetov A. L. Cosmic rays as an innovative tool for seismological research Brief reports on physics LPI. -2011.– No. 12. – P. 43-51.

- 3 Vildanov L.I., Ryabov V.A., Chubenko A.P., Shepetov A.L. The First results of the monitoring of acoustic signals generated by muons of cosmic rays in the seismically-charged environment Short reports on physics FIAN. -2013.– No. 12. – S. 31-39.
- 4 Sadykov T.Kh., Zhukov V.V., Breusov N.G., Mukashev K.M., Khachikyan G.Ya., Zastrozhnova N.N. Seismic stations for short-term prediction of earthquakes by means of the cosmic rays // proceedings of the VIII international scientific-practical conference "news of scientific thought – 2013", 28-30 October 2013. – Czechia, Prague: Publishing House "Education and Science" (Czech Republic, Prague).- S. 78-81. (in russ)
- 5 Zhantayev J.S., Breusov N.G., Kurmanov B.K., Khachikyan G.Ya., Sadykov T.H., Mukashev K.M., Zhukov V.V. Cosmogeophysical method of forecasting of strong earthquakes // proceedings of NAS RK. The mathematics series. -2014.–№ 4 (296). – S. 140-149. (in russ)
- 6 Zhantayev J.S., Breusov N.G., Kurmanov B.K., Khachikyan G.Ya., Mukashev K.M., Sadykov T.H., Zhukov V.V. Probability of initiating seismic waves penetrating components of cosmic rays // Global scientific potential: mater. 10-th Intern. scientific-pract. Conf.– Bulgaria, Sofia, 2014.–Vol. 6 (Physics). –P. 33-38. (in russ)
- 7 Tsarev V.A., Chechin V.A. Atmospheric muons and high-frequency seismic noise. Preprint FIAN. – 1988.– No. 179. – 21 c.
- 8 Hinton J. A. Extensive air shower. PhD Thesis. University of Leeds. – 1998. – 276 p.
- 9 Beringer J. et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) and 2013 partial update for the 2014 edition. – 2013, – December 18. – URL: <http://pdg.lbl.gov>.
- 10 Groom D.E., Mokhov N.V., Striganov S.I. Muon stopping-power and range tables// Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 2001. 78. – 183 p.
- 11 Adamson P. et al. Measurement of the atmospheric muon charge ratio at TeV energies with MINOS // Phys. Rev. – 2007. – Vol. D76. -P. 052003. – hep-ex/0705.3815.
- 12 Crouch M. An Improved World Survey Expression for Cosmic Ray Vertical Intensity VS. Depth in Standard Rock // Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf., Moscow. 1987. – 6. – P. 165. – [<http://adsabs.harvard.edu/abs/1987ICRC....6..165C>].
- 13 Andreev Yu.M., Gurentzov V.I., Kogai I.M. Muon Intensity from the Baksan Underground Scintillation Telescope // Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf. Moscow. – 6. – P. 200. [<http://adsabs.harvard.edu/abs/1987ICRC....6..200A>].
- 14 Aglietta M. et al. (LVD Collab. Neutrino-induced and atmospheric single-muon fluxes measured over five decades of intensity by LVD at Gran Sasso Laboratory.//Astropart. Phys. – 1995. -3. – P. 311-320.
- 15 Ambrosio M. et al. (MACRO Collab.). Vertical muon intensity measured with macro at the Ggran Sasso laboratory. // Phys. Rev. -1995. – D52. – P. 3793-3802.
- 16 Berger Ch. et al. (Frejus Collab.). Experimental study of muon bundles observed in the Fréjus detector// Phys. Rev. – 1989. – D40. – P. 2163
- 17 Mukashev K.M., Sadykov T.H., Zhukov V.V., Novolodskaya O.A. Applied research in cosmic rays physics. Part 1.-Almaty. 2016. – 287 S.
- 18 Ichiki, M., Baba, K., Toh, H., Fuji-ta, K., 2009. An overview of electrical conductivity structures of the crust and upper mantle beneath the northwestern Pacific, the Japanese islands, and continental East Asia. Gondwana Research 16. – PP. 545–562
- 19 Hasegawa, A., Nakajima, J., Uchida, N., Okada, T., Zhao, D., Matsuzawa, T., Umino, N., Plate subduction, and generation of earthquakes and magmas in Japan as inferred from seismic observations: an overview. Gondwana Research 16. – PP. 370–400. (in russ)
- 20 Maruyama S., Hasegawa A., Santosh M., Kogiso T., Omori S., Nakamura H., Kawai H., Zhao D., 2009. The dynamics of big mantle wedge, magma factory, and metamorphic- metasomatic factory in subduction zones. Gondwana Research 16. – PP. 414-430. (in russ)
- 21 Golitsyn G. S. Statistics and dynamics of natural processes and phenomena: Methods, tools, results. Series: Synergetics: from past to future. – 2013. – No. 68. – ISBN 978-5-396-00502-0. – 400 p. (in russ)
- 22 Abakanov T. D., Sadykova A. B., Khachikyan G.Ya., Modern seismo-tectonic status of the crust in the Northern Tien Shan. Reports Of The National Academy Of Sciences Of The Republic Of Kazakhstan. ISSN 2224-5227. -2015. – No. 2. – P. 98-110. (in russ)
- 23 Timush A.V., Sadykova A.B., Stepanenko N.P., Khachikyan G.Ya., Structure of the lithosphere as a factor of variations of seismotectonic deformations in connection with solar activity in the Northern Tien-Shan //News NAN RK, series of Geology and technical Sciences. -2013, No. 1. – S. 55-66. (in russ)
- 24 Rybin A.K., Batalev V.Y., Shelokov G. G Towards a 3D structure of the crust and upper mantle of the Tien Shan: the results of deep magnetotelluric // Geodynamics and geoenvironmental problems of high-altitude regions (2nd international Symposium; abstracts). Bishkek, 2002. – S. 25-27.
- 25 Mukashev K.M., Sadykov T.H., Zhukov V.V., Novolodskaya O.A. Applied research in physics of cosmic rays. Part 2.-Almaty. 2017. – 314 p. (in russ)
- 26 Feynman, J., Ruzmaikin A. The Centennial Gleissberg Cycle and its association with extended minima // J. Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. P. 6027–6041. doi:10.1002/2013JA019478.
- 27 Mukashev K.M., Sadykov T.H. Physics, astrophysics of cosmic rays and anomalous effects in hadron interactions. – Almaty. 2011. – 374 p. (in russ)
- 28 Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. Nonlinear underwater acoustics.– Leningrad: Shipbuilding. 1981. – 264 c. (in russ)
- 29 Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. parametric Sonar system. – Rostov n/D: Rostizdat, 2004.- 400 p. (in russ)

## Reference

- 1 K.M. Mukashev, L.I. Vildanov, T.H. Sadykov and A.P. Chubenko. Atmospheric electricity and radiation that occur when storm events. (Almaty. 253 p.) (2012). (in russ)
- 2 G.A. Gusev, V.V. Zhukov, V.A. Ryabov, V.A. Chechin, A.P. Chubenko and A.L. Shepetov. Cosmic rays as an innovative tool for seismological research Brief reports on physics LPI.. 12. P. 43-51. (2011). (in russ)
- 3 L.I. Vildanov, V.A. Ryabov, A.P. Chubenko and A.L. Shepetov. The First results of the monitoring of acoustic signals generated by muons of cosmic rays in the seismically-charged environment, Short reports on physics FIAN.. 12. p. 31-39. (2013). (in russ)
- 4 T.Kh. Sadykov, V.V. Zhukov, N.G. Breusov, K.M. Mukashev, G.Ya. Khachikyan and N.N. Zastrozhnova Proceedings of the VIII international scientific-practical conference "news of scientific thought. (Czechia, Prague: Publishing House "Education and Science" (Czech Republic, Prague). S. 78-81. (2013). (in russ)
- 5 J.S. Zhantayev, N.G. Breusov, B.K. Kurmanov, G.Ya. Khachikyan, T.H. Sadykov, K.M. Mukashev and V.V. Zhukov Proceedings of NAS RK. The mathematics series..4 (296).S. 140-149. (2014). (in russ)
- 6 J.S. Zhantayev, N.G. Breusov, B.K. Kurmanov, G.Ya. Khachikyan, K.M. Mukashev, T.H. Sadykov and V.V. Zhukov Global scientific potential: mater. 10-th Intern. scientific.-pract. Conf. (Bulgaria, Sofia, Vol. 6 (Physics). P. 33-38. (2014). (in russ)
- 7 V.A. Tsarev and V.A. Preprint FIAN 179. 21C. (1988)
- 8 J. A. Hinton Extensive air shower. (PhD Thesis. University of Leeds). 276 p. (1998).
- 9 J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) and 2013 partial update for the 2014 edition. 2013, December 18 . URL: <http://pdg.lbl.gov>.
- 10 D.E. Groom, N.V. Mokhov and S.I. Striganov Muon stopping-power and range tables Atomic Data and Nuclear Data Tables.. 78. 183 p. (2001)
- 11 P. Adamson et al. Phys. Rev.. D76. 052003. hep-ex/0705.3815. (2007)
- 12 M. Crouch Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf., (Moscow, 1987) 165. [<http://adsabs.harvard.edu/abs/1987ICRC....6..165C>].
- 13 Yu.M. Andreev, V.I. Gurentsov and I.M. Kogai Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf. (Moscow, 2007). 6. P. 200. [<http://adsabs.harvard.edu/abs/1987ICRC....6..200A>].
- 14 M. Aglietta et al. (LVD Collab. Astropart. Phys.. 3. P. 311-320. (1995)
- 15 M. Ambrosio et al. (MACRO Collab.). Phys. Rev.. D52. P. 3793-3802. (1995)
- 16 Ch. Berger et al. (Frejus Collab.). Phys. Rev. D40. P. 2163. (1989)
- 17 K.M. Mukashev, T.H. Sadykov, V.V. Zhukov and O.A. Novolodskaya Applied research in cosmic rays physics. Part 1. (Almaty, 2016). 287 p.
- 18 M. Ichiki, K. Baba, H. Toh, K. Fuji-ta, Gondwana Research 16. 545–562 (2009).
- 19 Hasegawa, A., Nakajima, J., Uchida, N., Okada, T., Zhao, D., Matsuzawa, T., Umino, N., Gondwana Research 16. 370–400. (2010). (in russ)
- 20 S. Maruyama, A. Hasegawa, M. Santosh, T. Kogiso, S. Omori, H. Nakamura, H. Kawai and D. Zhao, Gondwana Research 16. 414–430. (2009). (in russ)
- 21 G. S. Golitsyn Statistics and dynamics of natural processes and phenomena: Methods, tools, results. Series: Synergetics: from past to future. No. 68. ISBN 978-5-396-00502-0. – 400 p. (2013). (in russ)
- 22 T.D. Abakanov, A.B. Sadykova and G.Ya. Khachikyan Modern seismo-tectonic status of the crust in the Northern Tien Shan. Reports Of The National Academy Of Sciences Of The Republic Of Kazakhstan. ISSN 2224-5227. No. 2. P. 98-110. (2015). (in russ)
- 23 A.V. Timush, A.B. Sadykova, N.P. Stepanenko and G.Ya. Khachikyan, News NAN RK, series of Geology and technical Sciences 1, 55-66. (2013) (in russ)
- 24 A.K. Rybin, V.Y. Batalev, G.G. and T. Shelokov Geodynamics and geoenvironmental problems of high-altitude regions (2nd international Symposium; abstracts). Bishkek. S. 25-27. (2002).
- 25 K.M. Mukashev, T.H. Sadykov, V.V. Zhukov and O.A. Novolodskaya Applied research in physics of cosmic rays. Part 2. (Almaty, 2017), 314 p. (in russ).
- 26 J. Feynman, A. Ruzmaikin The Centennial Gleissberg J. Geophys. Res. Space Physics 119. P. 6027–6041. doi:10.1002/2013JA019478. (2014).
- 27 K.M. Mukashev and T.H. Sadykov Physics, astrophysics of cosmic rays and anomalous effects in hadron interactions. (Almaty, 2011), 374 p. (in russ)
- 28 B.K. Novikov and O.V. Rudenko, V.I. Timoshenko Nonlinear underwater acoustics. (Leningrad: Shipbuilding, 1981), 264 p. (in russ)
- 29 V.A. Voronin, S.P. Tarasov and V.I. Timoshenko Parametric Sonar system. (Rostov n/D: Rostizdat, 2004), 400 p. (in russ)