

Метод мюонной радиографии для фундаментальных и прикладных исследований

А.Б. Александров, М.С. Владимиров, В.И. Галкин, Л.А. Гончарова, В.М. Грачёв, С.Г. Васина, Н.С. Коновалова, А.А. Маловичко, А.К. Манагадзе, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Т.М. Роганова, Н.И. Старков, В.Э. Тюков, М.М. Чернявский, Т.В. Щедрина

Изложены основы метода мюонной радиографии, представлен обзор основных наиболее крупных экспериментов. Приведены результаты первых в России исследований, осуществлённых авторами на основе данного метода с использованием эмульсионных трековых детекторов.

Ключевые слова: мюонная радиография, ядерная фотоэмульсия, распознавание образов, трековые детекторы

PACS numbers: 07.05.Fb, 07.05.Hd, 07.05.Kf, **29.40. – h**

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.07.038188>

Содержание

1. Введение (1375).
2. Физическое обоснование метода мюонной радиографии (1376).
3. История и возможности метода мюонной радиографии (1379).

А.Б. Александров, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, С.Г. Васина, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.И. Старков, М.М. Чернявский, Т.В. Щедрина. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
В.И. Галкин. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация
В.М. Грачёв. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация
А.А. Маловичко. Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", просп. Ленина 189, 249035 Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация
А.К. Манагадзе, Т.М. Роганова. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация
Н.Г. Полухина. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Ленинский просп. 4, 119049 Москва, Российская Федерация
 E-mail: poluhina@sci.lebedev.ru
В.Э. Тюков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Naples, Università degli Studi di Napoli Federico II, Complesso Universitario di Monte Sant'Angelo, Via Cinthia, 21, Edificio 6, 80126 Napoli, Italy

*Статья поступила 21 марта 2017 г.,
после доработки 27 июля 2017 г.*

4. Измерительная аппаратура и особенности постановки экспериментов (1382).
 5. Российские разработки по применению метода мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов (1387).
 6. Оценки чувствительности метода (1388).
 7. Заключение. Мюонная георадиография (1389).
- Список литературы (1390).

1. Введение

Космические лучи, традиционно являющиеся источником информации о процессах в космическом пространстве, дают также возможность изучать физические процессы, протекающие на Земле. Изучение потоков мюонов космического происхождения легло в основу метода мюонной радиографии (МР) — метода неразрушающего контроля, основанного на "просвечивании" объекта ионизирующим мюонным излучением и регистрации излучения, прошедшего через этот объект. Анализ особенностей прохождения потоков космических мюонов через вещество позволяет исследовать внутреннее состояние крупных природных и промышленных объектов на поверхности Земли и в её толще, представляющих интерес с научной или прикладной точек зрения либо являющихся источником потенциальной опасности для окружающей инфраструктуры. При успешном решении обратной математической задачи метод мюонной радиографии даёт возможность получать трёхмерное изображение исследуемых объектов.

На поверхности Земли существует большое количество проблемных геологических и промышленных зон, состояние которых представляет серьёзную угрозу для окружающей среды и социальной инфраструктуры и требует непрерывного мониторинга. Предлагаемый метод позволяет обнаружить области повышенной или пониженной плотности в массиве изучаемого объекта посредством сравнения степени поглощения космических мюонов его различными частями. Метод может применяться как для мониторинга крупных природных объектов: вулканов, геологических плит и т.п., так и для

неразрушающего контроля промышленных объектов: шахт и рудников, установок ядерно-энергетического комплекса, производственных и строительных объектов (тоннелей, дамб, доменных печей, опор мостовых конструкций и т.д.), для мониторинга пожароопасных углепородных отвалов, анализа сейсмических процессов, а также как перспективное дополнение к геофизическим методам при разведке полезных ископаемых. Традиционные методы сейсмологии, температурной съёмки, электромагнитного и гравиметрического зондирования являются косвенными и, в отличие от метода МР, содержат существенные неопределённости из-за наложения разнонаправленных сигналов.

Таким образом, метод МР сочетает в себе уникально высокую разрешающую способность (особенно в случае, когда измерения проводятся с использованием ядерных фотоэмульсий), значительно превосходящую таковую обычных геофизических методов, с возможностью получения подробной томограммы исследуемого объекта и применением новейших методов анализа изображений. Использование метода МР в режиме мониторинга может служить для предотвращения чрезвычайных ситуаций или, по крайней мере, для минимизации их последствий для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

Авторы настоящей статьи являются первыми в России разработчиками методических решений по применению метода МР на основе эмульсионных трековых детекторов. Проведённые тестовые эксперименты подтверждают эффективность метода и возможность его применения с использованием эмульсионных трековых детекторов предложенной конструкции и средств обработки эмульсионных данных, которыми располагают российские институты.

2. Физическое обоснование метода мюонной радиографии

Метод МР основан на использовании потоков мюонов космического происхождения, составляющих основную компоненту космического излучения на уровне моря (по различным данным, от 63 % [1] до 80 % [2] всех наблюдаемых частиц). Мюоны рождаются в результате распада заряженных π - и K -мезонов, образующихся в атмосфере при взаимодействии ядерно-активных частиц первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли [3].

Собственное время жизни мюона $\tau = 2,197 \times 10^{-6}$ с, т.е. мюон является нестабильной частицей. Однако, благодаря тому что скорости мюонов близки к скорости света, из-за релятивистского замедления времени эти частицы преодолевают до распада весьма значительные расстояния. Распадный путь мюона с энергией ≥ 1 ГэВ сравним с толщиной остаточной атмосферы от уровня генерации мюонов до поверхности Земли, составляющей в среднем от 10 до 20 км, и увеличивается с возрастанием энергии мюона.

Мюоны не являются ядерно-активными частицами и теряют энергию при электромагнитных взаимодействиях, в основном на тормозное излучение и ионизацию атомов. Ионизационные потери мюонов зависят от их энергии, но для релятивистских частиц с энергиями до ~ 100 ГэВ эти потери могут считаться величиной постоянной (порядка $2 \text{ МэВ г}^{-1} \text{ см}^{-2}$). Для мюонов с такими энергиями ионизация является доминирующим ме-

ханизмом энергетических потерь, в то время как для высокоэнергетичных мюонов (с энергиями $E_\mu \gtrsim 3$ ТэВ) потерями их энергии на ионизацию можно пренебречь, так как в этом случае определяющий вклад в потери энергии вносят радиационное (тормозное) излучение и процесс образования пар [4] (рис. 1). Известно, что потери энергии на тормозное излучение обратно пропорциональны квадрату массы частицы. Поскольку масса покоя мюона приблизительно в 200 раз превышает массу покоя электрона ($m_\mu/m_e \approx 206,768$), энергия, излучаемая при торможении мюона в поле ядра, меньше энергии, излучаемой электроном в том же поле, примерно в $4,3 \times 10^4$ раз. С относительно малыми потерями энергии мюонов на тормозное излучение связаны значительно большие пробеги мюонов в веществе по сравнению с пробегами электронов.

Эти факторы — отсутствие сильных взаимодействий, большая масса покоя и скорость, близкая к скорости света, — обуславливают высокую проникающую способность мюонов по сравнению с таковой как адронов, так и электронов и γ -квантов (рис. 2).

Проникающая способность мюонной компоненты космического излучения определяется её энергетическим спектром на поверхности земли, а для каждой отдельной частицы глубина проникновения в широком диапазоне пропорциональна её энергии. Даже при сравнительно умеренной энергии, $E \sim 10$ ГэВ, мюон может не только пройти сквозь всю земную атмосферу, но и проникнуть в грунт. Мюоны космического происхождения с энергиями $E_\mu \sim 1-10$ ТэВ регистрируются в подземных экспериментах на значительных глубинах: например, в золотом руднике Kolar Gold Fields (Индия) они были зарегистрированы под землёй на глубине более 2300 м [8], а в эксперименте MACRO (Monopole Astrophysics and Cosmic Ray Observatory) — на глубине более 2500 м [9]. На рисунке 3 приведены минимальные значения энергии мюонов на границе с земной поверхностью, необходимые для их проникновения на заданную глубину, выраженную в метрах водного эквивалента¹ [10]. Большой пробег мюонов до поглощения в веществе скальных пород, сравнимый с размером исследуемых объектов и даже превосходящий его, делает их уникальным агентом для радиографии: поскольку спектр космических мюонов простирается более чем до нескольких сотен ТэВ, даже для таких протяжённых объектов, как горные массивы, существуют мюоны, способные пройти их насквозь.

Известно, что зависимость потока мюонов от зенитного угла описывается формулой $\cos^n \theta$, где показатель n близок к 2. Таким образом, при угле падения более 60° к нормали мюонная компонента на уровне земли уменьшается только в четыре раза, тогда как интенсивность ядерной компоненты убывает в 10^3 раз. Интенсивность вертикального потока мюонов с энергиями $E_\mu > 1$ ГэВ составляет около одной частицы на 1 см^2 в минуту (I_{vert} при $E_\mu > 1$ ГэВ порядка $70 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$) [9]. При более высоких энергиях мюонов ($E_\mu \gg 100$ ГэВ) интенсивность их почти горизонтального потока (под углом $\theta \sim 80^\circ$ к вертикальному) значительно превышает интенсивность вертикального потока (рис. 4), что делает исследования в

¹ Глубина, выраженная в метрах водного эквивалента (м в.э.), равна произведению фактической глубины наблюдения на среднюю плотность вышележащих пород.

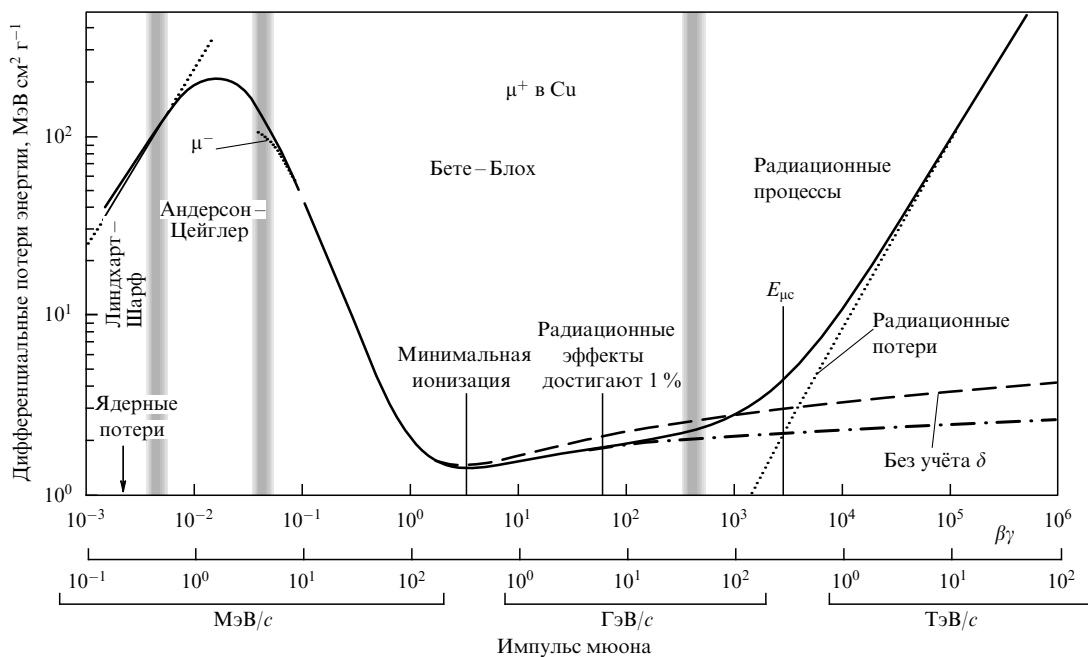


Рис. 1. Потери энергии мюонами в медном поглотителе, включающие в себя электронные (ионизация + возбуждение) и радиационные потери. Последние обусловлены образованием e^+e^- -пар, тормозным излучением, фотоядерными эффектами [4]. $\beta = v_\mu/c$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$. Вертикальными серыми прямыми показаны области действия теорий Линдхарта-Шарфа, Андерсона-Цейглера, Бете-Блоха, а также область радиационных процессов. Ядерные потери (неионизационные потери ядер отдачи) в области Линдхарта-Шарфа незначительны. Короткая пунктирная линия, отмеченная как μ^- , иллюстрирует так называемый эффект Баркаса [5, 6]. $E_{\mu c}$ — критическая энергия мюонов, при превышении которой начинают преобладать радиационные потери; δ — поправка, связанная с влиянием плотности на электронные потери (ионизация + возбуждение) энергии.

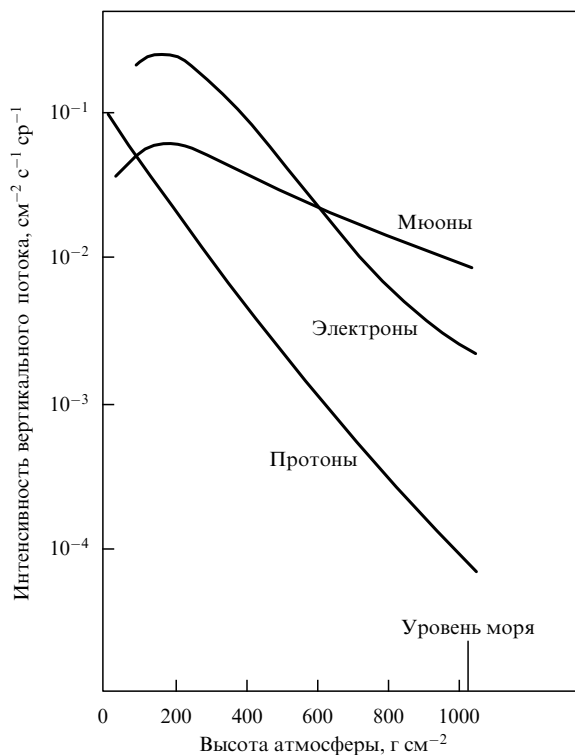


Рис. 2. Интенсивность вертикального потока мюонов на различных высотах в атмосфере в сравнении с интенсивностями потоков электронов и протонов [7].

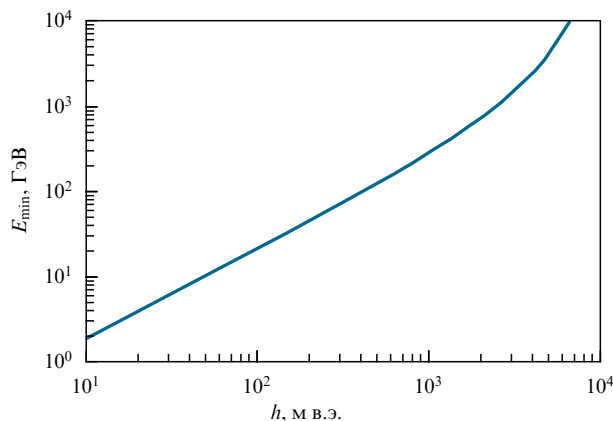


Рис. 3. Минимальные значения энергии мюона на границе с земной поверхностью, необходимые для достижения глубины h в грунте [10].

окологоризонтальном потоке высокоэнергетичных мюонов весьма эффективными. При этом, как видно на рис. 5,

абсолютная интенсивность потока мюонов убывает с увеличением зенитного угла, достигая максимума при энергиях 1–10 ГэВ. Величина интенсивности потоков мюонов определяет время экспозиции детекторов, необходимое для получения наиболее информативной томограммы объекта.

Физический принцип МР основан на двух эффектах: 1) ослаблении мюонных потоков в толстом поглотителе вследствие электромагнитных процессов (ионизации, тормозного излучения, рождения электрон-позитронных пар) и 2) различии характеристик упругого рассеяния заряженных частиц на ядрах различных веществ. Первый эффект состоит в том, что поток высокоэнергетичных мюонов постепенно ослабляется по мере его проникновения в глубь вещества в результате потерь энергии

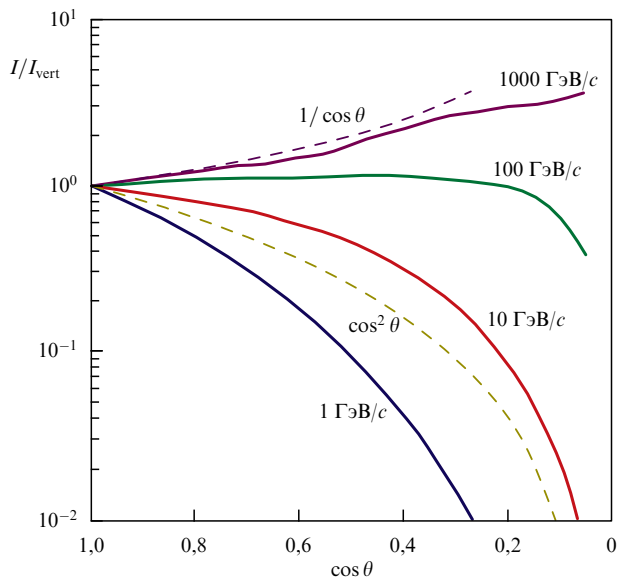


Рис. 4. Интенсивность потоков мюонов по отношению к интенсивности их вертикального потока у поверхности земли в зависимости от косинуса зенитного угла θ траектории [10]. Угловые распределения для мюонов с импульсами 1, 10, 100 и 1000 ГэВ/с с учётом кривизны атмосферы Земли оценены с помощью метода Монте-Карло.

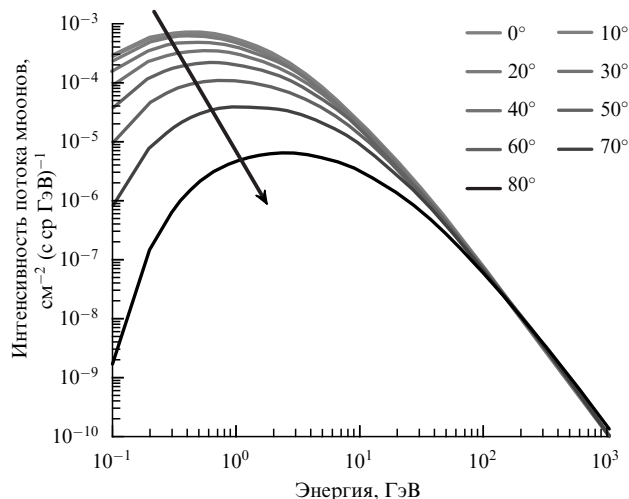


Рис. 5. Интенсивность потоков мюонов в атмосфере Земли в зависимости от их энергии для значений зенитного угла θ в диапазоне от 0 до 80°. (Из работы [12].)

за счёт электромагнитных процессов, при этом прохождение через вещество с большим зарядовым числом приводит к большему ослаблению потока зондирующего излучения. Расчёт поглощения вертикального потока мюонов с увеличением массы вещества над регистрирующей аппаратурой может быть проведён на основе их энергетического спектра. Дифференциальный энергетический спектр мюонов на уровне моря, который хорошо изучен, может быть приближённо описан следующей формулой [13]:

$$\frac{d^2 N_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0,14 E_\mu^{-2,7}}{\text{ГэВ см}^2 \text{ с ср}} \left(\frac{1}{1 + 1,1 E_\mu \cos \theta / (115 \text{ ГэВ})} + \frac{0,054}{1 + 1,1 E_\mu \cos \theta / (850 \text{ ГэВ})} \right), \quad (1)$$

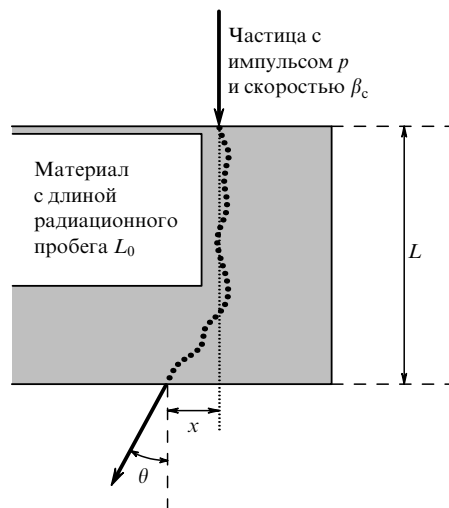


Рис. 6. Результат многократного кулоновского рассеяния заряженной частицы при прохождении слоя вещества. (Из работы [16]).

где N_μ — количество мюонов, Ω — телесный угол, два члена в скобках в правой части представляют собой вклады от пионов и заряженных каонов соответственно. Здесь не учтены связанные с очарованием и более тяжёлыми ароматами небольшие вклады, которые могут быть значимыми только при очень высоких энергиях [14].

Следует отметить, что при проведении экспериментов по мюонной радиографии точное описание спектра атмосферных мюонов может быть не очень существенным, если измерения проводятся на позициях до и после исследуемого объекта.

Если на пути потока космических мюонов встречается вещество с другой плотностью, то интенсивность электромагнитного взаимодействия частиц изменяется, что приводит к изменению интенсивности поглощения потока в этой области. Как показано в [15], на относительно малых глубинах ($h < 200$ м в.э.) интенсивность вертикального мюонного потока $J_{\text{vert}}(h)$ уменьшается по степенному закону со слабо изменяющимся показателем и её зависимость от состава пород относительно невелика. На больших глубинах ($h > 2000$ м в.э.) интенсивность убывает экспоненциально, и её величина значительно зависит от состава пород. В промежуточной области глубин вследствие большего вклада потерь, пропорциональных энергии, и быстрого спада вертикального спектра на уровне моря при больших энергиях происходит качественное изменение вида зависимости $J_{\text{vert}}(h)$ — степенная зависимость сменяется экспоненциальной.

Второй эффект связан с тем, что заряженная частица, движущаяся в веществе, испытывает большое число упругих рассеяний в кулоновском поле ядра, приводящих к изменению направления её движения практически без потерь энергии (многократное кулоновское рассеяние) (рис. 6).

Отклонение траектории мюона от первоначального направления может быть описано зависимостью, близкой к гауссовой со среднеквадратичным значением [17]:

$$\langle \theta \rangle = \frac{14,1 \text{ МэВ}}{p\beta} \sqrt{\frac{L}{L_0}}, \quad (2)$$

где p — импульс мюона ($\approx 3-4$ ГэВ/с на уровне земли [18]); β — скорость мюонов (≈ 1); L — толщина поглотителя; L_0 — радиационная единица длины для данного вещества. С увеличением заряда ядра поглотителя степень рассеяния (рассеяние на единицу длины) возрастает. Однако многочисленные исследования рассеяния мюонов на ядрах различных веществ [19] показали, что величина $\langle \theta \rangle$ достаточно мала даже для ядер с большим зарядом Z ($\sim 1,5^\circ$ для $Z > 82$). Поэтому некоторое размытие картины крупного объекта будет не очень существенным.

Более точные модельные расчёты прохождения мюонов через вещество проводятся, в частности, с помощью широко известного пакета GEANT4², который разработан для моделирования прохождения элементарных частиц и ядер через сложные установки в экспериментах на ускорителях [20–22]. Авторы данной статьи с использованием пакета GEANT4 провели моделирование прохождения мюонов через слои грунта и железа [23]. На рисунке 7 показаны просуммированные по φ распределения числа мюонов по углу θ с начальной энергией $E = 98$ ГэВ, прошедших слои грунта толщиной $L = 110$, 130 и 150 м (полный пробег мюонов в грунте при этой энергии 172 м). Это распределение по углу может быть аппроксимировано функцией $F = A\theta \exp[-(\delta\theta)^2]$. Такая форма распределения числа частиц соответствует распределению потока (т.е. числу частиц на единицу площади) в виде функции Гаусса с тем же параметром δ . Зависимость параметра $\delta(E, L)$ от E при фиксированной толщине L может быть аппроксимирована линейной функцией [23].

По величине потока, зарегистрированного детектором в определённом направлении, можно судить о степени поглощения мюонов и, следовательно, о характере грунта и имеющихся в этом направлении инородных включениях. Сравнивая плотность мюонного потока Φ после прохождения через мишень со свободно падающим из атмосферы потоком Φ_0 , приходящим в том же направлении, можно определить среднюю плотность объекта в данном направлении. Поток мюонов, выходящих из объекта исследования, формируют частицы, энергия которых достаточна для прохождения через объект. Окончательное количество мюонов, зарегистрированных в направлении объекта, зависит от мюонного потока, входящего в мишень, времени экспозиции, длины пути мюона в объекте, плотности материала и чувствительности детектора.

В отличие от медицинской томографии [24], в которой применяется источник излучения с заданными характеристиками, предлагаемая методика мюонной радиографии использует излучение, имеющее разброс по энергиям и углам падения, что требует информации об угловом распределении зондирующего излучения.

Имеются два принципиально разных метода просвечивания объектов:

а) метод поглощения [25], в котором измеряется дифференциальное поглощение частиц в объекте. Этот метод лежит в основе мюонной радиографии и медицинской радиографии (использующей рентгеновское излучение). С помощью данного метода нельзя извлечь информацию, которую несёт отдельная частица, а можно получить только усреднённую картину — двумерную

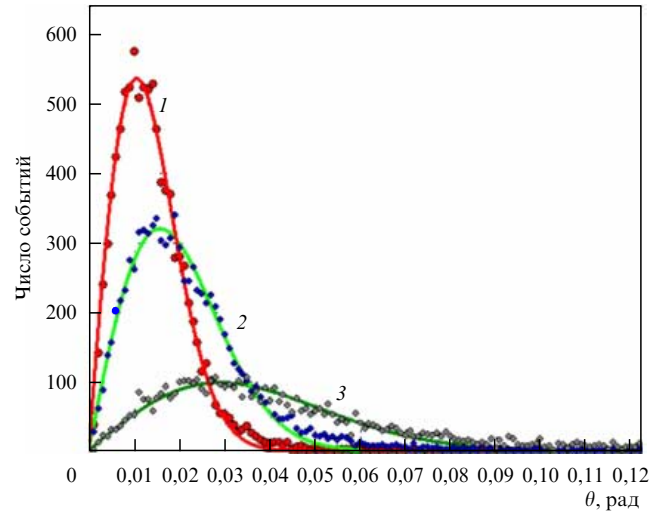


Рис. 7. Распределения по углу θ числа частиц при прохождении мюонами расстояния 110 м (кривая 1), 130 м (кривая 2) и 150 м (кривая 3) через скальный грунт. Аппроксимация функцией $F = A\theta \exp[-(\delta\theta)^2]$ [23].

дифференциальную карту плотностей, причём для её построения должен быть известен входной спектр. Эта карта является угловой в случае мюонной радиографии и координатной в случае медицинской;

б) метод рассеяния, в котором используется два детектора: один сверху и один снизу, настроенные на совпадение, и для каждой отдельной частицы измеряются её координата и/или угол как на входе в объект, так и на выходе из него. Этот метод чувствителен не столько к плотности, сколько к Z , и даёт сразу трёхмерную (3D) информацию. При этом наличие сведений о исходном спектре в общем случае не обязательно, особенно если нижний детектор измеряет ещё и энергию.

Метод б, возможно, заслуживает право называться томографией.

Метод а может ею стать, если, сделав несколько снимков (радиографий) с разных точек, затем решить обратную задачу, получив таким образом объёмную информацию.

3. История и возможности метода мюонной радиографии

Первое предложение о использовании космического излучения для решения задач геологоразведки (изучение запасов свинцовых руд Садонского месторождения) было высказано Петром Петровичем Лазаревым, основателем и первым главным редактором журнала *Успехи физических наук (УФН)* [26], ещё в 1926 г. на заседании секции физико-математических наук Общего собрания Академии наук (АН) СССР. Спустя почти 30 лет, в 1955 г., идеи П.П. Лазарева были частично реализованы в Австралии для измерения ослабления вертикального потока космических мюонов с целью оценки толщины пород над горной выработкой [27]. В этих исследованиях использовался счётчиковый телескоп — детектор из четырёх рядов счётчиков Гейгера. С целью регистрации только жёсткой компоненты космического излучения между рядами счётчиков были проложены слои свинца толщиной 10 см. Регистрировались только частицы, прошедшие через все четыре ряда счётчиков. Таким

² GEANT — от англ. GEometry ANd Trucking.

образом исключались любые эффекты, связанные с фоновым воздействием радиоактивных излучений. Мощности и массы горных пород определялись посредством сравнения интенсивности космических лучей, зарегистрированных в разных точках тоннеля, с калибровочной кривой. Глубина тоннеля, которая была найдена с точностью $\pm 5\%$, составила $163,0 \pm 8,0$ м в.э.

Использование свойств космических мюонов для целей геологической разведки получило активное развитие в СССР в 1960-е годы [28]. В 1961 г. совместными усилиями сотрудников Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР (ИЗМИРАН) и группы из Московского геологоразведочного института (МГРИ) был создан прибор для подземной регистрации космических лучей, в котором использовались два сцинтилляционных счётчика площадью $0,02$ м² [29, 30]. Прибор позволял определять потоки мюонов в шахтах на глубине до 100 м с точностью около 10%. В 1965 г. для увеличения точности подземных измерений в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) был изготовлен прибор направленного действия *Измеритель интенсивности космических лучей 1* (ИИКЛ-1). Он представлял собой шахтный телескоп, состоящий из четырёх рядов газоразрядных счётчиков площадью около 1 м² (по 12 счётчиков в каждом ряду), смонтированных на общей вращающейся ферме и включённых параллельно (рис. 8).

Для исследований скважинным методом был изготовлен более компактный прибор — измеритель интенсивности космических мюонов на черенковских счётчиках в виде небольшого, диаметром около 10 см, телескопа, в котором небольшие габариты сочетались с простотой устройства и малой чувствительностью к излучению горных пород и изменению температуры под землёй [31]. Прибор можно было опускать в буровые скважины, а всю информацию выводить по кабелю к регистрирующим блокам на поверхности земли. Измерения потоков частиц на нескольких уровнях погружения позволили использовать дифференциальный метод определения плотности отдельных слоёв горных пород.

В конце 1960-х годов мюонный метод был применён для изучения плотности грунта на площадке, предназначенной для установки радиотелескопа АН СССР

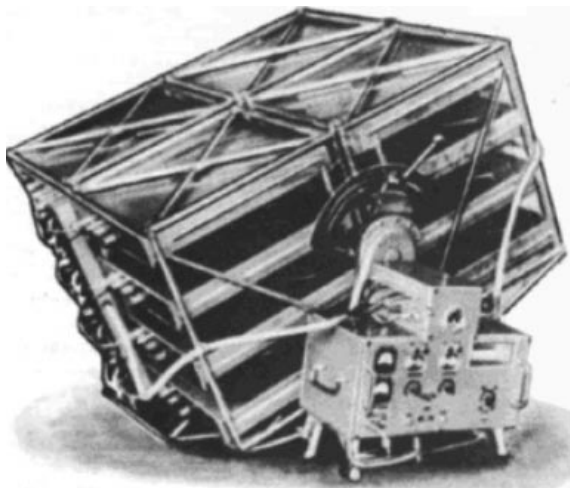


Рис. 8. Мюонный телескоп ИИКЛ-1, созданный в ФИАНе, для проведения геологических исследований в шахтах.

РАТАН-600. Галечниковые породы, служившие естественным основанием для этой конструкции, являются, как правило, очень неоднородными по составу, представляя собой смесь валунов, песка, глины и гальки. Глубина залегания грунтовых вод составляла от 2 до 8 м от основания телескопа. В этих сложных гидрогеологических условиях альтернативные методы определения плотности пород имели крайне ограниченное применение, в то время как мюонный метод позволил получить детальную картину распределения плотности пород. Метод оказался достаточно помехоустойчивым, поскольку плотность определялась для больших объёмов пород, что исключало влияние малых геологических неоднородностей. Кроме того, выбор такого метода был оправдан возможностью использовать герметизированные приборы в заполненных водой скважинах. Всего было пробурено 35 скважин, в каждую из которых на глубины от 3 до 10 м вводился малогабаритный прибор ИИКЛ-2, регистрировавший излучение Вавилова–Черенкова от проникающих мюонов. Обработка данных дала возможность построить сложную картину кривых равной плотности грунта (карты изоден) при вариациях плотности от $1,85$ до $2,7$ г см⁻³ [31, 32].

В работах, проведённых в МГРИ под руководством В.М. Бондаренко [15], было показано, что изменение массы вещества, расположенной над регистрирующей аппаратурой, на $\geq 10\%$, например, за счёт рудной залежи приводит к изменению плотности потока мюонов на величину, которая может быть достаточно надёжно измерена за приемлемое с практической точки зрения время. Изучение углового распределения потоков мюонов позволило авторам разработки предложить пространственно-угловую модификацию мюонного метода, основанную на одновременном измерении потоков мюонов в малых телесных углах, распределённых по различным зенитным и азимутальным направлениям. Предложенная модификация позволила получить бóльшую разрешающую способность по сравнению с таковой при интегральной модификации в широких апертурных углах.

По величине зарегистрированного потока мюонов можно также контролировать прокладку горных тоннелей. Определяя в различных точках тоннеля потоки мюонов в разных направлениях, а по ним — соответствующие расстояния до земной поверхности (по общей толщине горных пород в поле зрения телескопа), можно проверять, в какой мере положение тоннеля в толще горы соответствует намеченным планам его проходки. Подобным методом была оценена эффективность радиационной защиты кольцевого здания серпуховского циклотрона Института физики высоких энергий (ИФВЭ), г. Протвино. Установив телескоп в разных точках кольцевого тоннеля ускорителя, группа из МГРИ осуществила контроль защитного кольца протяжённостью $\approx 1,5$ км. В результате были выявлены области, в которых вследствие строительных особенностей сооружения, а также других причин защитный слой имел массу, меньшую нормативной [33]. Ещё одним примером применения метода МР в инженерной геологии является задача определения давления на грунт какого-либо сооружения. Поместив детектор в тоннеле под зданием, можно оценить, регистрируя величину прошедшего сквозь него мюонного потока, эффективную плотность здания и определить его массу. Так была

определена масса здания гостиницы "Москва", составившая примерно 45 тыс. тонн.

В 1970-е гг. в СССР мюонный метод на основе электронной телескопической аппаратуры успешно применялся для решения следующих задач:

— определение свойств горных пород в естественном залегании, таких как средняя и послойная плотность и коэффициент разрыхления пород [34, 35];

— обнаружение, определение местоположения и оценка объёма рудных тел на различных месторождениях [36, 37];

— изучение развития зон обрушений в пространстве и времени, а также решение задач, связанных с исследованиями эффективности биологической защиты излучающих устройств [33];

— изучение скорости снегонакопления в лавиноопасных горных областях [38], оценка давления наземных сооружений на грунт и др.

Одним из самых первых известных зарубежных экспериментов с применением жёсткой компоненты космического излучения стало исследование египетской пирамиды Хефрона группой учёных под руководством Л. Альвареса [39, 40]. Этот эксперимент, нацеленный на обнаружение потайных помещений в теле пирамиды, из-за недостаточно высокого углового разрешения детектора (искровой камеры) и непростых внешних политических обстоятельств не дал количественного результата. Тем не менее метод "просвечивания" пирамид космическими лучами был признан перспективным, поскольку позволил получить изображение самой пирамиды в потоке мюонов, и получил дальнейшее развитие. В аналогичном эксперименте (Scan Pyramids Project), проведённом интернациональной группой в апреле 2016 г., был сделан первый "мюонографический" снимок внутренней структуры так называемой ломаной пирамиды Снофру в Дашхуре, старейшей неступенчатой пирамиды Древнего Египта [41]. Полученное с помощью нескольких эмульсионных трековых камер 3D-изображение позволило обнаружить внутри пирамиды ранее неизвестные ходы и помещения (рис. 9). Та же группа исследователей осуществила поиск неизвестных пустот в теле пирамиды Хеопса (Great Pyramid of Khufu). Экспозиция эмульсионных трековых детекторов в течение 67 сут летом 2016 г. подтвердила с высокой достоверностью (5σ) предположение о существовании неизвестной ранее полости за северным фасадом пирамиды [42]. Планирование экспериментов по "просвечиванию" археологических объектов продолжается [43]³.

В настоящее время одной из наиболее распространённых областей применения метода МР является изучение вулканов [45–55]. Эти исследования осложнены наличием неопределённости, касающихся состава грунта, протяжённости траекторий мюонов и неоднородности состава лавы (см. раздел 4). Задача решается с помощью

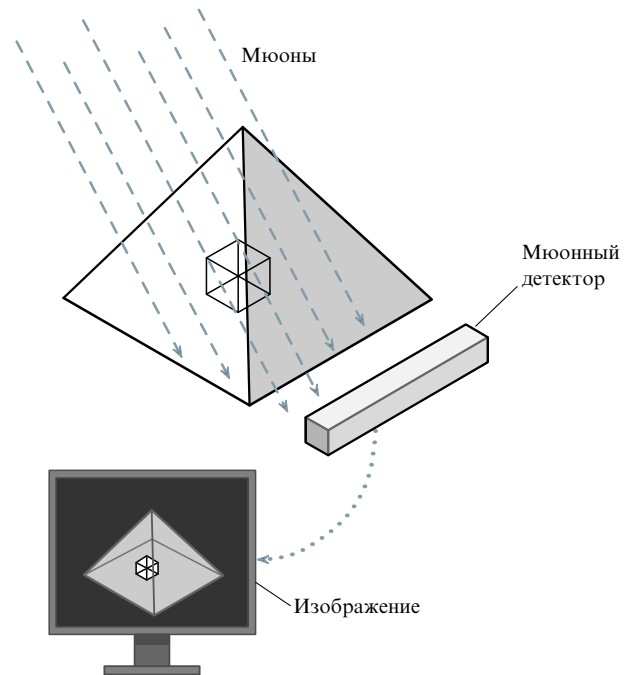


Рис. 9. Схема эксперимента по поиску скрытых помещений в теле пирамид.

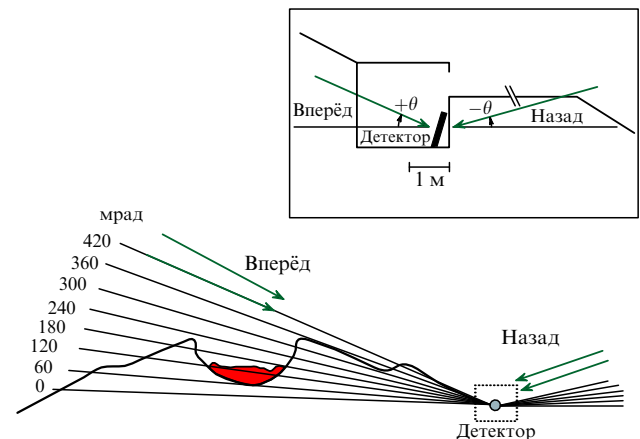


Рис. 10. Геометрия эксперимента по изучению внутренней структуры вулкана. Линиями показаны траектории космических мюонов окологоризонтального потока, регистрируемых детектором [56].

последовательных приближений с проведением серий угловых измерений потока мюонов, проходящих через гору, а также в фоновом режиме (поглощение в атмосфере) для нормировки углового спектра по абсолютной интенсивности (рис. 10).

К важным проблемам геологии, в решении которых может помочь метод мюонной радиографии, относится изучение пустот в горных породах. Такие пустоты часто имеют карстовую природу, т.е. образуются в результате вымывания растворимых соединений (например, известняка), но могут появляться и из-за обрушений в старых шахтах, в местах эксплуатации рудных залежей [57, 58]. В Советском Союзе такие исследования были проведены в 1973–1977 гг. на Тырнаузском месторождении Северного Кавказа (рис. 11) [59]. Измерения потоков мюонов в одной и той же точке под землёй выявило их значительное увеличение с течением времени. Эти временные из-

³ Во время подготовки настоящей статьи к печати появилась публикация К. Моришими с соавторами [44], в которой сообщалось об обнаружении в пирамиде Хеопса впервые с помощью ядерно-фотоземлюсионных детекторов ранее неизвестной пустой камеры длиной 30 м и поперечным сечением, аналогичным сечению Большой галереи. Этот результат был подтверждён с высокой надёжностью в двух независимых измерениях методом МР с использованием детекторов других типов (сцинтилляционных и газовых). Эта камера является первой крупной внутренней структурой, найденной в пирамиде с XIX в.

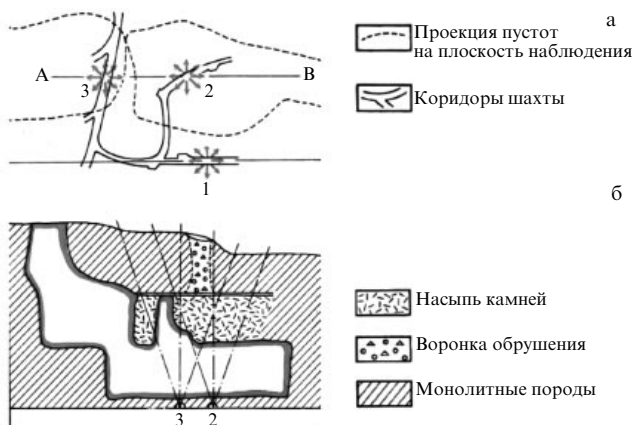


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Схема расположения годоскопов 1–3 на глубине 250 м в горных выработках Тырнаузского месторождения (а) и вертикальный разрез этого месторождения по линии АВ (б). Жирной розовой кривой показаны контуры камеры, образовавшейся после добычи руды в 1973 г. Двумя годами позднее с помощью мюонного детектора было обнаружено, что часть горных пород, образующих потолок камеры, обрушилась, причём в некоторых местах вплоть до поверхности земли, сформировав так называемую воронку обрушения. Штрихпунктирные линии на рис. б показывают поля зрения приборов в точках 2 и 3 [59].

менения потоков мюонов находились в хорошем согласии с предположением об увеличении пустой полости из-за естественного обрушения потолка и стен горной выработки. Подобное систематическое наблюдение за динамикой роста пустот на эксплуатируемых месторождениях чрезвычайно важно с точки зрения безопасности подземных работ, так как именно катастрофическое расширение пустот с последующим стремительным обрушением пород создаёт серьёзную опасность при добыче руды в расположенном над ними карьере. Метод МР позволяет выделить опасные для эксплуатации зоны геологических разработок. Пустоты с большой плотностной контрастностью являются благоприятным объектом для изучения методом МР, поскольку чувствительность метода позволяет обнаружить и локализовать пустоты, мощность которых составляет 5–7% от глубины наблюдения [60]. Помимо того, метод даёт ценную информацию о степени разрыхления обрушившихся геологических пород.

В настоящее время в разных странах разрабатываются новые проекты по исследованию методом МР ледниковых плит [61], геологических объектов Марса [62], пожароопасных углеродных отвалов, промышленных объектов [63, 64], объектов ядерной энергетики [65], а также по созданию новых методов разведки полезных ископаемых [66]. Отдельно необходимо отметить проекты по мониторингу методом МР состояния активной зоны реактора атомной станции Фукусима-1 в Японии, повреждённого цунами в 2011 г. [67].

Большинство из перечисленных исследований основано на измерении ослабления потоков космических мюонов после прохождения изучаемого объекта (так называемая односторонняя мюонная радиография на основе метода поглощения).

Принципиально иной подход к подобным исследованиям, называемый методом мюонной томографии (метод двусторонней радиографии (метод рассеяния), позволяющий реконструировать послойную структуру объ-

екта посредством его многократного просвечивания в пересекающихся направлениях), впервые был предложен в 2003 г. сотрудниками Лос-Аламосской лаборатории для контроля за несанкционированным перемещением ядерно-активных материалов [68]. Целью таких экспериментов является получение томографических изображений объектов из материалов с большим зарядом ядра Z на основе эффекта многократного кулоновского рассеяния космических мюонов [69–72]. Аппаратура содержит два позиционно-чувствительных детектора, между которыми может находиться изучаемый объект. Координатные детекторы обеспечивают измерение треков мюонов до и после прохождения контролируемого объёма. Нижний детектор, в котором происходит рассеяние в веществе с известной плотностью, служит для определения энергии мюонов.

Благодаря высокой энергии и большой массе мюона относительно малое рассеяние индивидуальных траекторий мюонов (порядка нескольких миллирадиан) легче всего может быть отслежено при размещении измерительной аппаратуры непосредственно до и после объекта. Проведя статистический анализ некоторого числа треков, прошедших через контролируемый объём, можно выделить в нём области с аномальным рассеянием пересекающих их мюонов. Метод позволяет проводить не только разделение веществ с низким и высоким значениями заряда Z и их классификацию по группам ядер (группа 1 — C, Al, SiO₂; группа 2 — Fe, Ni, Cu; группа 3 — Pb, W, U), но и восстановление пространственного распределения веществ с различными Z [16, 73–79]. Важно то, что при таком подходе — в двустороннем методе — размер детектора должен превышать размер объекта или быть с ним сравнимым, тогда как при одностороннем методе объект может быть гораздо крупнее детектора, хотя размер детектора тоже может быть велик. Двусторонний метод технически существенно сложнее, но если есть возможность его применить, то для "своих" задач он оказывается гораздо более эффективным. Проведение эксперимента с одним детектором требует значительно более продолжительной экспозиции (несколько месяцев вместо нескольких дней), удобство детекторов односторонней мюонной радиографии делает её предпочтительной в тех случаях, когда применимы оба варианта, и незаменимой тогда, когда размер изучаемого объекта гораздо больше размеров детектора.

Далеко не полный перечень экспериментов, приведённый в этом разделе, представлен с целью проиллюстрировать диапазон возможностей метода МР.

4. Измерительная аппаратура и особенности постановки экспериментов

В качестве измерительной аппаратуры для МР применяются дрейфовые [80], пропорциональные (multi-wire proportional chambers, MWPC) [81, 82], резистивные плоские камеры (resistive plate chambers, RPC) [69] и др. В экспериментах с использованием метода односторонней мюонной радиографии наибольшее распространение получила электронная аппаратура на сцинтилляторах, которая широко применяется японскими, итальянскими и французскими исследователями для изучения состояния вулканов и тектонических сейсмических зон [52, 53, 83, 84], а также состояния доменных печей [48]. Амери-

канские и канадские исследователи разрабатывают метод МР на основе электронной аппаратуры в основном с целью поиска полезных ископаемых [66] и контроля за состоянием ядерных реакторов [65]. Как правило, электронная регистрирующая аппаратура для односторонней радиографии представляет собой годоскопические устройства (телескопы) большой площади, с помощью которых можно обнаружить и выделить частицы определённого типа, установить угловое распределение излучения и найти его абсолютную интенсивность [75, 85–88]. Найденная связь между энергией частицы, её энергетическими потерями и атомным зарядом ядра может быть использована в случае применения электронной аппаратуры, в частности, для определения массы полезного компонента рудных тел, а именно, по данным о интенсивности отдельных энергетических интервалов мюонов можно оценить запасы месторождений полезных ископаемых.

Примером использования электронной аппаратуры является эксперимент Diaphane — первый европейский эксперимент по изучению вулканов методом МР [52, 84, 89]. Детектор (телескоп), состоящий из пластиковых сцинтилляторов, пиксельных фотоумножителей и электронной считывающей системы на основе оптоволокон, имеет три независимые регистрирующие ху-панели с автоматическим режимом запуска (рис. 12). Событие (прохождение мюона) регистрируется в квазионлайн-режиме, посредством сортировки всех поступивших сигналов по времени совпадения. Питание детектора осуществляется солнечными батареями. Детекторы на основе пластиковых сцинтилляторов имеют низкое энергопотребление и являются относительно нечувствительными к условиям окружающей среды, что важно в полевых условиях.

Из всех детекторов, применяемых в односторонней МР, наилучшим угловым разрешением — несколько миллирадиан — обладают эмульсионные трековые детекторы [49, 56, 90–96]. Регистрация мюонов в большинстве проводимых в настоящее время экспериментов происходит в ядерной фотоэмульсии, нанесённой с двух сторон на триацетатную основу размером $10 \times 12 \text{ см}^2$ [97, 98]. Фотографическая эмульсия представляет собой суспензию с включением светочувствительных микрокристаллов галогенидов серебра, равномерно распределённых в желатине или другом защитном коллоиде [99, 100]. При прохождении заряженной частицы через кристалл в некоторых из зёрен эмульсии энергия поглощается кристаллом бромистого серебра, что приводит к образованию агрегата из некоторого числа атомов серебра, который может стать центром скрытого изображения. Образование скрытого изображения (т.е. способного к проявлению следа ионизирующей частицы) в ядерной эмульсии происходит вследствие взаимодействия между заряженной частицей и электронами атомов эмульсии. Таким образом, каждая заряженная частица, проникающая в слой эмульсии, благодаря своей ионизирующей способности оставляет за собой более или менее толстый след засвеченных зёрен галоидного серебра. После обработки плёнки специальным проявителем эти зёрна превращаются в частицы металлического серебра и становятся чёрными, поскольку они состоят из мелкодисперсных кристаллических агрегатов. В результате после химической обработки этот след виден под микроскопом как цепочка из отдельных точек или как сплошная

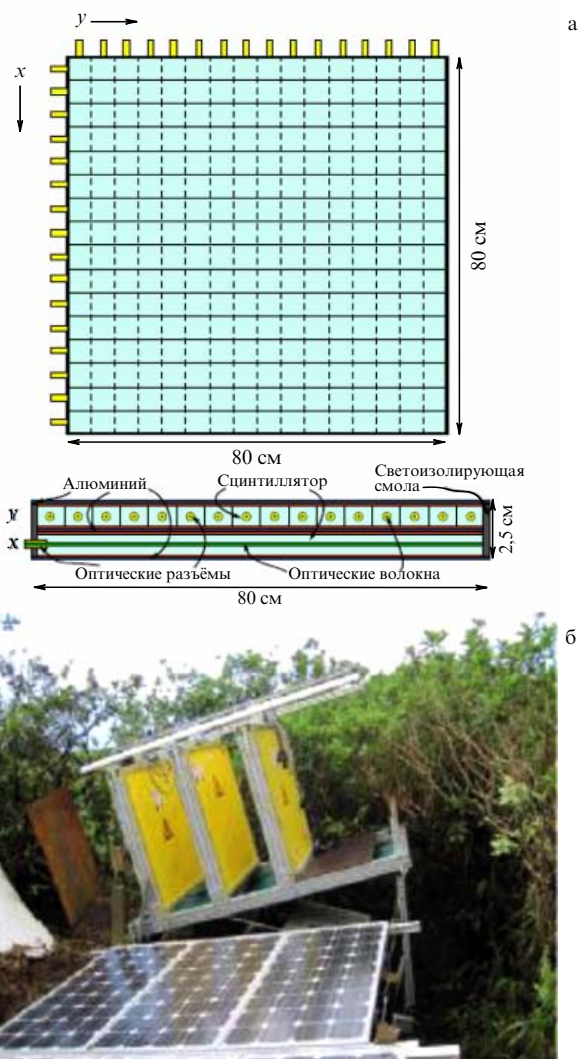


Рис. 12. (а) Одна ху-панель — матрица из 16×16 пикселей площадью $0,8 \times 0,8 = 0,64 \text{ м}^2$, в нижней части рисунка показано поперечное сечение панели. (б) Телескопическая установка из трёх регистрирующих ху-панелей, установленная на месте проведения эксперимента [84].

линия, в зависимости от величины заряда частицы (рис. 13). Цепочки проявленных зёрен серебра позволяют восстановить траекторию частицы в пространстве с большой точностью (угловая точность измерений составляет несколько миллирадиан).

Эмульсионные детекторы для МР представляют собой автономные модульные, легко перемещаемые устройства [98], не требующие дополнительных источников электропитания и присутствия оператора, что позволяет им успешно конкурировать с электронными детекторами для регистрации зондирующего излучения. В числе основных преимуществ эмульсионных детекторов перед электронной аппаратурой можно отметить следующие.

1. *Высокая разрешающая способность* — одна из важнейших характеристик эмульсионных трековых детекторов, обусловленная свойствами ядерной эмульсии. Ни один из ныне известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственного разрешения, которое даёт ядерная эмульсия: при размере зерна $0,3\text{--}1 \text{ мкм}$ отклонение зёрен от восстановленной

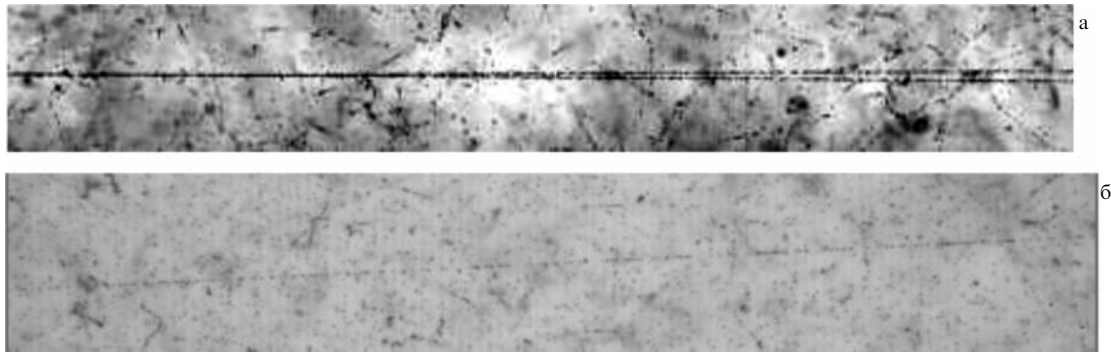


Рис. 13. (а) Фрагментация релятивистского ядра ${}^9\text{Be}$ с образованием двух α -частиц в ядерной эмульсии [101]. Трёхмерное изображение события реконструировано с помощью микрофотографирования на измерительном комплексе ПАВИКОМ (аббр. от *Полностью автоматизированный измерительный комплекс*) (ФИАН) [102]. (б) Трек π -мезона с энергией 10 ГэВ [102].

траектории движения частицы в среднем не превышает 0,8 мкм, а при определённых условиях может составлять 0,2 мкм. (Для сравнения, пространственное разрешение искровой камеры 0,3 мм.) Подчеркнём, что использование двусторонней эмульсии позволяет достигать точности в определении углов порядка нескольких миллирадиан.

2. *Возможность длительной экспозиции в сложных условиях.* Эмульсионные детекторы МР, надёжно защищённые от неблагоприятных внешних воздействий, могут экспонироваться в сложных условиях, вплоть до экстремальных (например, вблизи вулканов или при повышенной радиации в зоне разрушенных ядерных реакторов).

3. *Простота конструкции и небольшие размеры детектора,* которые позволяют устанавливать его в непосредственной близости от объекта. Это также является преимуществом для создания трёхмерной карты плотности исследуемой структуры (промышленного или геологического объекта) при получении информации с нескольких детекторов, регистрирующих мюонные потоки с разных точек наблюдения.

4. *Небольшие размеры и относительная дешевизна эмульсионных детекторов.* Их малый размер, по сравнению, например, с размером электронных детекторов, позволяющий получить требуемую точность измерений, является ещё одним преимуществом эмульсионных детекторов (рис. 14). Трековые детекторы на основе ядерных фотоэмульсий при своих относительно малых размерах обладают большой информационной ёмкостью. Поскольку количество эмульсионного геля, необходимое для создания одного детектора МР, составляет от нескольких десятков до нескольких сотен грамм, цена такого детектора является довольно низкой.

5. *Независимость от источников энергии.* Эмульсионные плёнки, являющиеся основой детекторов МР, не требуют энергоснабжения и электронной считывающей системы, что является существенным преимуществом в сложных условиях эксперимента.

6. *Отсутствие необходимости оперативного контроля за ходом эксперимента* в течение всего времени экспозиции.

Кроме того, сами детекторы не являются источниками загрязнения окружающей среды.

Из недостатков эмульсионных трековых детекторов можно отметить невозможность получения данных он-

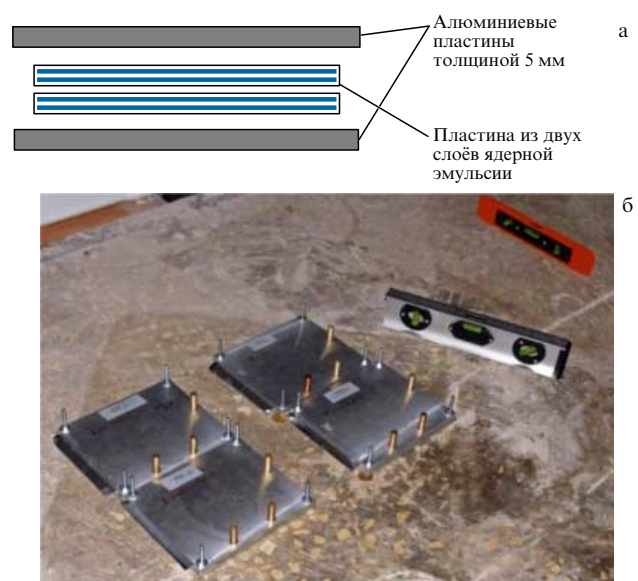


Рис. 14. (а) Схема сборки детектора с ядерными эмульсиями площадью $10 \times 12 \text{ см}^2$, зафиксированными с помощью алюминиевых пластин. (б) Установка эмульсионных детекторов в эксперименте с использованием МР [98].

лайн, необходимость длительной, до нескольких месяцев, экспозиции и трудоёмкость обработки полученной информации. Однако благодаря непрерывному совершенствованию автоматизированной измерительной техники последний недостаток в настоящее время полностью устранён. Эта техника позволяет сканировать эмульсионные плёнки со скоростью до $800 \text{ см}^2 \text{ ч}^{-1}$ с 50-кратным увеличением, что, учитывая микрометровые размеры треков, обеспечивает возможность высокоскоростной обработки больших массивов данных [67, 103–106]. Эмульсионные детекторы незаменимы при исследовании внутреннего состояния ядерных объектов при их повреждении в результате стихийного бедствия и в случае невозможности проведения измерений иными способами (когда объект обесточен или существует опасность пребывания людей в зоне реактора). Так, именно с помощью эмульсионных детекторов осуществлялся контроль за состоянием реактора атомной станции Фукусима-1 (Япония), повреждённого цунами в 2011 г. [67] (рис. 15).

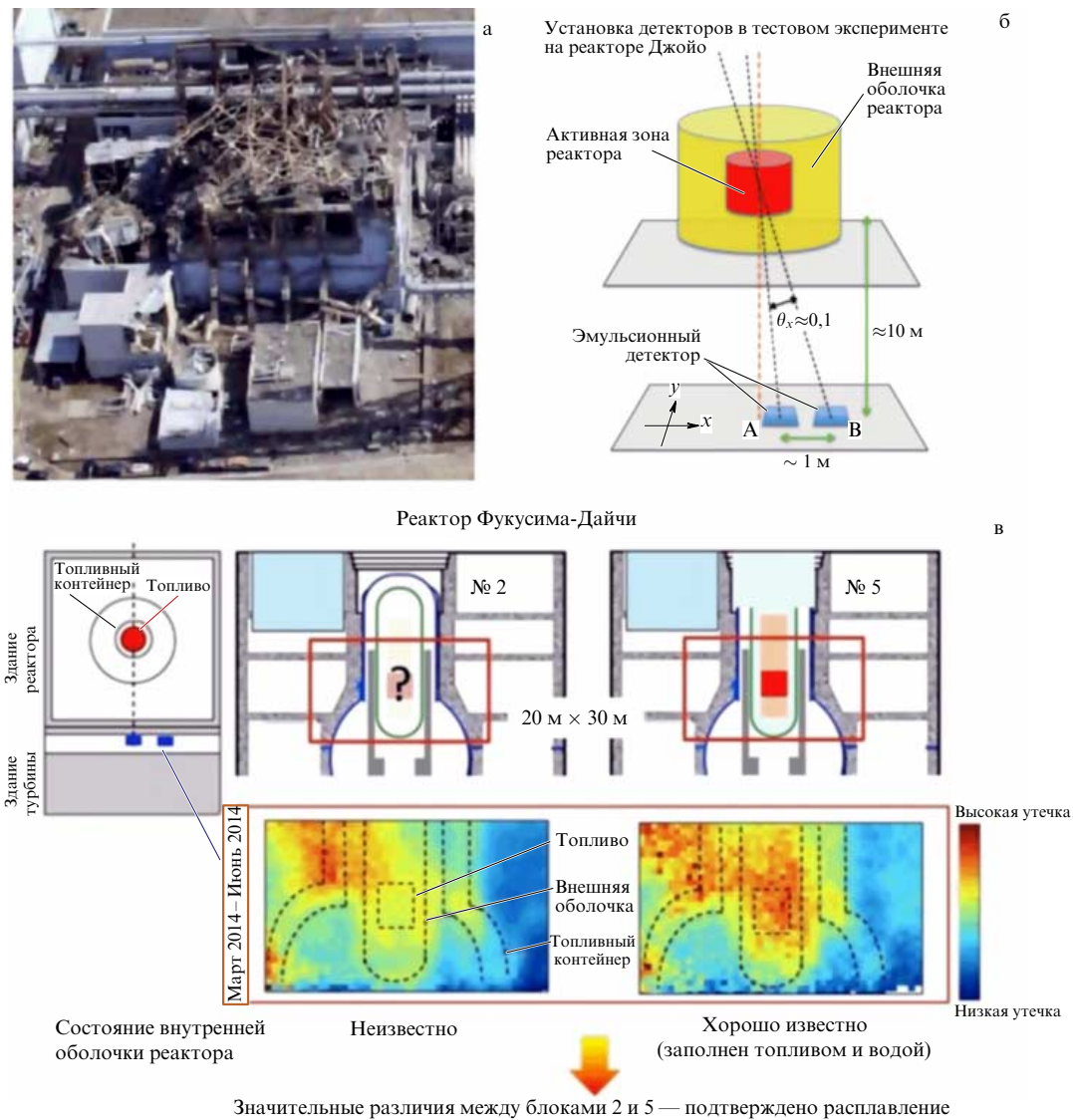


Рис. 15. (а) Разрушенный реактор атомной станции Фукусима. (б) Схема установки эмульсионных камер на работающем реакторе Джойо (Япония) для тестового эксперимента по контролю за состоянием реактора методом мюонной радиографии. θ_x — угол в плоскости xu . (в) Результат измерений на разрушенном реакторе Фукусимы, полученный с помощью ядерно-эмульсионных детекторов. Приведены изображения двух идентичных ядерных энергоблоков, 2 и 5, полученные с помощью одинаковых эмульсионных детекторов, установленных одинаковым образом, с марта по июль 2014 г. Блок 5 не повреждён, и его реактор заполнен водой и топливом. Сравнивая изображения, можно сделать выводы об утечках веществ из реактора энергоблока 2 — расплавилось более 70 % топлива.

Реальные эксперименты с использованием метода односторонней мюонной радиографии имеют ряд особенностей, в большей или меньшей степени усложняющих интерпретацию полученных данных для восстановления структуры объекта.

1. Спектр космических мюонов не является монохроматическим, а степень поглощения излучения зависит от энергии частиц, что вносит неопределённость при оценке плотности различных участков объекта.

2. Поток мюонов испытывает временные и пространственные вариации, зависящие от циклов солнечной активности (сезонные, 11-летние, связанные с солнечными вспышками и др.) [10, 107–109]. Дополнительные неопределённости обусловлены зависимостью потока мюонов от географического положения объекта и связаны с геомагнитным полем Земли в данной точке, высотой объекта над уровнем моря и метеозффектами [10, 110]. Эти неопределённости сказываются для час-

тиц с энергиями $E_\mu \sim 1-10$ ГэВ. Вариации потоков космических частиц, разнообразные по своим причинам, могут достигать нескольких десятков и даже сотен процентов в атмосфере Земли, однако под землёй они не выходят за пределы 1–3 % [111]. Резкое уменьшение амплитуды вариаций под землёй объясняется тем, что флуктуации интенсивности во времени в основном связаны с частицами малой энергии, которые поглощаются на глубинах не более чем несколько метров от поверхности земли. В частности, амплитуда вариаций интенсивности мюонной компоненты под землёй и на её поверхности (в период отсутствия солнечных вспышек) не превышает 3–5 %. Следовательно, если поток мюонов измеряется с погрешностью более чем 3 %, то влиянием этих вариаций на величину регистрируемого потока мюонов можно пренебречь. При более высокой точности измерений необходимо учитывать этот вид помех.

3. Плотность основной части облучаемого объекта, вообще говоря, тоже неоднородна, что в некоторой степени уменьшает различие в потоках мюонов от основной части и изучаемых неоднородностей. Влияние неопределённости химического состава при оценке плотности горных пород, попадающих в поле зрения детектора, сравнительно невелико, особенно на небольших (до 500 м) глубинах, где поглощение мюонов определяется потерями их энергии только на ионизацию атомов вещества. Для эффективного атомного номера и атомного веса стандартной горной породы поправка на различие химического состава стандартной горной породы и большинства реальных пород обычно не превышает 1–2% [34]. Влияние этого фактора возрастает на глубинах более 1 км, куда проникают мюоны с энергиями $\gtrsim 10^{12}$ эВ. При таких энергиях основную роль начинают играть другие механизмы взаимодействия (тормозное излучение, образование пар), в которых потери энергии мюонов пропорциональны Z^2 , т.е. сильнее зависят от химического состава вещества.

4. Поскольку у реальных объектов границы областей с различной плотностью могут быть размыты, а сами величины плотности могут различаться несущественно, задача восстановления особенностей внутренней структуры может потребовать дополнительных вычислений.

5. В случае проведения экспериментов в горной местности возникает неопределённость, связанная со сложностью рельефа земной поверхности, когда относительные повышения или понижения рельефа приводят к увеличению или уменьшению общей толщины вещества и, соответственно, к изменению потока мюонов под землёй. По величине они соизмеримы с изменениями потока, в частности, рудными телами. Поэтому в данном случае необходима достаточно точная карта рельефа местности (Digital Elevation Model — DEM), снятая с достаточной точностью. Бывают модели с шагом 10, 5 и даже 1 м. Такие модели использовались во всех работах с вулканами.

Различие поглощения космических мюонов соседними областями изучаемого объекта обусловлено двумя причинами: разницей в длине пути мюонов в толще объекта (т.е. его формой) и различием в плотности

материала. Результирующий регистрируемый поток образуется под влиянием обоих факторов. Поскольку задача метода МР состоит в выявлении неоднородностей плотности, эффект различия длин путей в данном случае не представляет интереса. Для того чтобы ослабить его влияние, авторами настоящей статьи предлагается использовать так называемые приведённые величины потоков, например отношение измеренных потоков к длине пути, проходимого мюоном в объекте. В результате такого подхода эффективность выделения неоднородностей плотности многократно возрастает [112]. Для планирования эксперимента с использованием этого подхода необходимо построение трёхмерной модели изучаемого объекта и точная привязка к нему положений детекторов.

Для демонстрации этого метода авторами настоящей статьи было осуществлено компьютерное моделирование эксперимента по "просвечиванию" горы космическими мюонами [113]. Моделирование проводилось с целью оценки условий, при которых возможны обнаружение и исследование протяжённого объекта внутри горы, имеющего сравнительно небольшие размеры и плотность, отличную от плотности основного материала. В качестве измеряемых величин брались поток мюонов, достигших детектора, и направление их прихода, заданное угловой частью сферических координат (θ, φ) с началом в точке расположения детектора и вертикально направленной осью z (рис. 16). В качестве объекта была выбрана гипотетическая гора, трёхмерная модель которой задавалась линиями уровня. На некотором расстоянии от неё помещался детектор, и были заданы 80 лучей (16 значений углов φ и 5 значений углов θ), которые рассматривались как траектории мюонов, — по ним проводились вычисления количества мюонов, дошедших до детектора. Результатом численных "измерений" является проекция дошедшего до детектора потока мюонов на сферу с центром в точке размещения детектора. В качестве материала горы был взят скальный грунт с плотностью $2,65 \text{ г см}^{-3}$. Внутри горы находилась железная сфера (плотность $7,84 \text{ г см}^{-3}$). Предварительные оценки были сделаны на основе упрощённой процедуры [23], которая учитывает форму спектра космических мюонов и зависимость энергетических потерь от величины энергии и типа вещества, но не учитывает

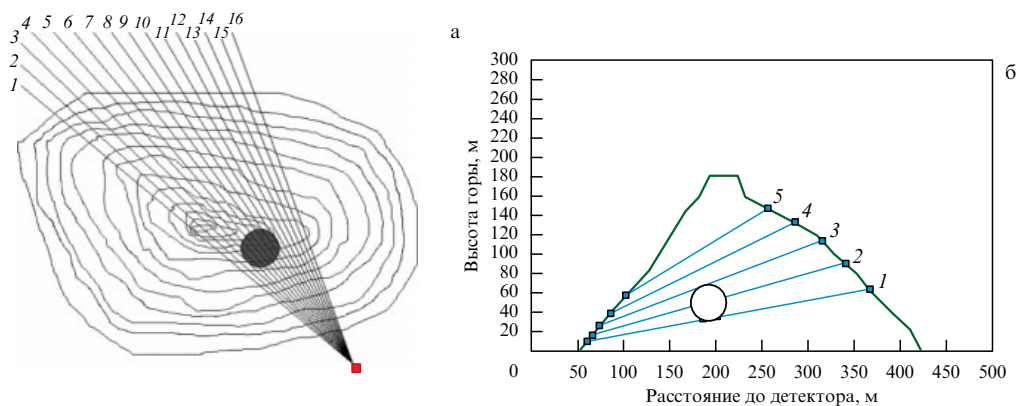


Рис. 16. (а) Горизонтальная проекция расположения горы (в виде линий уровня), сферы внутри неё, детектора (квадрат в правом нижнем углу рисунка) и траекторий мюонов, проникающих через гору в детектор. Указаны номера 1–16 углов φ траекторий. (б) Профиль горы в вертикальной плоскости, проходящей через траекторию 4 на рис. а. Круг — сечение сферы. Цифры 1–5 — номера углов θ . Детектор расположен в начале координат.

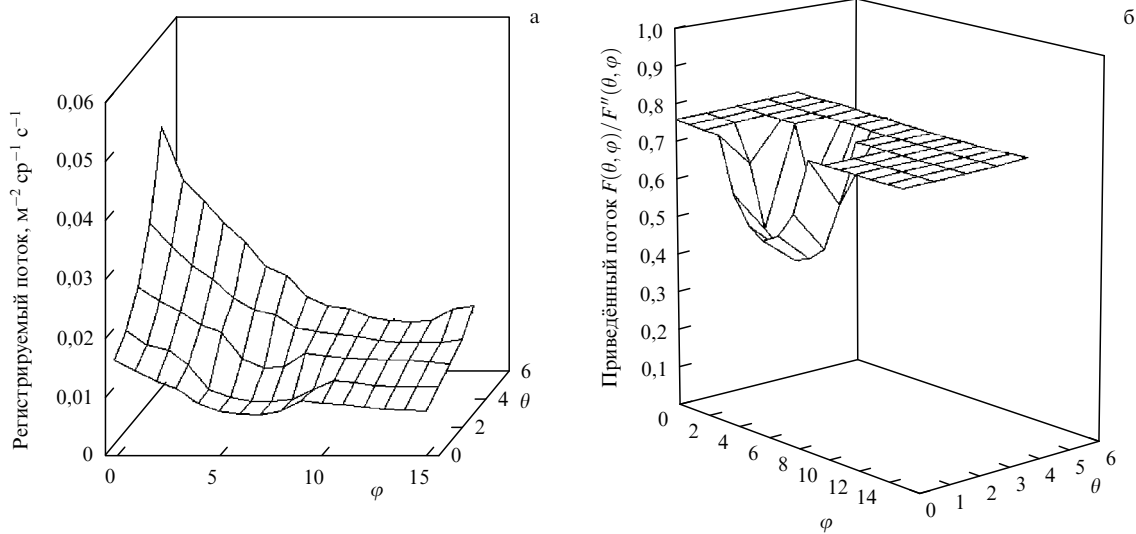


Рис. 17. (а) Величина остаточного потока $F(\theta, \varphi)$ [$\text{м}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{с}^{-1}$], зарегистрированного в точке расположения детектора, как функция углов в случае железной сферы. (б) Величина приведённого потока $F(\theta, \varphi)/F''(\theta, \varphi)$, зарегистрированного в точке расположения детектора, как функция углов в случае железной сферы. В качестве средней плотности взята плотность материала ($\rho = 2,3 \text{ г см}^{-3}$), не совпадающая с плотностью истинного материала горы ($\rho = 2,65 \text{ г см}^{-3}$). Значения по осям φ и θ соответствуют номерам углов на рис. 16.

эффекта перерасеяния частиц в среде, который приводит к изменению направления траекторий частиц вследствие многократного кулоновского рассеяния и вносит дополнительные неопределённости при анализе результатов моделирования [113].

На рисунке 17а представлено распределение величины потока $F(\theta, \varphi)$ мюонов, достигших детектора, как функция углов. Видно, что форма распределения является довольно плавной с некоторыми неровностями, в которых довольно трудно распознать область повышенной плотности. Для более явного выделения постороннего объекта в массиве были проведены расчёты с использованием приведённых величин потока. С этой целью в каждом из 80 направлений вычислялись длина пути мюона в объёме горы и их поток $F''(\theta, \varphi)$ на выходе с учётом ослабления при предположении однородности материала. Чтобы показать влияние несовпадения истинного материала и материала, взятого для расчёта потока $F''(\theta, \varphi)$, в этом случае был выбран обычный грунт (плотность $2,3 \text{ г см}^{-3}$). Результат вычислений — отношение F/F'' — приведён на рис. 17б. Видно, что область с плотностью, отличающейся от плотности основного материала, выделяется намного более чётко. Основной материал горы тоже может иметь неоднородности. Тогда на функции распределения в областях $\theta - \varphi$, где отсутствует постороннее тело, также будут наблюдаться неровности (выступы и впадины), свидетельствующие о неоднородности самого материала горы. Более того, отклонение уровня, на котором расположена плоскость на рис. 17б, от единицы характеризует отклонение плотности, взятой для расчёта F'' , от истинной плотности основного материала.

Согласно результатам расчётов более информативной является постановка эксперимента с двумя или более детекторами [113], которые измеряют распределение ослабленного потока мюонов через плотную структуру с нескольких точек наблюдения, поскольку в этом случае можно получить 3D-распределение материала в пространстве.

5. Российские разработки по применению метода мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов

До последнего времени исследования методом МР в России осуществлялись исключительно с использованием электронной измерительной аппаратуры [114, 115]. Эксперименты по МР с применением эмульсионной трековой методики в России до сих пор не проводились в связи с отсутствием надёжного производителя ядерных эмульсий необходимого качества. Однако создание необходимой инфраструктуры для производства ядерных эмульсий в российской Audio-видео-компании (АВК) "Славич" стимулировало интерес научных групп из ФИАНа и Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ) МГУ к проведению первых в России тестовых экспериментов с использованием метода МР. В экспериментах применялись ядерные эмульсии производства компании "Славич" и для сравнения — японской компании Fuji Photo Film, из международного эксперимента OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) [116–118].

Эксперимент в подземной шахте, расположенной на территории Геофизической службы РАН в Обнинске [98, 119, 120] был для авторов настоящей статьи третьим тестовым экспериментом на реальных промышленных объектах, в котором применялся метод МР с использованием ядерной фотоэмульсии. Эта работа стала первым в России исследованием на подземном объекте методом МР на базе трековых детекторов. Сооружение Геофизической службы РАН представляет собой расположенную на глубине 30 м внутри слоя мраморовидного известняка железобетонную конструкцию, монолитно связанную с коренной породой. В ходе измерений с использованием эмульсионных трековых детекторов предполагалось зарегистрировать разницу потоков атмосферных мюонов на поверхности земли и под землёй, для чего детекторы были установлены на обоих уровнях наблюдения. В

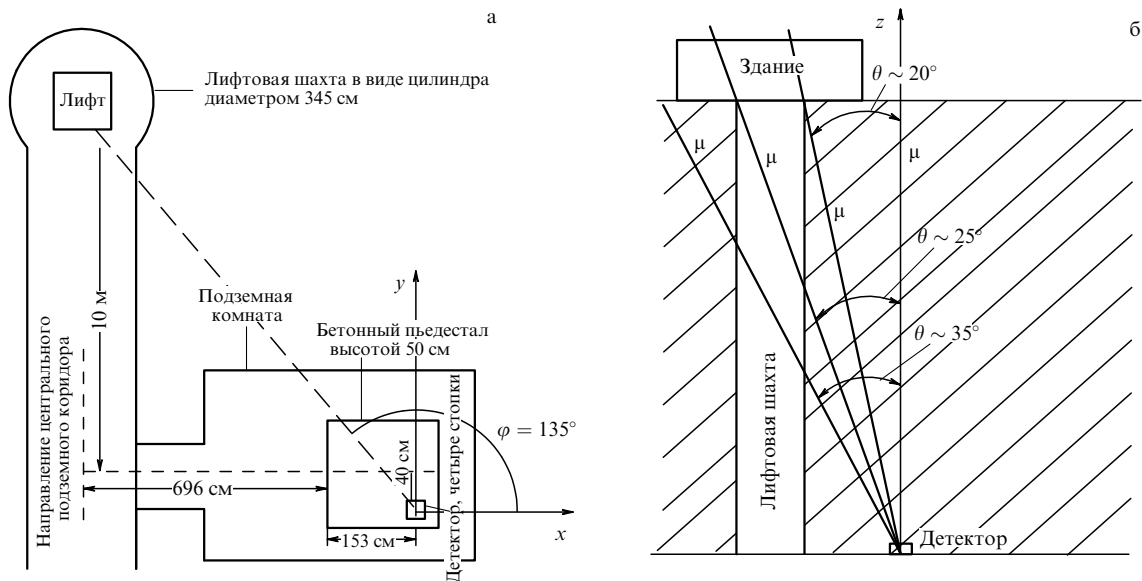


Рис. 18. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) схемы эксперимента ФИАН – НИИЯФ МГУ [119]. Указано расположение координатных осей в системе детекторов.

число задач эксперимента входила также оценка возможности "обнаружения" цилиндрической полости (шахты лифта) в толще грунта с помощью детекторов, расположенных на глубине (рис. 18). На рисунке 18б показан диапазон углов θ траекторий космических мюонов, в котором должен наблюдаться "сигнал" от шахты лифта; в частности, при $\theta \sim 25^\circ$ и $\varphi \sim 135^\circ$ поглощение мюонов в наибольшей степени ослаблено наличием полости и, соответственно, сигнал должен быть максимальным.

Для проведения эксперимента было изготовлено шесть эмульсионных камер (Д1 – Д6) с шестью слоями ядерной фотоэмульсии в каждой. Для выбора оптимального времени экспозиции детекторы снимали с облучения партиями через два и четыре месяца. Методы обработки экспериментальных данных подробно изложены в [98]. Анализ полученных данных показал, что для набора необходимой статистики при облучении детекторов в подземных помещениях на глубине 30 м недостаточно экспозиции в течение двух месяцев. Поэтому основные результаты были получены с плёнками, облучавшимися в течение четырёх месяцев.

Одним из наглядных способов представления данных является рассмотрение зависимости количества мюонов, зарегистрированных детектором, от азимутального угла падения φ (по зенитным углам в регистрируемом диапазоне $\theta = 0 - 45^\circ$ данные суммируются). В таком представлении легко увидеть наличие сигнала, обусловленного наличием пустоты в грунте, образованной вертикальным стволом шахты лифта.

Согласно результатам эксперимента потоки мюонов в наземных и подземных (на глубине 30 м) детекторах различаются примерно в 50 раз (так, при одинаковом времени экспозиции число треков в наземном детекторе Д1 составило 31136 на 30 см^2 , а в подземном детекторе Д5 — 671 на 30 см^2). Полученные в эксперименте распределения плотности треков космических мюонов в эмульсии были представлены в переменных $\sin \varphi \sin \theta$ и $\cos \varphi \sin \theta$, определяющих наклон траек-

тории мюона относительно нормали к плоскости детектора. На рисунке 19а показано экспериментальное двумерное распределение потока мюонов, полученное после четырёхмесячной экспозиции в одном из детекторов на глубине 30 м, за вычетом усреднённого фона. На рисунок дополнительно нанесена координатная сетка углов: азимутального φ (лучи, идущие из центра с шагом 15°) и зенитного θ (окружности 1, 2 и 3 проведены при значениях $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ и 45° соответственно). В таких координатах расстояние от некоторой точки до центра в масштабе рисунка равно $\sin \theta$. На экспериментальных распределениях отчётливо видна шахта лифта и ряд других структурных особенностей исследуемой конструкции. Число треков в каждом бине в зоне шахты лифта (выделено красной рамкой) составляет от 60 до 100, т.е. представленные данные являются статистически обеспеченными. Проведённый эксперимент наглядно демонстрирует возможности метода МР с использованием эмульсионной трековой методики.

Было выполнено также моделирование данного эксперимента с использованием программного пакета GEANT4 [120]. Была проведена симуляция прохождения 10 млн мюонов сквозь толщу грунта и область шахты и построена картина углового распределения потока мюонов, попавших в детектор. Результаты модельных расчётов показали хорошее согласие с экспериментальными данными в задаче обнаружения полости шахты лифта в аналогичном представлении (рис. 19б).

6. Оценки чувствительности метода

Под чувствительностью метода понимается его способность обнаруживать минимальную по массе и объёму неоднородность, создающую такое anomальное изменение в плотности потока мюонов, которое может быть достаточно надёжно зарегистрировано при заданной ошибке измерений. Информативность метода определяется ошибкой измерения плотности потоков мюонов, числом зенитно-азимутальных направлений, по кото-

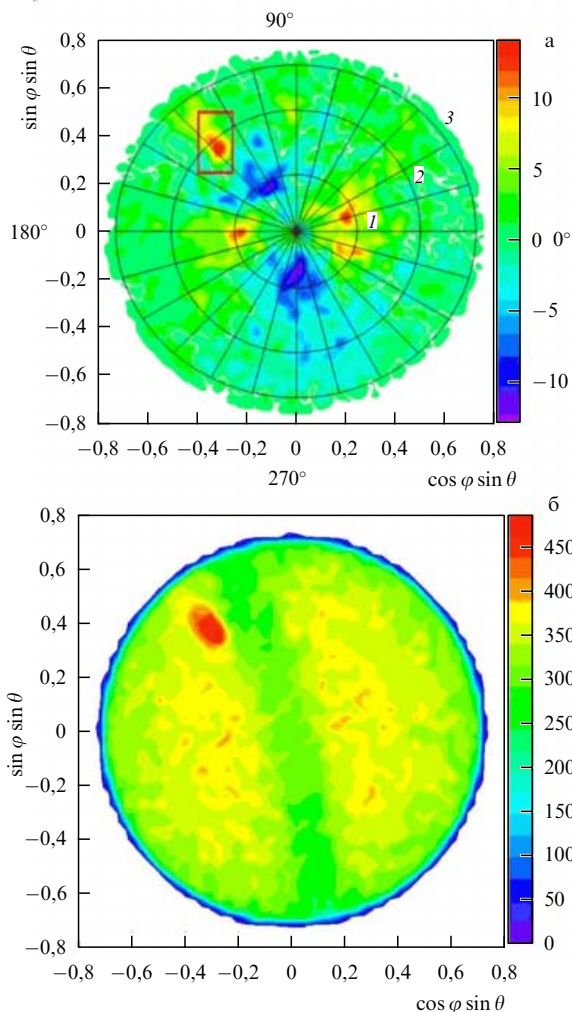


Рис. 19. (В цвете онлайн.) (а) Двумерное распределение плотности треков космических мюонов в шахте на глубине 30 м. Прямоугольником отмечено положение шахты лифта. Координатная сетка показывает линии постоянства углов: лучи, выходящие из центра с шагом 15°, соответствуют углам φ , а окружности 1–3 соответствуют значениям угла $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ и 45° . (б) Расчётное распределение, полученное по результатам моделирования, описанного в работе [120]. Отчётливо видно пятно, отвечающее значительному возрастанию плотности потока мюонов, обусловленному наличием шахты в грунте. Распределения плотности треков представлены в переменных $\sin \varphi \sin \theta$ и $\cos \varphi \sin \theta$, определяющих наклон траектории мюона относительно нормали к плоскости детектора. В таких координатах расстояние от некоторой точки до центра в масштабе рисунка равно $\sin \theta$.

рым одновременно измеряются эти потоки, и глубиной наблюдения.

Предположим, что в слое грунта толщиной L имеется полость размером d (рис. 20). Этот слой облучается потоком космических мюонов J_0 и регистрируется внизу рядом детекторов (D_1, D_2). Величины потоков в детекторах, регистрирующих потоки мюонов, не прошедших (J_1) и прошедших (J_2) через полость, будут различными. При наблюдаемом потоке J обозначим через ΔJ минимальную разницу потоков мюонов, которую может различить детектор, а через $S = \Delta J/J$ — чувствительность детектора. Тогда при заданных величинах L и S существует минимальный размер полости d , различимой детектором. Этому отвечает условие $(J_2 - J_1)/J_1 = S$.

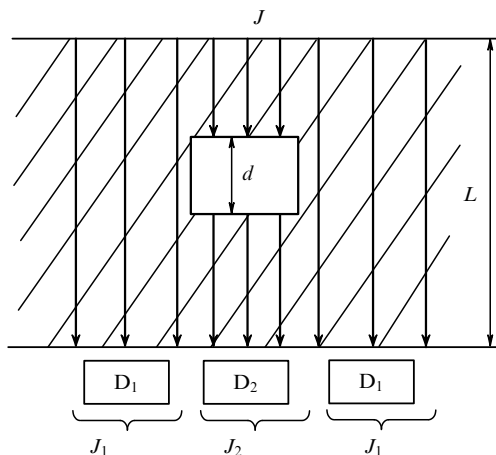


Рис. 20. Схема эксперимента для оценки чувствительности метода МР.

Таблица. Оценки чувствительности метода МР

Расстояние L от поверхности до детектора, м	Чувствительность S , %			
	5	10	20	30
50	$d = 1$ м	$d = 2$ м	$d = 5$ м	$d = 8$ м
100	$d = 3$ м	$d = 5$ м	$d = 7$ м	$d = 14$ м

В таблице приведены соотношения между L, d и S для грунта с плотностью $2,3 \text{ г см}^{-3}$, полученные с учётом степени поглощения космических мюонов и их спектра по упрощённой процедуре [23].

При более подробном рассмотрении речь идёт не только о лучевой чувствительности метода, т.е. о минимальных размерах выделяемых объектов в направлении потока космического излучения, но и о поперечной чувствительности, т.е. о минимальной длине и ширине выделяемой неоднородности.

7. Заключение. Мюонная георадиогрфия

Исходя из вышесказанного, можно говорить о возрождении в России на качественно новом уровне метода МР — перспективной технологии для различных областей научных и прикладных исследований. Чтобы судить о перспективности метода, необходимо оценить его преимущества, а также возможные ограничения.

Как показано выше, метод зондирования плотных протяжённых объектов с помощью проникающего космического излучения базируется на простых и строгих физических основах, установленных в результате физических теоретических и экспериментальных исследований, проводившихся на протяжении многих десятилетий как в России, так и за рубежом. Результаты этих исследований были применены, в частности, для решения некоторых геофизических задач. Разработка геологического аспекта метода МР показала возможность использования космических лучей в трёх основных направлениях:

1) для решения некоторых поисково-разведочных и экологических задач на рудных месторождениях (исследование областей, перспективных с точки зрения наличия полезных ископаемых, обнаружение очаговых зон воспламенения углеродных отвалов и др.);

2) для решения вопросов, связанных с инженерно-геологическими и гидрогеологическими задачами;

3) для определения среднего значения плотности горных пород.

Конкурентами метода МР в геологоразведке являются подземная гравиразведка и радиоволновое просвечивание. Гравиразведка основана на различиях величины гравитационного эффекта, возникающего в зависимости от распределения масс [121]. При подземной модификации гравиразведки появляется неопределённость, связанная с тем, что на точках подземного профиля регистрируется суммарный гравитационный эффект от выше- и нижележащих масс и возникает проблема его разделения. Способы решения этой задачи основываются на предположении, что известно распределение масс над профилем наблюдения, иными словами, имеются сведения о плотности горных пород и неоднородностей, их мощности и расстоянии до точки наблюдения. В ряде случаев эти величины известны недостаточно точно, что приводит к ошибкам в интерпретации данных гравиразведки. Метод МР лишён указанных недостатков.

Метод радиоволнового просвечивания, основанный на различиях в поглощении радиоволн горными породами, может применяться для поиска и оконтуривания рудных тел [122], а также для исследования состояния мостовых опор [123]. Однако этот метод не может дать информацию о таком параметре, как плотность горных пород, или о распределении масс горных пород. Более того, в методе радиоволнового просвечивания необходим искусственный источник электромагнитного излучения, что, разумеется, усложняет и удорожает производство работ. Для осуществления этого метода требуется не менее двух выработок или скважин. Кроме того, применяемая аппаратура обладает сравнительно небольшим дальностью действия, особенно в низкоомных породах, где уже на расстоянии 100–120 м радиоволны почти полностью затухают.

Глубинность метода МР может достигать 2–3 км, т.е. тех значений, на которых регистрируются потоки космических мюонов, хотя при этом время экспозиции для получения статистически значимых результатов значительно возрастает. Существование природного источника высокоэнергичных проникающих частиц космического излучения позволяет получать информацию с помощью только одного уровня детекторов этих частиц (односторонняя мюонная радиография). Сейчас для этого разрабатывается, помимо электронной аппаратуры, экономичная, простая и безопасная в обращении, не требующая дополнительных источников питания технология на основе ядерных фотоэмульсий, успешно конкурирующая в данной области исследований с электронными способами регистрации элементарных частиц.

Преимуществами метода МР на основе ядерных эмульсий, выделяющими его из ряда применяемых в настоящее время альтернативных методов зондирования, являются:

- высокая проникающая способность зондирующего излучения (космических мюонов);
- высокое угловое и пространственное разрешение детекторов;
- возможность создания трёхмерного изображения объекта;
- отсутствие необходимости в искусственных источниках излучения;

- независимость от источников питания;
- отсутствие необходимости оперативного контроля за ходом эксперимента в течение всей экспозиции.

Следствием является также существенное удешевление работ с применением эмульсионных детекторов МР по сравнению с работами с использованием других методов.

К ограничениям метода МР следует отнести следующее. Во-первых, метод может дать информацию только о веществе, расположенном выше (или под углом к детектору) уровня регистрирующей аппаратуры. Так, для геологоразведки это означает, что необходимым условием применения метода МР является наличие горных выработок или скважин. Второй недостаток связан с тем, что для достижения необходимой и достаточной точности наблюдений на больших глубинах резко увеличивается время экспозиции детектора. Указанные частные недостатки метода ни в какой мере не умаляют его достоинств, проявившихся при решении целого ряда практических задач.

Итак, в данной статье систематизирован материал по разработкам и опробованию метода МР, основанного на регистрации проникающего космического излучения. Изложены физические основы и методика наблюдений, рассмотрены способы и устройства, применявшиеся при регистрации проникающих мюонов. Метод успешно опробован, о чём свидетельствуют результаты, полученные этим методом авторами статьи в нескольких первых натуральных экспериментах. Описаны способы моделирования, обработки результатов эксперимента и некоторые приёмы интерпретации данных. Особое внимание уделено сопоставлению результатов одного из тестовых экспериментов авторов со сведениями о геологическом строении участка работ. Обозначены пути дальнейшего развития метода МР. Всё вышеизложенное свидетельствует о целесообразности и возможности развития и применения достаточно нового в мире и совершенно нового в России метода МР с использованием эмульсионных трековых детекторов и средств обработки эмульсионных данных, которыми располагают российские институты.

Список литературы

1. Allkofer O C, Grieder P K F *Cosmic Rays on Earth. Physics Data* (Karlsruhe: Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik GmbH, 1984)
2. Beringer J et al. (Particle Data Group) *Phys. Rev. D* **86** 010001 (2012)
3. Bugaev E V et al. *Phys. Rev. D* **58** 054001 (1998)
4. Groom D E, Mikhov N V, Striganov S I *At. Data Nucl. Data Tabl.* **78** 183 (2001)
5. Barkas W H, Birnbaum W, Smith F M *Phys. Rev.* **101** 778 (1956)
6. Bichsel H *Phys. Rev. A* **41** 3642 (1990)
7. Schultz L J, A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering (Portland: Portland State Univ., 2003)
8. Menon M G K et al. *Can. J. Phys.* **46** S344 (1968)
9. Aglietta M et al. (LVD Collab.) *ЯФ* **66** 125 (2003); *Phys. Atom. Nucl.* **66** 123 (2003)
10. Cecchini S, Spurio M *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **1** 185 (2012)
11. Grieder P K F *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects — A Tutorial, Reference Manual and Data Book* (Heidelberg: Springer, 2010)
12. Varey G W, A Dissertation for the Degree of Master of Science in Radiation Detection and Instrumentation (Surrey: Univ. of Surrey, 2010)

13. Patrignani C et al. (Particle Data Group) *Chin. Phys. C* **40** 100001 (2016)
14. Costa C G S *Astropart. Phys.* **16** 193 (2001)
15. Бондаренко В М, Дисс. ... докт. тех. наук (М.: Московский геологоразведочный ин-т, 1982)
16. Schultz L J et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **519** 687 (2004)
17. Lynch G R, Dahl O I *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **58** 6 (1991)
18. Nakamura K, Particle Data Group *J. Phys. G* **37** 075021 (2010)
19. Longhin A, Paoloni A, Pupilli F *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2216 (2015)
20. Agostinelli S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **506** 250 (2003)
21. Allison J et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **835** 186 (2016)
22. Clarkson A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **746** 64 (2014)
23. Земскова С Г, Старков Н И *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42** (6) 3 (2015); Zemskova S G, Starkov N I *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **42** 157 (2015)
24. Herman G T *Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections* (Dordrecht: Springer, 2009)
25. Erlandson A et al. *CNL Nucl. Rev.* (2016); <https://doi.org/10.12943/CNR.2016.00014>
26. Кравков С В *УФН* **46** 441 (1952)
27. George E P *Commonwealth Engineer* 455 (1955)
28. Бондаренко В М *Использование космических лучей в геологии* (М.: Недра, 1965)
29. Блох Я Л, Бондаренко В М, Тархов А Г *Геомagnetизм и аэрономия* **2** 390 (1963)
30. Бондаренко В М, Жданов Г Б *Природа* (8) 20 (1980)
31. Бондаренко В М и др. *Новые методы инженерной геофизики* (М.: Недра, 1983)
32. Бондаренко В М, Викторов Г Г, Тархов А Г *Советская геология* (6) 85 (1970)
33. Бондаренко В М, Викторов Г Г, Тархов А Г *Атомная энергия* **24** 330 (1968); Bondarenko V M, Viktorov G G, Tarkhov A G *Sov. Atom. Energy* **24** 411 (1968)
34. Викторов Г Г, Бондаренко В М *Мюонный метод определения плотности горных пород* (М.: Атомиздат, 1973)
35. Бондаренко В М и др. *Атомная энергия* **36** 518 (1974); Bondarenko V M et al. *Sov. Atom. Energy* **36** 656 (1974)
36. Чертков В Я, Тархов А Г, Бондаренко В М, в сб. *Разведочная геофизика СССР на рубеже 70-х годов* (Под. ред. В В Федынского) (М.: Недра, 1974) с. 389
37. Бондаренко В М и др., в сб. *Разведочная геофизика СССР на рубеже 70-х годов* (под. ред. В В Федынского) (М.: Недра, 1974) с. 409
38. Авдюшин С И и др. *Метеорология и гидрология* (12) 83 (1973)
39. Alvarez L W et al. *Science* **167** 832 (1970)
40. Wohl C G *Am. J. Phys.* **75** 968 (2007)
41. Press Release of Heritage Innovation Preservation. HIP Institute, Cairo, the 17th of December 2015: Muons Detectors plates installed at Bent Pyramid and under sensitivity calibration in Khufu's Pyramid, http://www.hip.institute/press/HIP_INSTITUTE_CP5_EN.pdf
42. Press Release of Heritage Innovation Preservation. HIP Institute, Cairo, October 15th 2016: #ScanPyramids. First conclusive findings with muography on Khufu Pyramid, http://www.hip.institute/press/HIP_INSTITUTE_CP9_EN.pdf
43. Gómez H et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **718** 052016 (2016)
44. Morishima K *Nature* (2017) publ. online November 2017; <https://doi.org/10.1038/nature24647>
45. Nagamine K et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **356** 585 (1995)
46. Nagamine K *J. Geophy. Res.* **104** 998 (1995)
47. Tanaka H et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **507** 657 (2003)
48. Nagamine K et al. *Proc. Jpn. Acad. B* **81** 257 (2005)
49. Tanaka H K M et al. *Am. J. Sci.* **308** 843 (2008)
50. Tanaka H K M et al. *J. Geophys. Res.* **115** B12332 (2010)
51. Buontempo S et al. *Earth Planets Space* **62** 131 (2010)
52. Marteau J et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **695** 23 (2012)
53. Cârloganu C et al. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2** 55 (2013)
54. Ambrosino F et al. *JINST* **9** C02029 (2014)
55. Catalano O et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **807** 5 (2016)
56. Tanaka H K M et al. *Earth Planet. Sci. Lett.* **263** 104 (2007)
57. Tanaka H K M, Muraoka H *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2** 145 (2013)
58. Коновалова Н С, Полухина Н Г *Иноватика и экспертиза* (2) 52 (2015)
59. Бондаренко В М и др. "Применение метода подземной регистрации космического излучения для решения некоторых горно-технических задач", в сб. *Методы разведочной геофизики* (Л.: НПО Геофизика, 1978) с. 55
60. Бондаренко В М *Космические лучи в геологии: мюонный метод* (Обзорная информация. Сер. Региональная, разведочная и промысловая геофизика) (М.: ВИЭМС, 1979)
61. Nishiyama R et al. *Geophys. Res. Abstracts* **18** EGU2016-11722 (2016)
62. Kedar S et al. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2** 157 (2013)
63. Tanaka H K M *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2** 79 (2013)
64. Jourde K et al. *Sci. Rep.* **6** 23054 (2016)
65. Durham J M et al. *AIP Adv.* **5** 067111 (2015)
66. Bryman D, Bueno J, Jansen J *ASEG Exten. Abst.* (1) 1 (2015)
67. Fukuda T et al. *JINST* **8** P01023 (2013)
68. Borozdin K N et al. *Nature* **422** 277 (2003)
69. Morris C L et al. *Sci. Global Security* **16** 37 (2008)
70. Сыресин Д Е, Шелков Г А *Письма в ЭЧАЯ* (6) 769 (2009); Syresin D E, Shelkov G A *Phys. Part. Nucl. Lett.* (6) 465 (2009)
71. Baesso P et al. *JINST* **9** C10041 (2014)
72. Morris C L et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **330** 42 (2014)
73. Jonkmans G et al. *Ann. Nucl. Energy* **53** 267 (2013)
74. Perry J O et al. *J. Appl. Phys.* **115** 064904 (2014)
75. Clarkson A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **745** 138 (2014)
76. Woo J J et al. *J. Korean Phys. Soc.* **66** 585 (2015)
77. Anghel V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **798** 12 (2015)
78. Burns J et al. *JINST* **10** P10041 (2015)
79. Åström E et al. *JINST* **11** P07010 (2016)
80. Задеба Е А и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **79** 411 (2015); Zadeba E A et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **79** 377 (2015)
81. Oláh L et al. *Adv. High Energy Phys.* **2013** 560192 (2013)
82. Oláh L et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **632** 012020 (2015)
83. Tanaka H K M et al. *Earth Planet. Sci. Lett.* **306** 156 (2011)
84. Lesparre N et al. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **1** 33 (2012)
85. Yadav C et al. *Proc. DAE Symp. Nucl. Phys.* **56** 1066 (2011)
86. Barnaföldi G G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **689** 60 (2012)
87. Oláh L et al. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **1** 229 (2012)
88. Bonechi L *JINST* **10** P02003 (2015)
89. Gibert D et al. *Earth Planets Space* **62** 153 (2010)
90. Tanaka H K M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **575** 489 (2007)
91. Tanaka H K M et al. *Geophys. Res. Lett.* **34** L22311 (2007)
92. Tanaka H K M, Yokoyama I *Proc. Jpn. Acad. B* **84** 107 (2008)
93. Ariga A et al. *Geophys. Res. Abst.* **13** EGU2011-8977 (2011)
94. Consiglio L, Tioukov V *Astropart. Part. Space Phys. Radiat. Interact. Detect. Med. Phys. Appl.* **8** 708 (2014)
95. Nishio A et al. *Phys. Procedia* **80** 74 (2015)
96. Ariga T et al. *JINST* **11** P03003 (2016)
97. Aleksandrov A B et al. *AIP Conf. Proc.* **1702** 110002 (2016)
98. Baklagin S A et al. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* **5** 0507027 (2016)
99. Powell C F, Fowler P H, Perkins D H *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method; an Account of the Principal Techniques and Discoveries, Illustrated by an Atlas of Photomicrographs* (London: Pergamon Press, 1959)
100. Morishima K *Phys. Procedia* **80** 19 (2015)
101. Артеменков Д А и др. *ЯФ* **70** 1261 (2007); Artemenkov D A et al. *Phys. Atom. Nucl.* **70** 1222 (2007)
102. Aleksandrov A B et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **535** 542 (2004)
103. Bozza C, Nakano T, in *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology Vol. 2* (Ed. A Méndez-Vilas) (Badajoz: Formatex, 2012) p. 1511
104. Alexandrov A, Tioukov V *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **718** 184 (2013)
105. Alexandrov A, Tioukov V, Vladymyrov M *JINST* **9** C02034 (2014)
106. Alexandrov A et al. *JINST* **10** P11006 (2015)
107. Belov A et al. *Solar Phys.* **290** 1429 (2015)

108. Балабин Ю В, Белов А В, Гущина Р Т *Изв. РАН. Сер. физ.* **79** 676 (2015); Balabin Yu V, Belov A V, Gushchina R T *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **79** 622 (2015)
109. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. D* **91** 112006 (2015)
110. Ampilogov N V et al. *Astrophys. Space Sci. Trans.* **7** 435 (2011)
111. Дорман Л И *Вариации космических лучей и исследование космоса* (М.: Изд-во АН СССР, 1963); Пер. на англ. яз.: Dorman L I *Cosmic Rays: Variations and Space Explorations* (Amsterdam: North-Holland, 1974)
112. Тархов А Г, Бондаренко В М, Никитин А А *Комплексование геофизических методов* (М.: Недра, 1982)
113. Старков Н И *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41** (3) 39 (2014); Starkov N I *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **41** 76 (2014)
114. Земскова С Г, Старков Н И *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42** (2) 11 (2015); Zemskova S G, Starkov N I *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **42** 37 (2015)
115. Бондаренко В М, Бровкин В И, Тархов А Г *Изв. вузов. Геология и разведка* (8) 61 (1973)
116. Борисов А А и др. *ИТЭ* (2) 5 (2012); Borisov A A et al. *Instrum. Exp. Tech.* **55** 151 (2012)
117. Nakamura T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **556** 80 (2006)
118. Ariga A, OPERA Collab. *AIP Conf. Proc.* **981** 175 (2008)
119. Agafonova N et al. (OPERA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **115** 121802 (2015)
120. Александров А Б и др. *Письма в ЭЧАЯ* **12** 1100 (2015); Aleksandrov A B et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **12** 713 (2015)
121. Александров А Б и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **81** 538 (2017); Aleksandrov A B et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **81** 500 (2017)
122. Утемов Э В *Гравиразведка: пособие для самостоятельного изучения лекционного курса слушателей курсов повышения квалификации специальности Геофизика* (Казань: Казанский государственный ун-т, 2009)
123. Истратов В А *Инженерные изыскания* (4) 78 (2008)
124. Панов В С *Инженерные изыскания* (10) 54 (2012)

Muon radiography method for fundamental and applied research

A.B. Aleksandrov⁽¹⁾, M.S. Vladymyrov⁽¹⁾, V.I. Galkin^(2,3), L.A. Goncharova⁽¹⁾, V.M. Grachev⁽⁴⁾, S.G. Vasina⁽¹⁾, N.S. Konovalova⁽¹⁾, A.A. Malovichko⁽⁵⁾, A.K. Managadze⁽³⁾, N.M. Okat'eva⁽¹⁾, N.G. Polukhina^(1,4,6), T.M. Roganova⁽³⁾, N.I. Starkov⁽¹⁾, V.E. Tioukov^(1,7), M.M. Chernyavsky⁽¹⁾, T.V. Shchedrina⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation*

⁽²⁾ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation*

⁽³⁾ *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation*

⁽⁴⁾ *National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation*

⁽⁵⁾ *Federal Research Center "Geophysical Survey", Russian Academy of Sciences, prosp. Lenina 189, 249035 Obninsk, Kaluga region, Russian Federation*

⁽⁶⁾ *National University of Science and Technology MISIS, Leninskii prosp. 4, 119049 Moscow, Russian Federation*

⁽⁷⁾ *Instituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Naples,*

Università degli Studi di Napoli Federico II, Complesso Universitario di Monte Sant'Angelo, Via Cinthia, 21, Edificio 6, 80126 Napoli, Italy
E-mail: ^(1,4,6)polukhina@sci.lebedev.ru

This paper focuses on the basic principles of the muon radiography method, reviews the major muon radiography experiments, and presents the first results in Russia obtained by the authors with this method on the basis of emulsion track detectors.

Keywords: muon radiography, nuclear photoemulsion, image recognition, track detectors

PACS numbers: 07.05.Fb, 07.05.Hd, 07.05.Kf, **29.40.-h**

Bibliography — 124 references

Received 21 March 2017, revised 27 July 2017

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (12) 1375–1392 (2017)

Physics – Uspekhi **60** (12) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.07.038188>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.07.038188>