

ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ В РОССИИ НА ОСНОВЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*А. Б. Александров^а, А. В. Багуля^а, М. С. Владимиров^а, В. И. Галкин^{б, в},
Л. Г. Деденко^{б, в}, С. Г. Земскова^{а, 2}, Н. С. Коновалова^а, Дж. де Леллис^д,
А. К. Манагадзе^б, О. И. Орурк^е, Н. Г. Полухина^{а, 1}, Т. М. Роганова^б,
К. Сиригнано^{*}, Н. И. Старков^а, Тан Ханг Со^а, В. Э. Тюков^а,
Н. В. Фоменко^а, М. М. Чернявский^а, Т. В. Щедрина^а*

^а Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

^б Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^в Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^д Неапольская лаборатория Национального института ядерных исследований Италии,
Неаполь, Италия

^е Научно-исследовательский институт шинной промышленности, Москва

^{*} Лаборатория Падуи Национального института ядерных исследований Италии, Падуя, Италия

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) и Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ) провели первую в России серию экспериментов с использованием ядерных фотоэмульсий по исследованию внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов методом мюонной радиографии. В результате были выработаны оптимальные условия постановки экспериментов и алгоритмы обработки полученных данных, изучены особенности метода. Представлены данные экспериментов, в том числе натурального — в шахте Геофизической службы РАН, подтвердивших перспективность метода при использовании трековых детекторов на основе ядерных фотоэмульсий с уникально высоким пространственным разрешением при условии их высокотехнологичной автоматизированной обработки.

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN) and the Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of the Lomonosov Moscow State University (SINP MSU) opened in Russia a series of pilot muon radiography experiments with nuclear emulsion detectors for study of interior structure of large-scale natural and industrial objects. As a result the optimal conditions of experiment organization were determined, algorithms of data processing were worked out and peculiarities of the method were ultimately investigated. Here are presented the experiment data including field observations

¹E-mail: poluhina@sci.lebedev.ru

(in the mine of the Geophysical Department of the Russian Academy of Sciences) confirming availability of the method with track detectors on the base of nuclear emulsions with uniquely high spatial resolution provided their high-tech automated processing.

PACS: 14.60.Ef; 29.40.Rg

ВВЕДЕНИЕ

Метод мюонной радиографии — это метод исследования структур массивных природных и промышленных объектов, который заключается в регистрации интенсивности потока мюонов после прохождения через вещество изучаемого объекта. В качестве просвечивающего пучка используются потоки мюонов космических лучей у поверхности Земли. Регистрирующими устройствами могут служить как электронные, так и эмульсионные детекторы частиц. В данной работе представлены первые результаты по применению трековых детекторов на основе ядерных фотоэмульсий — автономных, модульных и легко перемещаемых детекторов — для исследований объектов методом мюонной радиографии.

Мюонная радиография находит свое применение как перспективное дополнение к геофизическим и геологическим методам [1] при анализе сейсмических и карстовых процессов [2], разведке полезных ископаемых, для радиационного мониторинга установок ядерно-энергетического комплекса [3], для осуществления неразрушающего контроля промышленных объектов (доменных печей, опор мостовых конструкций и т. д.) [4]. Метод позволяет исследовать подземные пещеры и крупные полости искусственного происхождения. Он применяется для контроля состояния долговременных подземных хранилищ, где требуется детальное знание геологического окружения (состава и границ различных пластов), для мониторинга в горнодобывающей промышленности, а также для многих других приложений.

Метод основан на использовании потоков мюонов космического происхождения, составляющих около 80 % всех наблюдаемых частиц вторичного космического излучения на уровне моря. Мюоны возникают в результате распада заряженных π - и K -мезонов, которые образуются в верхних слоях атмосферы при взаимодействии ядерно-активных частиц первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли. Время жизни мюонов t_0 составляет около $2,197 \cdot 10^{-6}$ с, однако мюоны космических лучей при скорости v , близкой к скорости света, живут существенно дольше в соответствии с соотношением

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

и могут распространяться на значительные расстояния.

Мюоны, не являясь ядерно-активными частицами, теряют свою энергию в основном за счет электромагнитных взаимодействий с электронами и ядрами вещества. Отсутствие сильных взаимодействий и относительно большая масса покоя мюонов обуславливают их высокую проникающую способность по сравнению с адронами, электронами и γ -квантами. В результате мюоны космических лучей не только преодолевают атмосферу Земли, но и проникают глубоко в грунт в зависимости от их энергии. Мюоны с энергиями $E_\mu \sim 10^{12} - 10^{13}$ эВ, достигшие уровня моря, регистрируются в подземных экспериментах

на глубине до 8,6 км водного эквивалента. Поток проникающих мюонов составляет на уровне моря около $10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Особенности распространения атмосферных мюонов позволяют использовать их в методе мюонной радиографии для исследования структуры крупных природных и искусственных объектов. Изменение распределения плотности вещества внутри объекта осуществляется путем регистрации мюонов, пришедших со стороны объекта, детекторами заряженных элементарных частиц (например, ядерной эмульсией). Сравнивая плотность мюонного потока Φ после прохождения через мишень со свободно падающим из атмосферы потоком Φ_0 , можно определить непрозрачность ς исследуемых плотных структур и их отдельных областей. Спектр атмосферных мюонов непрерывен, и поток мюонов, выходящих из объекта исследования, является интегралом потока по энергии, которая изменяется от минимальной начальной энергии $E_{\min}(\varsigma)$, необходимой для пересечения данной среды толщиной L , до максимального значения:

$$\Phi = \int_{E_{\min}(\varsigma)}^{\infty} \Phi(E) dE.$$

Окончательное количество зарегистрированных мюонов зависит от интенсивности мюонного потока, пересекающего мишень, времени экспозиции, чувствительности и площади детектора и может быть оценено на основе модельных расчетов с учетом условий эксперимента. Анализ угловых распределений мюонов после их прохождения через объект, находящийся выше уровня наблюдения, позволяет сделать заключение о распределении плотности вещества этого объекта, в том числе о наличии неоднородностей в его толще.

Направление каждого мюона в детекторе определяется значениями азимутального и зенитного углов (φ, θ) относительно оси, перпендикулярной плоскости детектора, размеры которого значительно меньше размеров изучаемого объекта. Мюоны, формирующие изображение объекта, удовлетворяют следующему условию: расстояние от точки вхождения мюона в объект до точки, в которой его энергия становится равной нулю, должно быть больше длины пути мюона в объекте. Число мюонов, прошедших сквозь объект, зависит от направления их прихода (значений θ и φ) и плотности материала среды $\rho(\theta, \varphi)$. Моделирование прохождения потока мюонов через объект и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными позволяют реконструировать особенности внутренней структуры объекта.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ

До недавнего времени в мировой практике исследований методом мюонной радиографии использовалась в основном электронная аппаратура [5, 6], гораздо более громоздкая и сложная в эксплуатации, чем трековые детекторы на основе ядерных эмульсий, которые стали активно использоваться многими экспериментальными группами в последнее время (рис. 1). К основным преимуществам эмульсионных трековых детекторов, помимо небольших размеров и простоты конструкции, относятся хорошее пространственное ($< 1 \text{ мкм}$) и угловое ($\sim 1 \text{ мср}$) разрешение, большая информационная емкость, удобство транспортировки и простота эксплуатации в сложных условиях (например, в районе

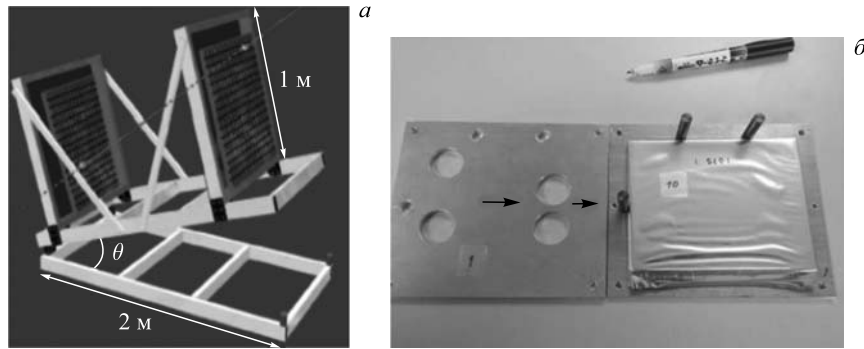


Рис. 1. Сравнение размеров электронных [6] (а) и эмульсионных (б) трековых детекторов для мюонной радиографии (б, справа — на металлической пластине лежат шесть слоев эмульсии, упакованных в металлизированный пакет; б, слева — верхняя металлическая пластина для фиксации эмульсий). Эмульсионная панель толщиной 0,5 см с несколькими слоями эмульсий (рис. б) превосходит по угловому разрешению электронный телескоп с базой $\geq 1 \text{ м}^2$, показанный на рис. а

вулканов). Важнейшими преимуществами ядерных эмульсий являются их независимость от источников энергоснабжения и отсутствие необходимости электронной считывающей системы в процессе экспозиции.

Размер и, соответственно, вес эмульсионного трекового детектора может быть относительно небольшим при сохранении необходимой эффективности благодаря высокому координатному разрешению эмульсий. Эмульсионная панель толщиной 0,5 см с несколькими слоями ядерных эмульсий по угловому разрешению будет превосходить электронный телескоп с базой $\sim 1 \text{ м}^2$, аналогичный показанному на рис. 1, а. Однако это не означает, что эмульсионный детектор должен иметь существенно меньшую площадь по сравнению с электронным, поскольку от величины площади детектора зависит объем набранной статистики. Размер детектора (площадь и число слоев фотоэмульсии) определяется требуемой чувствительностью в зависимости от ожидаемых угловых и линейных размеров изучаемого объекта.

Эксперименты, проводимые методом мюонной радиографии с использованием эмульсионных трековых детекторов, успешно осуществляются в ряде научных центров благодаря развитию автоматизированных методов обработки эмульсионных данных [6, 7]. В России эксперименты такого рода до недавнего времени не проводились из-за отсутствия надежного производителя ядерных эмульсий. Однако в последние годы производство ядерных эмульсий с характеристиками, необходимыми для регистрации релятивистских частиц, налажено на ОАО «Славич» в г. Переславль-Залесский Ярославской области, что позволило сотрудникам ФИАН и НИИЯФ МГУ провести первые тестовые эксперименты по применению метода.

ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МЕТОДУ МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ

В 2012–2014 гг. сотрудниками ФИАН и НИИЯФ МГУ был проведен ряд тестовых экспериментов с целью внедрения метода мюонной радиографии при использовании в качестве детекторов мюонов релятивистских ядерных эмульсий. Объектом первого тесто-

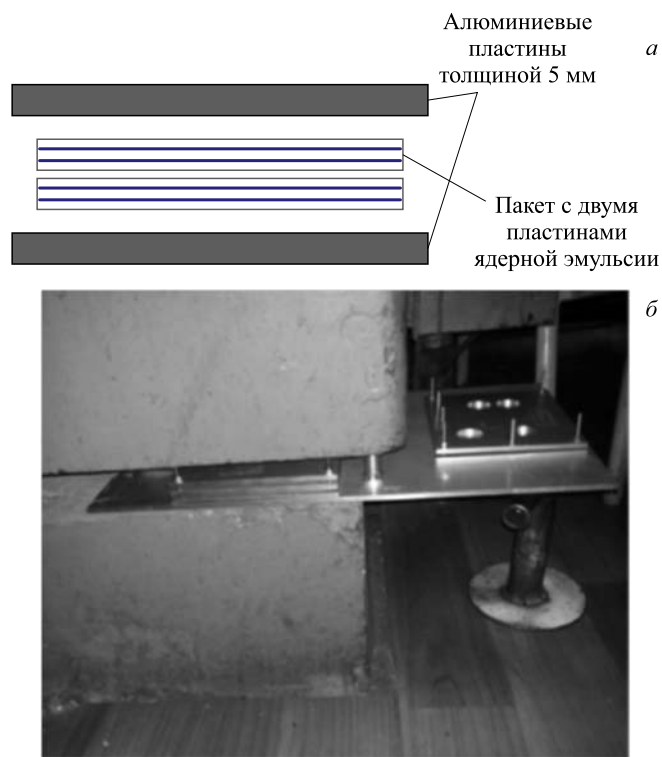


Рис. 2. Монтаж эмульсионных детекторов для первого эксперимента по мюонной радиографии ФИАН–НИИЯФ МГУ: *a*) схема расположения слоев эмульсии между металлическими пластинами; *б*) изображение установленных детекторов мюонной радиографии в теле стальной колонны-поглотителя и вне ее

вого эксперимента по методу мюонной радиографии была стальная колонна весом 23 т (ядро магнита циклотрона НИИЯФ МГУ), которая играла роль массивного поглотителя атмосферных мюонов и создавала «тень» в потоке этих частиц (рис. 2).

В эксперименте были использованы ядерные эмульсии производства российской компании ОАО «Славич» и японской компании «Fuji Photo Film», применяемые в международном эксперименте OPERA [8]. Детекторы, подготовленные для испытаний, представляли собой плотно упакованные стопки эмульсионных пластин размером 10×12 см, жестко закрепленные в каркасах из алюминиевых пластин. Подробности сборки детекторов показаны на рис. 1, *б* и 2, *a*.

Детекторы, установленные в теле стальной колонны и вне колонны в соответствии с рис. 2, *б*, экспонировались в течение 49 сут.

Обработка эмульсионных данных проводилась на имеющихся в распоряжении сотрудников ФИАН и НИИЯФ МГУ комплексах измерительной аппаратуры, оснащенных оптическими столами с высокой точностью перемещения и цифровыми видеокамерами высокого разрешения для регистрации и оцифровки оптических изображений. Автоматизированные измерительные комплексы ПАВИКОМ (ФИАН) и ВИСКАН-500 (НИИЯФ МГУ),

Рис. 3. Угловые распределения потоков мюонов при разных азимутальных углах φ и фиксированном диапазоне зенитных углов θ , полученные в результате первого тестового эксперимента, в сравнении с результатами модельных расчетов: сплошная кривая — расчет; темные кружки — эксперимент; светлые кружки — эксперимент с вычетом фона за 2 мес

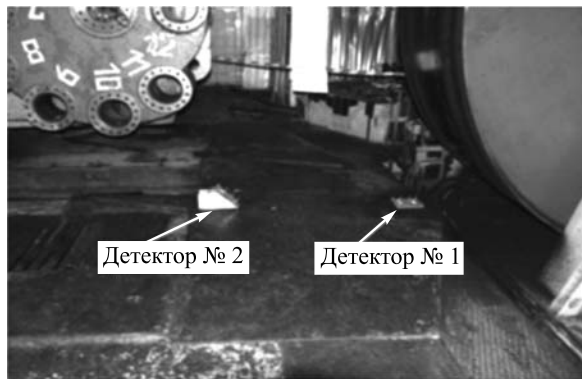
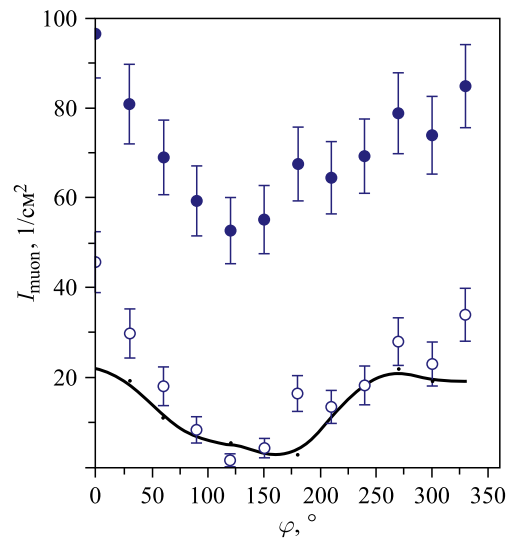


Рис. 4. *а*) Испытательный стенд, массивные части которого (диаметром 3 м каждая) регистрировались методом мюонной радиографии; *б*) расположение детекторов на испытательном стенде

разработанные с учетом необходимых требований, позволяют осуществлять высокоскоростное сканирование ядерных эмульсий и обработку полученных изображений в режиме реального времени.

Результатом сканирования каждой эмульсионной пластины является массив данных, который задает с высокой точностью траекторию каждой зарегистрированной в детекторе частицы, включая зенитный и азимутальный углы падения, используемые в данной методике. Полученные данные в процессе автоматического анализа подвергаются про-

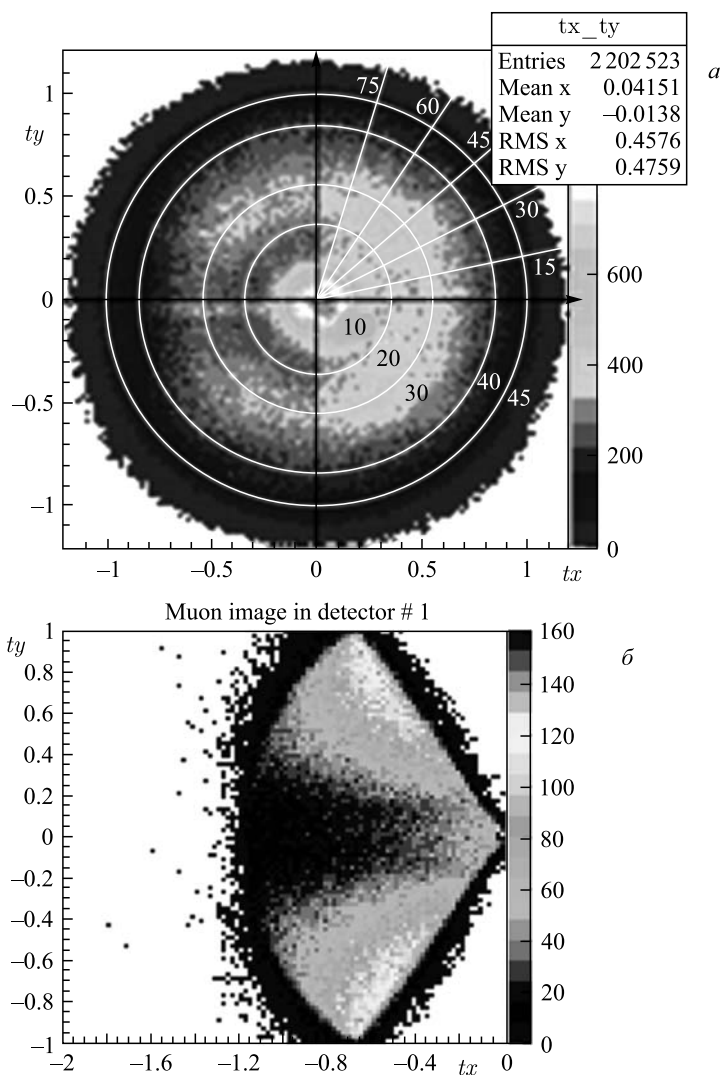


Рис. 5. Угловые распределения мюонов в детекторе № 1 после прохождения вещества испытательного стенда: а) экспериментальные распределения, полученные в ядерной эмульсии детектора № 1; б) результаты модельных расчетов

цедуре вычитания фона, которая состоит в учете инструментальных эффектов ложно реконструированных треков, эффектов, связанных с транспортировкой детектора, и т. п.

Угловые распределения частиц, полученные в первом тестовом эксперименте, продемонстрировали изменения потоков мюонов, приходящих на детектор при фиксированном диапазоне углов, в зависимости от длины пути в железном поглотителе (колонне). Распределения находятся в полном соответствии с предсказаниями модельных расчетов (рис. 3).

Второй тестовый эксперимент был проведен на территории НИИ шинной промышленности в Москве в период с 13 июня по 25 октября 2013 г., т. е. экспозиция детекторов составила 135 сут. Объектом наблюдения были диски бегового барабана — инерционного элемента испытательного стенда общим весом 40 т (рис. 4). Схема сборки эмульсионных трековых детекторов была аналогична предыдущему эксперименту, только в каждом детекторе использовалось не по два, а по три пакета с двумя слоями эмульсий.

На рис. 5 приведены экспериментальные угловые распределения мюонов (рис. 5, а) и соответствующие им модельные расчеты (рис. 5, б) для детектора № 1. «Тень» от бегового барабана испытательного стенда хорошо видна на обоих графиках — полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчетов.

Для представления результатов были выбраны переменные tx и ty — тангенсы углов наклона треков в проекциях на плоскости xz, yz , где $tx = dx/dz = \operatorname{tg} \theta \cos \varphi$ и $ty = dy/dz = \operatorname{tg} \theta \sin \varphi$ в координатах эмульсионной пленки. Для удобства восприятия на плоскость $tx-ty$ рис. 5, а наложена координатная сетка (θ, φ) (θ — круги, φ — лучи,

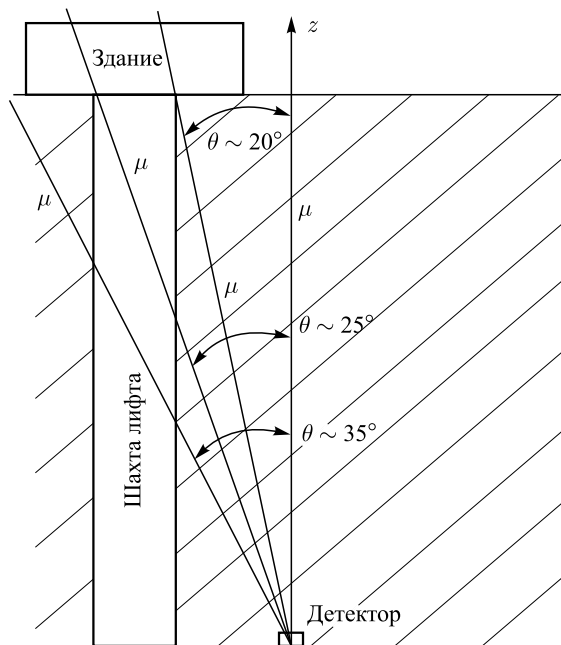


Рис. 6. Схема эксперимента в шахте на глубине 30 м: боковое изображение шахты лифта и подземных детекторов. Показан диапазон угла θ ($20-35^\circ$), в котором должен наблюдаться «сигнал» от шахты

выходящие из начала координат) в соответствии с соотношениями $\operatorname{tg} \varphi = ty/tx$ и $\operatorname{tg}^2 \theta = tx^2 + ty^2$.

Третий эксперимент по методу мюонной радиографии был поставлен на глубине 30 м в подземной шахте, расположенной на территории Геофизической службы РАН (Обнинск). В результате эксперимента предполагалось зарегистрировать разницу потоков атмосферных мюонов на поверхности земли и на глубине в шахте после прохождения слоя грунта, для чего детекторы были установлены на двух уровнях наблюдения (рис. 6, 7). В число задач эксперимента входила также оценка возможности «обнаружения» полости (шахты лифта) в толще грунта с помощью детектора с ядерной фотоэмульсией, расположенного на глубине 30 м. При $\theta \sim 25^\circ$ и $\varphi \sim 135^\circ$, т. е. в направлении шахты лифта (рис. 6, 7), поглощение мюонов ослаблено наличием полости, следовательно, поток мюонов с этого направления должен заметно превосходить фон.

Для того чтобы определить оптимальное время экспозиции, достаточное для получения необходимой информации, детекторы экспонировались в течение разных промежутков времени (2 и 4 мес).

Проведенные модельные расчеты подтверждают, что «сигнал» от шахты лифта должен заметно проявляться в потоке мюонов, падающих на детектор. На рис. 8 представлен расчетный график распределения потоков мюонов как функция углов θ и φ в направлении шахты лифта.

Полученные экспериментальные распределения мюонов, прошедших через детектор № 6, экспонированный на глубине 30 м в течение 4 мес, приведены на рис. 9, а и б.

Чтобы выделить треки от экспозиции за время эксперимента от остальных фоновых треков, из исходного распределения (tx, ty) вычтен усредненный по азимутальному

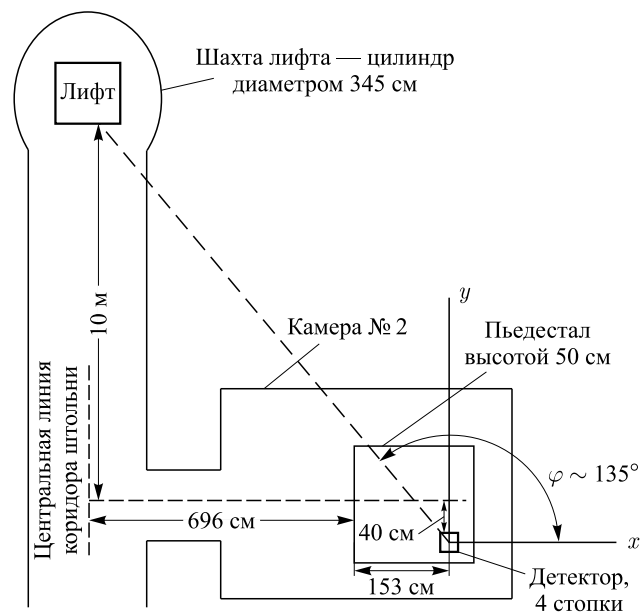


Рис. 7. Схема эксперимента в шахте на глубине 30 м: относительное расположение шахты лифта и подземных детекторов (вид сверху). Показана ориентация осей x и y в системе детектора и направление на шахту лифта

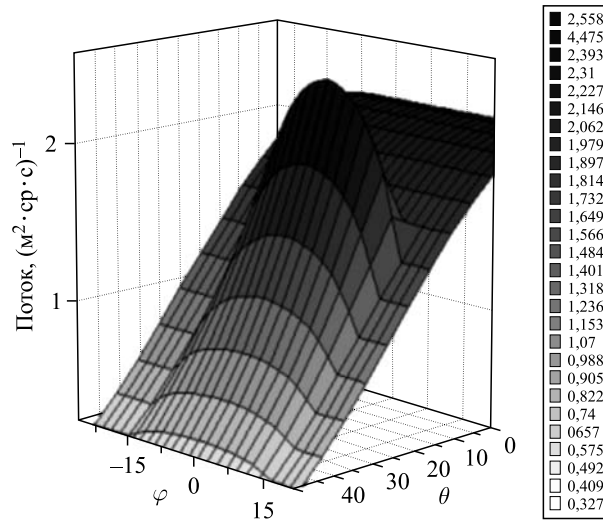


Рис. 8. Трехмерное изображение угловой зависимости потоков мюонов в точке расположения детекторов под землей

углу (φ) фон. Этот метод дает более наглядную картину перепада плотности треков. Результаты представлены на рис. 9, *a*. На данном распределении явно виден сигнал от шахты лифта (выделен белой рамкой) и другие неоднородности в грунте. На рис. 9, *б* представлено распределение по углу φ в системе координат эмульсионных пленок. Здесь также виден четкий пик в направлении расположения шахты лифта $\varphi \sim 135^\circ$. Наличие других особенностей распределения по φ связано с неоднородностями состава грунта в районе шахты — большие потоки мюонов в направлении «поперек» коридора шахты, расположенной в линзе мраморовидного известняка.

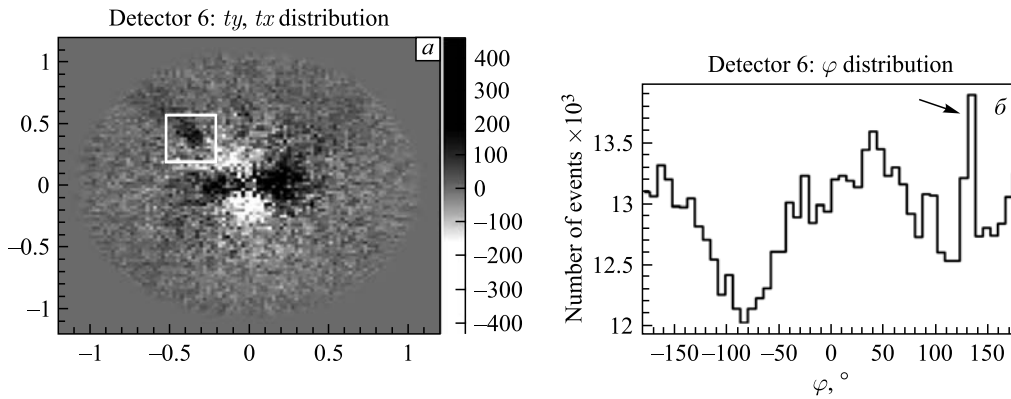


Рис. 9. *a*) Двумерное распределение (tx, ty) потока мюонов на глубине 30 м после вычета фона, усредненного по углу φ ; *б*) распределение потоков мюонов на глубине 30 м по азимутальному углу φ ; пик в районе 135° соответствует направлению на шахту лифта

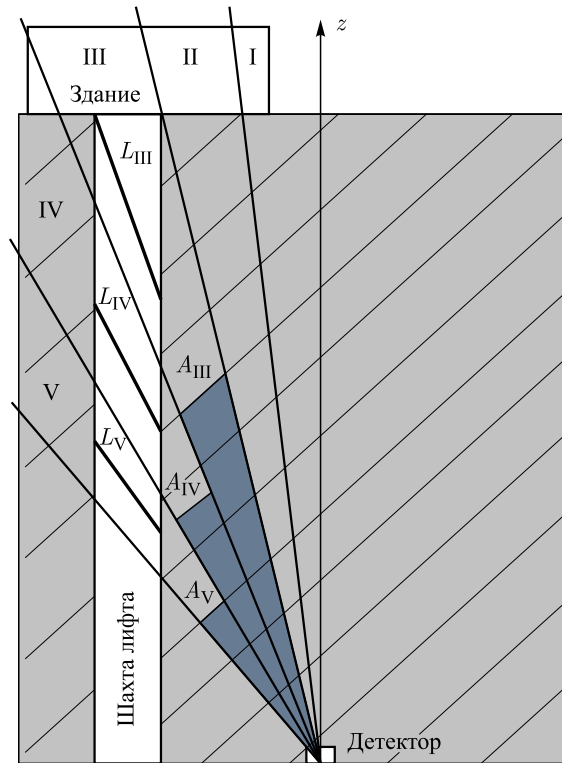


Рис. 10. Сравнение величины превышения потока мюонов над фоном в области шахты по углу $\varphi \sim 135^\circ$ и в нескольких секторах по углу θ . Римскими цифрами обозначены диапазоны углов θ : I — $0-10^\circ$; II — $10-20^\circ$; III — $20-30^\circ$; IV — $30-40^\circ$; V — $40-50^\circ$. Жирными линиями L_i отмечены отрезки пути мюонов в шахте в разных диапазонах θ ($L_I = L_{II} = 0$). Затемненные участки секторов пропорциональны превышению потока мюонов над фоном (амплитуда «сигнала» A_i) в разных диапазонах θ . Длины отрезков равны $L_{III} = 8,3$ м, $L_{IV} = 6,1$ м, $L_V = 4,9$ м. Превышение потоков (произвольные единицы): $A_{III} = 1700$; $A_{IV} = 1340$; $A_V = 830$. Отношение длин отрезков: $L_{III} : L_{IV} = 1,36$; $L_{IV} : L_V = 1,53$. Отношение величин измеренных потоков: $A_{III} : A_{IV} = 1,26$; $A_{IV} : A_V = 1,41$

Потоки мюонов в наземных и подземных детекторах на глубине 30 м отличаются примерно в 50 раз, что хорошо согласуется с расчетными оценками.

На рис. 10 представлен результат более детального анализа полученных данных в течение четырехмесячной экспозиции под землей детектора № 6 в Обнинске. Приведено сравнение величины превышения потока мюонов над фоном в области шахты по углу $\varphi \sim 135^\circ$ и в нескольких секторах по углу θ (I — $0-10^\circ$; II — $10-20^\circ$; III — $20-30^\circ$; IV — $30-40^\circ$; V — $40-50^\circ$). Как и ожидалось, в секторах I и II «сигнал» от шахты отсутствует. Соотношение потоков в секторах III, IV и V примерно соответствует отношению длин отрезков, проходимых мюонами внутри шахты в тех же секторах. Полного совпадения быть не должно, так как связь между проходимыми в грунте частицами путями и остаточным потоком нелинейная.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов, полученных в тестовых экспериментах сотрудниками ФИАН и НИИЯФ МГУ по методу мюонной радиографии, показывает, что, в соответствии с предсказаниями модельных расчетов, эмульсионная трековая методика позволяет получить надежные данные об особенностях структуры исследуемых объектов. Пространственные распределения потоков мюонов, измеренные в тестовых экспериментах, и расчетный прогноз неоднородностей в структуре объектов в целом дают хорошее согласие. Это свидетельствует о возможности развития метода мюонной радиографии в России с использованием эмульсионных трековых детекторов предложенной конструкции и средств обработки эмульсионных данных, которыми располагают российские институты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marteau J. et al.* Muons Tomography Applied to Geosciences and Volcanology // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. V. 695, No. 23–28.
2. *Tanaka H. K. M. et al.* Cosmic Muon Imaging of Hidden Seismic Fault Zones: Rainwater Permeation into the Mechanical Fractured Zones in Itoigawa–Shizuoka Tectonic Line, Japan // EPSL. 2011. V. 306, No. 3–4. P. 156–162.
3. *Morris C. L. et al.* Tomographic Imaging with Cosmic Ray Muons // Science & Global Security. 2008. V. 16, No. 1–2. P. 37–53.
4. *Gilboy W. B. et al.* Muon Radiography of Large Industrial Structures // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 263. P. 317–319.
5. *Lesparre N. et al.* Design and Operation of a Field Telescope for Cosmic Ray Geophysical Tomography // Geosci. Instr. Meth. Data Syst. 2012. V. 1. P. 33–42.
6. *Carloganu C. et al.* Towards a Muon Radiography of the Puy de Dome // Geosci. Instr. Meth. Data Syst. 2013. V. 2. P. 55–60.
7. *Tanaka H. K. M.* Evaluation of Positioning and Density Profiling Accuracy of Muon Radiography by Utilizing a 15-Ton Steel Block // Ibid. P. 79–83.
8. *Агафонова Н. Ю. и др.* Поиск осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ с помощью гибридного детектора эксперимента OPERA // ЭЧАЯ. 2013. Т. 44, №4. С. 1345–1387.

Получено 10 марта 2015 г.