

МЮОННАЯ РАДИОГРАФИЯ КАК СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ЗОНДИРОВАНИЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.С. Коновалова, вед. научн. сотр. Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
канд. физ.-мат. наук, ninakonovalova@yandex.ru

Н.Г. Полухина, зав. лаб. Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, д-р физ.-мат.
наук, проф., poluhina@sci.lebedev.ru

В последнее время во всем мире участились случаи техногенных и природных катастроф, связанных со структурными нарушениями крупных природных и промышленных объектов. К ним, в частности, относятся случаи провала грунта на местах заброшенных шахт, подземных и техногенных катастроф на объектах атомной энергетики и др. Таким образом, существует большое количество проблемных геологических и промышленных зон, требующих постоянного мониторинга в связи с тем, что состояние их структуры может серьезно угрожать находящимся в непосредственной близости социальным объектам. Успешно решить эту проблему экологически чистым, энергонезависимым, доступным и безопасным способом позволяет метод мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов, с успехом использующийся во многих странах мира (Япония, Италия, Швейцария, Канада), но в России находящийся пока на стадии тестирования.

Ключевые слова: раннее предупреждение техногенных и природных катастроф, мюоны космических лучей, ядерная эмульсия, автоматизированное сканирование трековых детекторов, распознавание образов.

MUONIC RADIOGRAPHY AS MODERN METHOD OF SOUNDING OF LARGE INDUSTRIAL AND NATURAL FACILITIES

N.S. Konovalova, Leading Researcher, P.N. Lebedev Insitute of Physics, RAS,
Doctor of Physics and Mathematics, ninakonovalova@yandex.ru

N.G. Polukhina, Head of Laboratory, P.N. Lebedev Insitute of Physics, RAS,
Ph.D. of Physics and Mathematics, Professor, poluhina@sci.lebedev.ru

Recently around the world cases of the technogenic and natural disasters connected with structural violations of large natural and industrial facilities became frequent. Such disasters are: failure cases on places of the abandoned mines, underground and technogenic catastrophes on objects of nuclear power, etc., in particular. Thus, there is a large number of the problem geological and industrial zones demanding continuous monitoring because the condition of their structure can seriously threaten the social objects which are in close proximity. Successfully the method of muonic radiography on the basis of emulsion track detectors, allows to solve this problem in the environmentally friendly, non-volatile, available and safe way by the method of muonic radiography on the basis of emulsion track detectors, used with success in many countries of the world (Japan, Italy, Switzerland, Canada), but in Russia being so far this method is still at a testing stage.

Keywords: the early prevention of technogenic and natural disasters, muons of space beams, nuclear emulsion, the automated scanning of track detectors, recognition of images.

Недавно средства массовой информации сообщили об очередной экологической катастрофе — гигантском провале грунта в районе калийных рудников Пермского края. Новый провал был зафиксирован в феврале 2015 г. (рис. 1, а-б) и с момента обнаружения увеличил-

ся в десятки раз, сейчас его размеры составляют 120×125 м при глубине около 50 м. Этот случай в крае далеко не первый, проблеме провалов грунта в регионе уже много лет. Такая же ситуация складывается в районе города Соликамск, где в 2014 г. образовалась воронка диаметром 50 м [1]. В результате увеличения воронки в нее начали проваливаться дома ближайшего дачного кооператива (рис. 1, в).



а)



б)



в)

Рис. 1. Провалы грунта в Пермском крае (Верхнекамское калийное месторождение)

а — в районе г. Березники; б — в районе железнодорожных путей, г. Березники,
в — в районе садовых участков, г. Соликамск

Существует ли возможность прогнозирования подобных катастрофических явлений, до сих пор чудом обходившиеся без человеческих жертв? Сотрудники Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина МГУ в течение последних лет занимаются разработкой и тестированием метода мюонной радиографии на основе эмульсионных детекторов, с помощью которого можно обнаруживать крупные полости в толще земли, и не только это [2].

Метод мюонной радиографии на основе эмульсионных детекторов — перспективный метод исследований внутренней структуры крупных природных и промышленных объектов, позволяющий осуществлять, в частности, мониторинг состояния вулканов, карстовых пещер, шахт, установок ядерно-энергетического комплекса и т.д. и обеспечивающий раннее обнаружение и прогнозирование развития вероятных чрезвычайных ситуаций. Метод дает

реальную возможность минимизировать последствия чрезвычайных ситуаций для населения, инфраструктуры и окружающей среды.

Мюонная радиография на основе эмульсионных детекторов использует те же основные принципы, что и рентгеновская томография, применяемая в медицине, с той разницей, что изображение формируется не в рентгеновской пленке, а в ядерной фотоэмульсии. Заряженная релятивистская частица, проходящая через эмульсию, вследствие своей ионизирующей способности оставляет за собой след засвеченных зерен галоидного серебра. После проявления этот след виден под микроскопом как цепочка отдельных точек или как сплошная линия (см. рис. 2) [3].

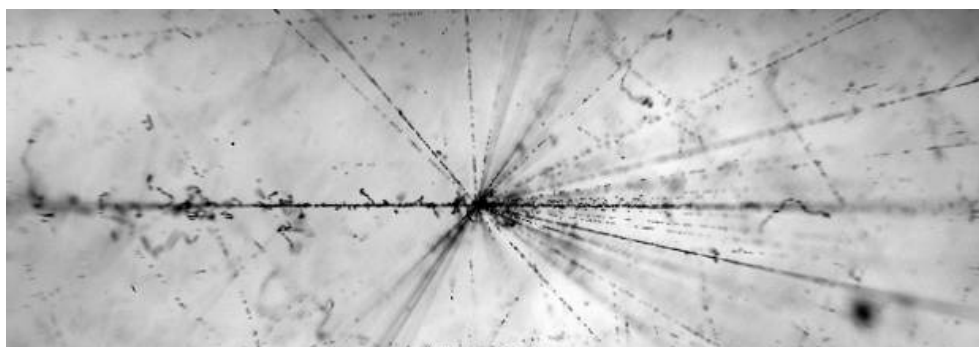


Рис. 2. Треки заряженных частиц в эмульсии (центральное соударение ядра ^{28}Si с импульсом 200 А ГэВ/с с ядром эмульсии. Трехмерный образ события реконструирован как проекция с помощью микрофотографирования на измерительном комплексе ПАВИКОМ (ФИАН)

В отличие от рентгеновской томографии, мюонная радиография не требует искусственных источников излучения. Объект «просвечивается» с помощью заряженных мюонов — релятивистских частиц космического происхождения. Измерения осуществляются эмульсионными трековыми детекторами, которые представляют собой автономные модульные, легко перемещаемые устройства, не требующие дополнительных источников электропитания, и могут экспонироваться сколь угодно продолжительное время, обеспечивая получение наиболее полной картины внутренней структуры объекта наблюдения. При этом сами эмульсионные детекторы не являются источниками загрязнения окружающей среды.

Космические мюоны образуются в основном в процессах распада π - и K -мезонов, которые рождаются во взаимодействиях протонов и ядер первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли (рис. 3).

Масса мюона (энергия покоя 105,66 МэВ) примерно в 200 раз превосходит массу электрона. Именно это свойство позволяет мюонам проходить большие толщи вещества, так как сечения основных процессов уменьшаются пропорционально квадрату отношения масс электрона и мюона, т.е. примерно в 40 000 раз. Мюон — нестабильная частица, собственное время жизни которой τ равно 2,197 мкс. Среднее расстояние, которое мюон пролетает в вакууме до распада, составляет $l_a = c\tau\beta\gamma$, где $\gamma = E/mc^2$ — лоренц-фактор, c — скорость света, $\beta = v/c$ и v — скорость мюона. Так как произведение $c\tau = 660$ м, релятивистские мюоны ($\beta \approx 1$, $\gamma \gg 1$) могут пролетать до распада большие расстояния (порядка километра). Проникающая способность частиц зависит от характера их взаимодействия с веществом: с электронами, с электрическим полем ядер и непосредственно с ядрами атмосферы. Заряженные мюоны, не являясь ядерно-активными частицами, слабо взаимодействуют с веществом и теряют свою энергию в основном на ионизацию атомов (~ 2 МэВ на 1 г/см^2). В результате поток мюонов представляет собой проникающую компоненту космического излучения.

Максимальная глубина, на которой регистрировались мюоны наиболее высокой энергии, составляет около 8600 м в переводе на водный эквивалент, что примерно соответствует 2 км скального грунта (глубину проникновения мюонов принято оценивать в метрах водного эквивалента, т.е. в метрах толщи водного слоя, в котором поглощение мюонов такое же, как в изучаемой толще пород).

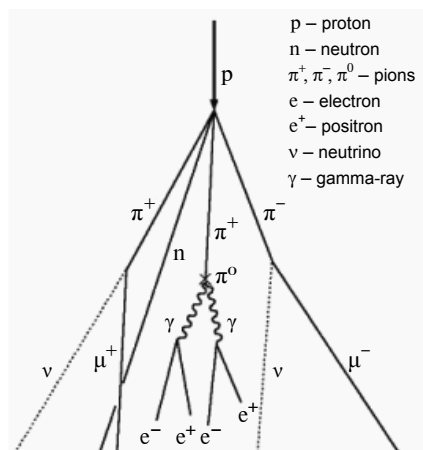


Рис. 3. Образование мюонов в атмосфере

При прохождении сквозь вещество заряженные мюоны претерпевают многократное кулоновское рассеяние на ядрах атомов этого вещества, что приводит к изменению направления их движения. Удельное рассеивание на единицу длины («сила рассеивания») существенно зависит от величины заряда ядра-мишени. Поэтому анализ углового распределения мюонов после прохождения через какой-либо объект позволяет сделать заключение о наличии неоднородностей в его толще.

При пересечении некоторого слоя вещества (геологических пород или строительных материалов) происходит полное или частичное поглощение мюонного пучка; не поглощенные частицы потока регистрируются с помощью чувствительного устройства, такого как эмульсионный трековый детектор. Для получения изображения исследуемого слоя вещества детектор мюонов помещается на небольшой глубине под землей ниже уровня исследуемого объема, что обусловлено направлением потока зондирующего излучения (рис. 4). Интенсивность элемента изображения определяется уменьшением потока падающих на объект космических мюонов, вызванным их поглощением в веществе исследуемого объекта.

Поскольку размеры детектора значительно меньше размеров изучаемого объекта, траектория каждого мюона определяется значениями азимутального и зенитного углов относительно оси, перпендикулярной плоскости детектора (θ , ϕ). Мюоны, формирующие томограмму, удовлетворяют следующему условию: расстояние от точки вхождения мюона в объект до точки, в которой его энергия становится равной нулю, должна быть не больше длины пути в плотной среде (длина пути в плотной среде определяется на основе топографических данных). Число мюонов, прошедших сквозь объект, зависит от значений углов θ , ϕ и плотности материала среды. Моделирование прохождения мюонов сквозь объект и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными позволяют реконструировать особенности внутренней структуры объекта.

Компьютерное моделирование метода мюонной радиографии (рис. 5) показывает его возможности для обнаружения особенностей внутренней структуры исследуемого объекта [5].

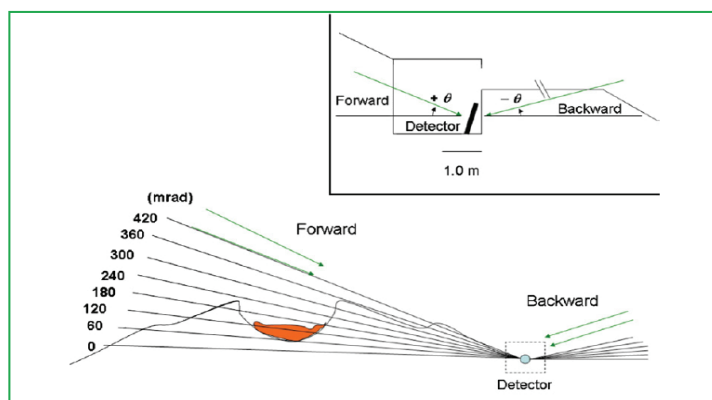


Рис. 4. Схема установки детектора для изучения объекта методом мюонной радиографии

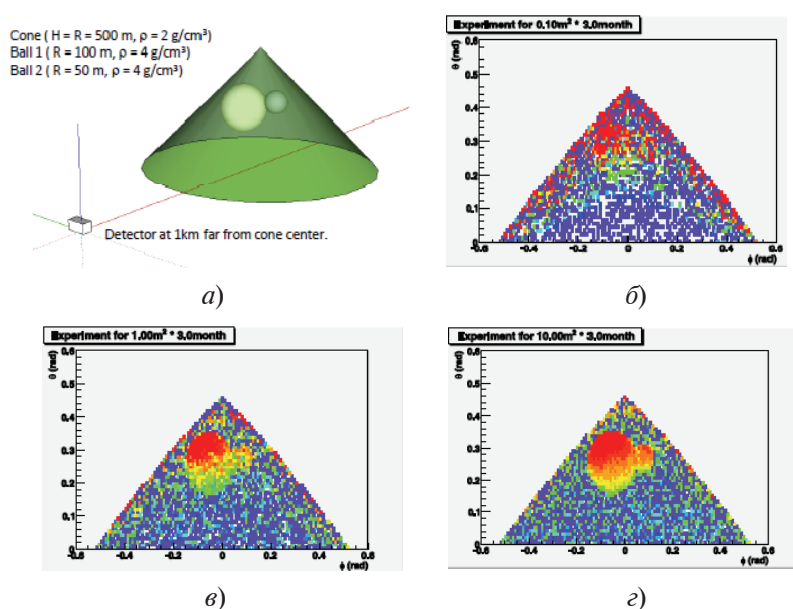


Рис. 5. Результаты моделирования изображения массивного объекта при его изучении методом мюонной радиографии

a — схематическое изображение компьютерной модели массивного объекта; *б* — изображение, полученное с помощью эмульсионного детектора размером $0,1 \text{ м}^2$; *в* — изображение, полученное с помощью эмульсионного детектора размером 1 м^2 ; *г* — изображение, полученное с помощью эмульсионного детектора размером 10 м^2

На рис. 6 показано угловое распределение космических мюонов, экспериментально полученное в ядерной эмульсии и наглядно показывающее ослабление их потока в результате прохождения большой массы вещества. Томограмма была получена при исследовании методом мюонной радиографии лавового купола Сева-Синзан восточного склона вулкана Усу (Япония) [6]. Каждая точка на эмульсионной томограмме соответствует прохождению через детектор одного космического мюона. Сравнивая плотность мюонного потока после прохождения через мишень со свободно падающим из атмосферы потоком, можно определять непрозрачность геологических или иных плотных структур.

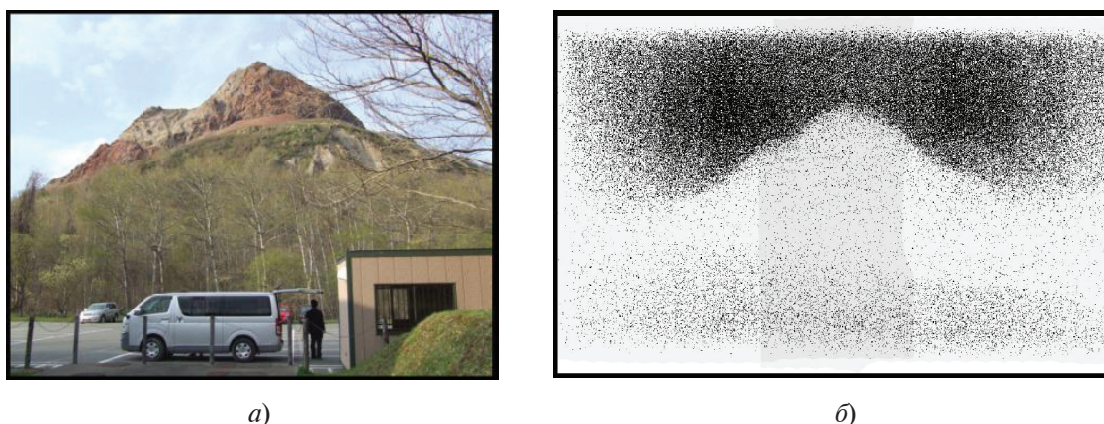


Рис. 6. Ослабление потока космических мюонов в результате прохождения большой массы вещества

а – фотография исследуемого объекта; *б* – его томограмма, полученная в ядерной эмульсии

Мониторинг природных явлений, таких как извержение вулканов, имеет огромное значение, как научное, так и социальное. Особый интерес радиографические исследования вулканов вызывает в странах, где существуют области повышенной вулканической и сейсмической активности в непосредственной близости от населенных областей (Россия, Япония, Италия и др.). Здесь требуется тщательный мониторинг изменений объемов и плотностей, вызванных перемещением магмы, газов и воды, а также изменений их физических и химических показателей. Подробное представление о внутренней структуре вулкана является ключом к оценке и прогнозированию его состояния.

Для исследований методом мюонной радиографии современные технологии используют как эмульсионные детекторы, так и электронное оборудование. При этом применение электронных детекторов осложнено проблемами с электропитанием оборудования, его весом и доставкой, что имеет принципиальное значение для труднодоступных или представляющих опасность объектов, таких как вулканы или поврежденные атомные реакторы. Эмульсионные трековые детекторы лишены этих недостатков: они могут быть собраны из простых компактных модулей небольшого веса, не требуют дополнительных источников питания и присутствия человека.

Первые исследования методом радиографии, осуществленные в рамках наук о Земле и земной поверхности, мотивировались необходимостью характеризовать геологические нагрузки в подземных структурах и осуществить разведку полезных ископаемых. Пример разведки полезных ископаемых при помощи измерения интенсивности проникающей (мюонной) компоненты космических лучей приведен на рис. 7. Распределение показывает изменение интенсивности мюонной компоненты космических лучей в зависимости от плотности слоев грунта, расположенных над зоной детекторов. Аналогичным образом метод подземной радиографии применяется для контроля долговременных хранилищ, где требуется детальное знание геологического окружения (состава и границ различных пластов), для горнодобывающей промышленности и для геофизики шахт.

Впервые идею использования потока мюонов космических лучей для обнаружения флуктуаций плотности в структуре археологических объектов реализовал нобелевский лауреат Л. Альварес более 40 лет назад [7] для поиска скрытых камер в пирамиде фараона Хефрена. Более миллиона мюонных событий были зарегистрированы двумя стримерными камерами площадью $1,8 \text{ м}^2$ каждая. С их помощью исследователи установили отсутствие потайных пустот в теле пирамиды (рис. 8, *а*).

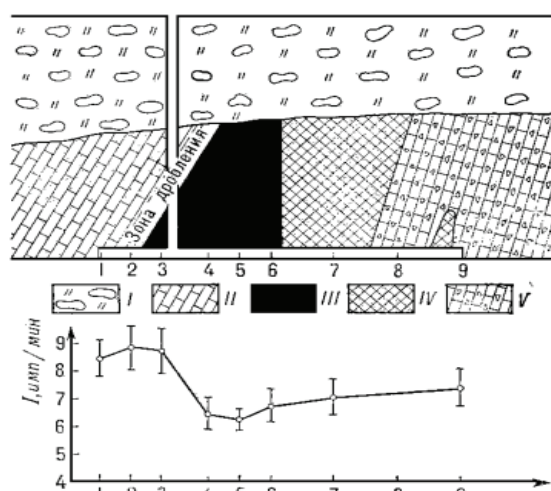


Рис. 7. Пример разведки полезных ископаемых при помощи измерения интенсивности проникающей (мюонной) компоненты космических лучей

В 2010–2013 гг. группа ученых Мексиканского национального автономного университета под руководством А. Менчака исследовала одну из крупнейших древних пирамид на Земле, пирамиду Солнца в Мексике (рис 8, б), методом мюонной радиографии [8], установив детекторы в прорытом под ней тоннеле. Исследования проводилось с целью поиска скрытых камер, но дали неожиданный результат: оказалось, что плотность грунта, заполняющего каменную оболочку, на разных сторонах пирамиды различается на 20 % из-за высыхания грунта с одной стороны, что угрожает разрушением пирамиды.

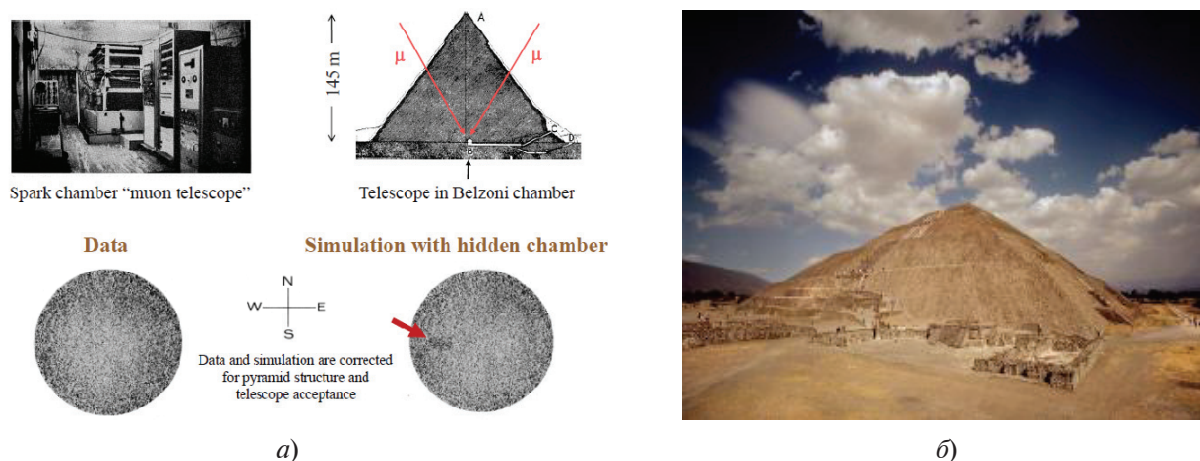


Рис. 8. Мюонная радиография для исследования флуктуаций плотности пирамид
 а – схема поиска скрытых камер в пирамиде фараона Хефрена; б – пирамида Солнца (Мексика)

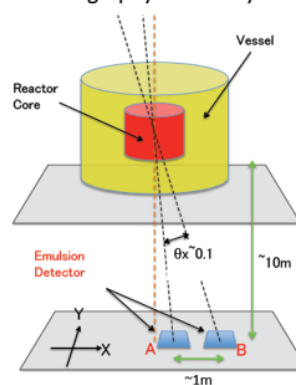
Метод мюонной радиографии с таким же успехом может использоваться для исследования состояния крупных промышленных объектов (мосты, дамбы, доменные печи и др.), когда требуется оценить техническое состояние или безопасность этих объектов (например,

выявить наличие крупных полостей, определить состояние внутренних конструкций, уровень грунтовых вод и т.п.). Важнейшей областью применения метода является мониторинг внутреннего состояния ядерных промышленных объектов (например, реакторов атомных станций), особенно при их повреждении или при невозможности проведения измерений иными средствами (например, в случае, если объект обесточен или существует опасность пребывания людей в зоне реактора). Этот метод был применен при исследовании состояния атомного реактора станции Фукусима в Японии, поврежденного цунами в марте 2011 г. (рис. 9, *а*). На рис. 9, *б* показана схема установки эмульсионных камер для контроля состояния работающего реактора методом мюонной радиографии на основе эмульсионных детекторов.



а)

Setup of tomography test in Joyo reactor plant



б)

Рис. 9. Применение метода мюонной радиографии при обследовании атомных реакторов

а – разрушенный реактор атомной станции Фукусима; *б* – схема установки тестовых эмульсионных камер на работающем реакторе Джойо (Япония) для контроля состояния реактора методом мюонной радиографии

Монтаж тестовых эмульсионных детекторов мюонной радиографии под работающим реактором Джойо (Япония) и полученные с их помощью томограммы показаны на рис. 10.

Детекторы на основе ядерных эмульсий, благодаря самому высокому из всех существующих детекторов пространственному разрешению, чрезвычайно компактны. Как правило, трековые детекторы на основе ядерных фотоэмульсий представляют собой плотно упакованные стопки слоев ядерной эмульсии толщиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Внешний вид элемента мюонного детектора зависит от условий проведения конкретного эксперимента. Возможные варианты монтажа эмульсионных блоков показаны на рис. 11.

На рис. 12 дано сравнение детекторов двух различных типов, эмульсионного и электронного. Очевидное преимущество эмульсионных трековых детекторов обеспечивается простотой конструкции, компактностью (площадь эмульсионного детектора в 1000 раз меньше площади такого же по эффективности электронного детектора) и независимостью от источников электропитания, что является весьма существенным фактором, например, в условиях разрушенного ядерного реактора. Кроме того, за весь период экспозиции эмульсионных детекторов их эксплуатация не требует присутствия человека, что особенно важно в условиях повышенной радиации. При этом необходимо отметить, что сами эмульсионные трековые детекторы не являются источником дополнительного излучения.

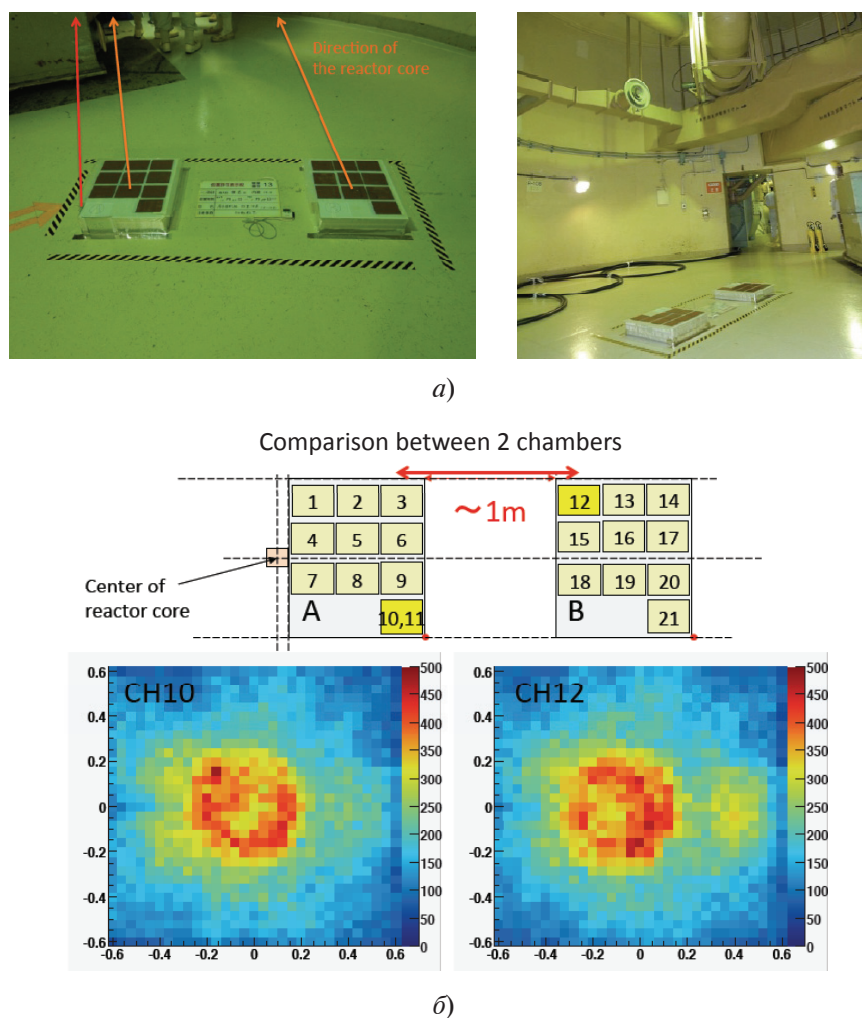


Рис. 10. Монтаж тестовых эмульсионных детекторов мюонной радиографии под работающим реактором Джойо (Япония)

a — установка эмульсионных трековых детекторов под активной зоной реактора;
б — томограммы, полученные с помощью эмульсионных детекторов

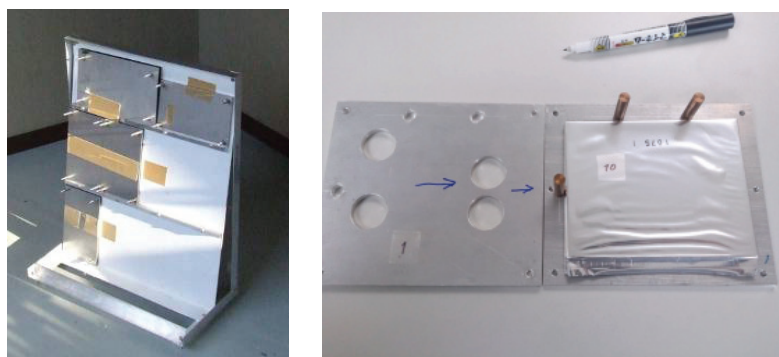


Рис. 11. Возможные варианты монтажа эмульсионных блоков мюонного детектора, размер одного эмульсионного блока 10×12 см

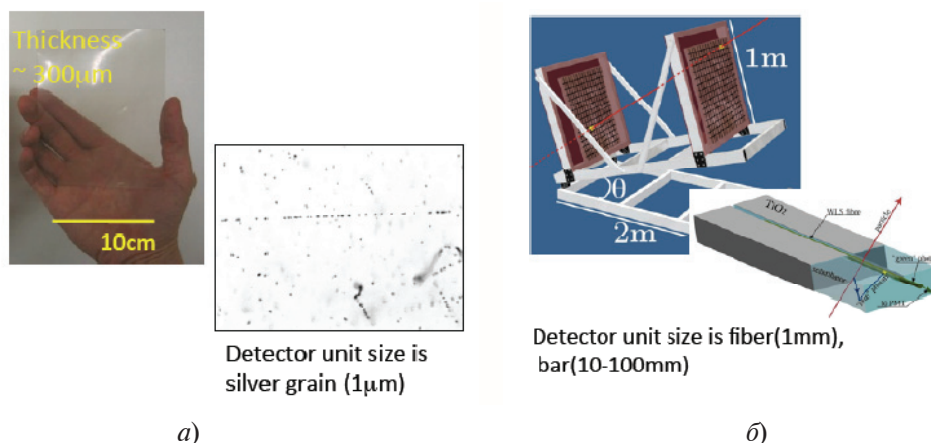


Рис. 12. Два детектора, дающих возможность получить изображение объекта с одинаковым разрешением

a — регистрирующая пластина эмульсионного детектора; *б* — регистрирующие блоки электронного детектора

Детекторы для мюонной радиографии, надежно защищенные от неблагоприятных внешних воздействий защитным кожухом, могут экспонироваться в любых условиях, вплоть до экстремальных, сколь угодно продолжительное время (рис. 13) [12].



Рис. 13. Защита эмульсионных трековых детекторов от воздействия внешних природных факторов. Исследование состояния вулкана Стромболи (Италия)

Высокая разрешающая способность — важнейшее преимущество эмульсионных трековых детекторов, обусловленное свойствами ядерной эмульсии. Ни один из известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое дает ядерная эмульсия: при размере зерна 0,3–1 микрон отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0,8 микрона, а при определенных условиях может составлять 0,2 микрона. Использование двусторонней эмульсии позволяет достигать точности в определении углов лучше, чем миллирадиан. Преимущества эмульсионных трековых детекторов как интегральных приборов, накапливающих информацию в условиях малых потоков частиц в течение долгого времени, использовались как в аэростатных [9–10], так и в спутниковых экспериментах с космическими лучами [11]. Кроме того, метод дает уникальную возможность создания трехмерной карты плотности исследуемой

структуры (промышленного или геологического объекта) при получении информации с нескольких мюонных детекторов, регистрирующих мюонные потоки под разными углами. Распространенные в настоящее время методы исследования (гравиметрия, электронная томография) имеют значительные ограничения и недостатки, такие как неопределенность обратной задачи, сложности при развертывании оборудования, высокая стоимость и др. Метод мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов является перспективным альтернативным методом зондирования геологических структур.

В настоящее время применение метода мюонной радиографии в научной и хозяйственной практике России находится на начальной стадии разработки и тестирования, в то время как во многих странах мира метод эффективно используется в научных и практических целях. Проведение уже первых проведенных тестовых экспериментов в России позволило продемонстрировать возможности метода и перспективы его внедрения в различных областях исследований.

В 2012–2014 гг. сотрудниками ФИАН и НИИЯФ МГУ были поставлены три тестовых эксперимента с целью подтвердить применимость метода мюонной радиографии для наблюдения крупных объектов [13–15]. Первый в России эксперимент с применением эмульсионных трековых детекторов для мюонной радиографии был проведен в период с 16 июля по 3 сентября 2012 г. в Московском государственном университете. Исследуемым объектом была стальная колонна весом 20 т (ядро магнита циклотрона НИИЯФ МГУ), которая играла роль массивного поглотителя мюонов космических лучей и создавала «тень» в потоке этих мюонов. Детекторы, установленные в теле стальной колонны и вне ее, экспонировались в течение 49 суток (рис. 14).

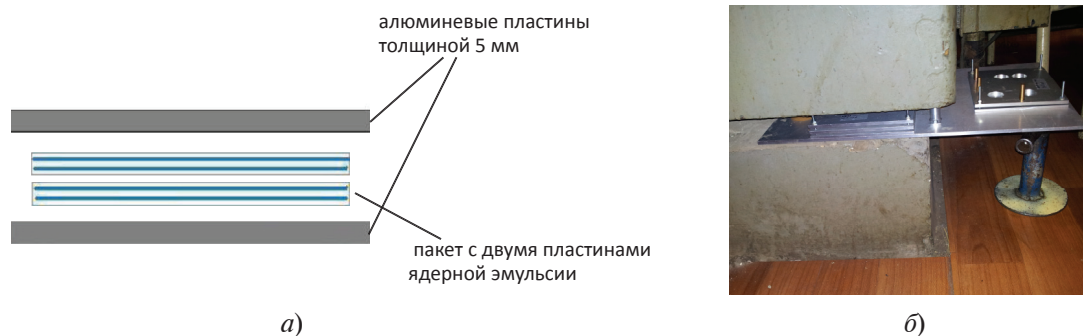


Рис. 14. Монтаж эмульсионных детекторов для первого эксперимента по мюонной радиографии ФИАН — НИИЯФ МГУ

а — схема расположения слоев эмульсии между металлическими пластинами; *б* — фотография установленных детекторов мюонной радиографии в теле стальной колонны-поглотителя и вне ее

Угловые распределения частиц, полученные в первом тестовом эксперименте, продемонстрировали изменения потоков мюонов, приходящих на детектор в выделенном диапазоне углов, в зависимости от длины пути в железном поглотителе (колонне). Распределения находятся в полном соответствии с предсказаниями модельных расчетов авторов (рис. 15).

Второй тестовый эксперимент был проведен в период с 13 июня по 25 октября 2013 г., таким образом, экспозиция детекторов составила 135 дней. Объектом наблюдения был массивный инерционный элемент бегового барабана испытательного шинного стенда (рис. 16). С помощью эмульсионных детекторов путем регистрации особенностей углового распределения атмосферных мюонов, пришедших в определенном телесном угле, на полученных томограммах удалось четко «увидеть» изучаемый объект — массивные цилиндрические части испытательного стенда.

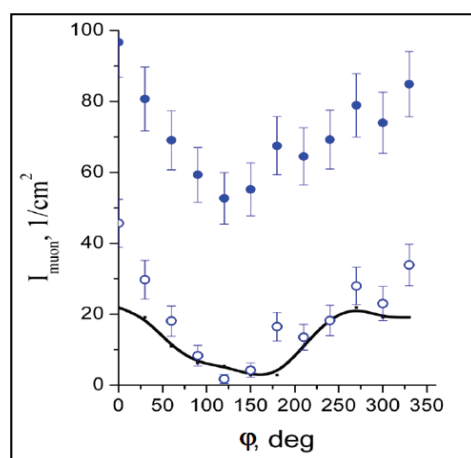
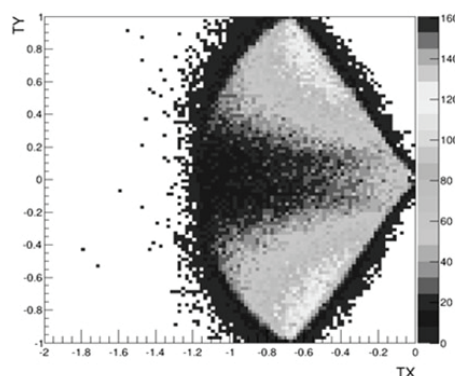


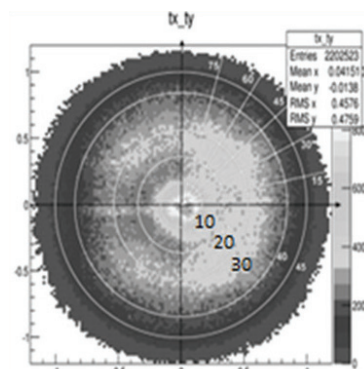
Рис. 15. Угловые распределения потоков мюонов при разных азимутальных углах ϕ и фиксированном диапазоне зенитных углов θ , полученные в результате первого тестового эксперимента, в сравнении с результатами модельных расчетов
 – расчет, ● эксперимент, ○ эксперимент с вычетом фона за 2 месяца



а)



б)



в)

Рис. 16. Исследование массивного инерционный элемента шинного стенда НИИШП

а – испытательный стенд, массивные части которого исследовались методом мюонной радиографии;
 б – результат модельного расчета изменения потока мюонов в эксперименте; в – экспериментальное распределение потока мюонов, полученное методом мюонной радиографии на испытательном стенде

Третий эксперимент по методу мюонной радиографии был поставлен на глубине 30 м в подземной шахте, расположенной на территории Геофизической службы РАН (г. Обнинск) (рис. 17). 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. 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. Для того, чтобы определить оптимальное время экспозиции, достаточное для получения необходимой информации, детекторы экспонировались в течение разных промежутков времени (2 и 4 месяца).

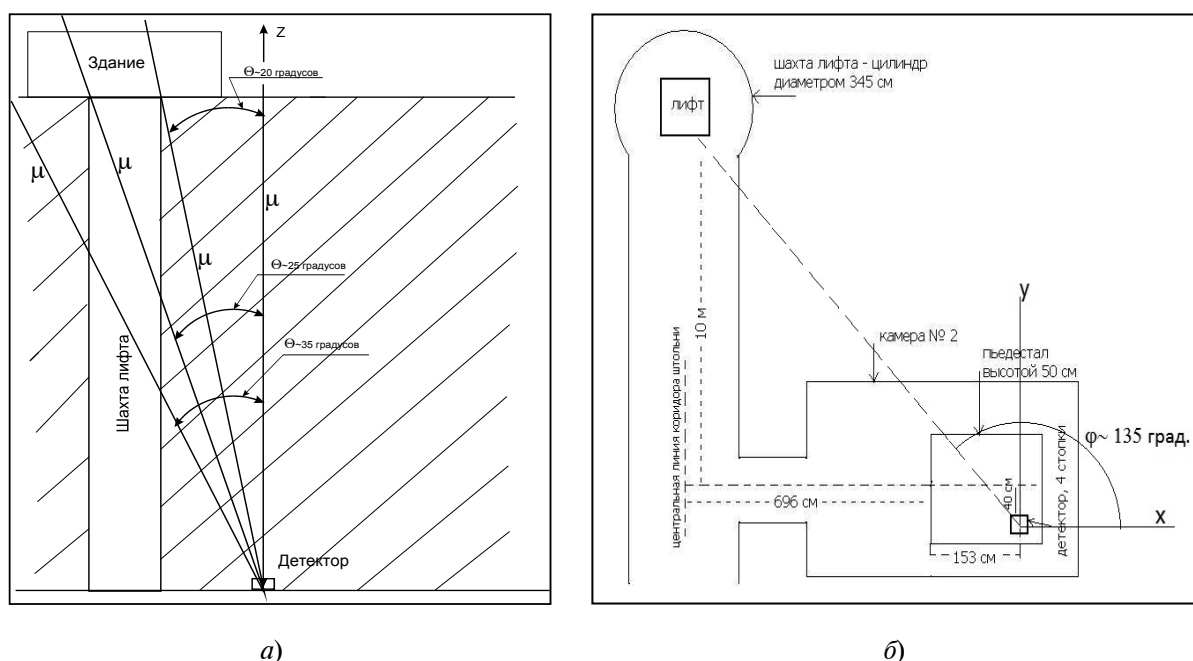


Рис. 17. Схема эксперимента в шахте на глубине 30 м

a – боковое изображение шахты лифта и подземных детекторов – показан диапазон угла θ ($20-35^\circ$), в котором должен наблюдаться «сигнал» от шахты; $\bar{b}$ – относительное расположение шахты лифта и подземных детекторов (вид сверху), показана ориентация осей x и y в системе детектора

В результате на полученных с помощью ядерных эмульсий угловых распределениях мюонов явно виден сигнал от шахты лифта и другие неоднородности в грунте (рис. 18). Потoki мюонов в наземных и подземных детекторах на глубине 30 метров отличаются примерно в пятьдесят раз, что хорошо согласуется с расчетными оценками.

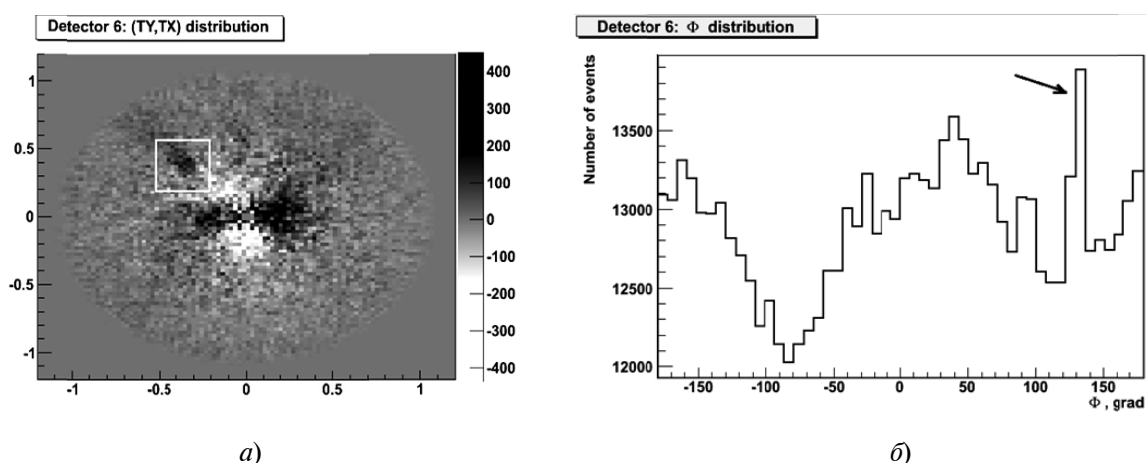


Рис. 18. Явно видимый сигнал от шахты лифта и неоднородностей в грунте

a – двумерное распределение потока мюонов на глубине 30 метров после вычета фона, усредненного по углу φ ; b – распределение потоков мюонов на глубине 30 метров по азимутальному углу φ ; пик в районе 135° соответствует направлению на шахту лифта

Анализ результатов, полученных сотрудниками ФИАН и НИИЯФ МГУ в тестовых экспериментах 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 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. Провал земли в г. Березняки. Available at: <http://www.newsru.com/russia/20may2015/voronka.html>.
2. Провал грунта в Соликамске. Available at: <http://www.newsru.com/russia/20nov2014/hole.html>.
3. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Галкин В.И., Деденко Л.Г. и др. Тестовые эксперименты по мюонной радиографии в России на основе эмульсионных трековых детекторов. Письма в ЭЧАЯ, 2015, т. 12, № 5 (196), с. 1100–1111.
4. Щедрина Т.В., Браднова В., Вокалова А. и др. Ядерная физика, 2007, 70, № 7, с. 1271.
5. Ereditato A. et al. R&D on nuclear emulsion detectors for muon-radiography of large structures, Presented in the International Workshop of High Energy Geophysics 2011 – Muon and Neutrino Radiography, Tokyo, October 2011.
6. Tanaka H.K.M. et al. Geo. Res. Lett. 34, 2007, L22311.
7. Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E. et al. Search for hidden chambers in the pyramids, Science, 167, 1970, 832.
8. Huge Mexican pyramid could collapse like a sandcastle. Available at: https://www.newscientist.com/article/mg22129594.100-huge-mexican-pyramid-could-collapse-like-a-sandcastle/#.Ux8wK_ldVbq.
9. Апанасенко А.В., Вальчак М., Горячих А.А., Гончарова Л.А., Добротин Н.А., и др. Аэростатные исследования первичных космических лучей и их взаимодействий с веществом при высоких энергиях. Известия АН СССР, сер. физ. т. 53, № 2, стр. 250–252, 1989.
10. Гальпер А.М., Грачев В.М., Дмитренко В.В., Кондакова О.Н., Мартин И.М., и др. Измерение потоков электронов и гамма-квантов высокой энергии в районе Бразильской магнитной аномалии на высотном аэростате, Ядерная физика, т. 56, вып. 3, стр. 100–104, 1993.
11. Гальпер А.М., Дмитренко В.В., Полухина Н.Г. Электроны высоких энергий в радиационном поясе Земли по данным измерений на спутнике «Интеркосмос-Болгария-1300». Материалы Международной Конференции «ИНТЕРКОСМОС-30», Москва, 2001, стр. 5.
12. Russo A. et al., Investigation of the Unzen and Stromboli volcanoes with nuclear emulsions. International Workshop on Muon and Neutrino Radiography 2012.
13. Деденко Л.Г., Манагадзе А.К., Роганова Т.М., Багуля А.В., Владимиров М.С. и др., Перспективы исследований геологических структур методом мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов. Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 2014 г., том. 41, № 8, стр. 34–45.
14. Деденко Л.Г., Манагадзе А.К., Роганова Т.М., Багуля А.В., Владимиров М.С. и др. Перспективы исследований геологических структур методом мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов / Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 2014 г., том. 41, № 8, стр. 34–45.
15. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Галкин В.И., Деденко Л.Г. и др. Тестовые эксперименты по мюонной радиографии в России на основе эмульсионных трековых детекторов, Письма в ЭЧАЯ, 2015, т. 12, № 5 (196), с. 1100–1111.

References

1. *Proval zemli v g. Berezhnyaki* [An earth failure in the town of Berezhniaky]. Available at: <http://www.newsru.com/russia/20may2015/voronka.html>.
2. *Proval grunta v Solikamske* [A soil failure in Solikamsk]. Available at: <http://www.newsru.com/russia/20nov2014/hole.html>.

3. Alexandrov A.B., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., Galkin V.I., Dedenko L.G., et al. (2015) *Testovye eksperimenty po myuonnoy radiografii v Rossii na osnove emul'sionnykh trekovykh detektorov. Pis'ma v EChAYa* [Test experiments on muonic radiography in Russia on the basis of emulsion track detectors. The «Letters to the journal» Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, «Letters to PEPAN», vol. 12, no. 5 (196), pp. 1100–1111.
4. Shchedrina T.V., Bradnova V., Vokalov A., et al. (2007) *Yadernaya fizika* [Nuclear physics], vol. 70, no. 7, 1271 p.
5. Ereditato A. et al. R&D on nuclear emulsion detectors for muon-radiography of large structures, Presented in the International Workshop of High Energy Geophysics 2011 – Muon and Neutrino Radiography, Tokyo, October 2011.
6. Tanaka H.K.M. et al. *Geo. Res. Lett.* 34, 2007, L22311.
7. Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E. et al. Search for hidden chambers in the pyramids, *Science*, 167, 1970, 832.
8. Huge Mexican pyramid could collapse like a sandcastle. Available at: https://www.newscientist.com/article/mg22129594.100-huge-mexican-pyramid-could-collapse-like-a-sandcastle/#.Ux8wK_IdVbq.
9. Apanasenko A.V., Valchak M., Goryatshikh A.A., Goncharov L.A., Dobrotin N.A., et al. (1989) *Aerostatnye issledovaniya pervichnykh kosmicheskikh luchey i ikh vzaimodeystviy s veshchestvom pri vysokikh energiakh* [Aerostat researches of primary space beams and their interactions with substance at high energies]. *Izvestiya AN SSSR, ser. fiz.* [News of Academy of Sciences of the USSR, physics], vol. 53, no. 2, pp. 250–252.
10. Galper A.M., Grachev V.M., Dmitrenko V.V., Kondakova O.N., Martin I.M., et al. (1993) *Izmerenie potokov elektronov i gamma-kvantov vysokoy energii v rayone Brazil'skoy magnitnoy anomalii na vysotnom aerostate, Yadernaya fizika* [Measuring the flow of electrons and gamma rays of high energy region of the Brazilian magnetic anomaly on high-altitude balloon, nuclear physics], vol. 56, no. 3, pp. 100–104.
11. Galper A.M., Dmitrenko V.V., Polukhina N.G. (2001) *Elektrony vysokikh energi v radiatsionnom poyase Zemli po dannym izmereniy na sputnike «Interkosmos-Bolgariya-1300», Materialy Mezhdunarodnoy Konferentsii «INTERKOSMOS-30»* [Electrons of high energy in a radiation belt of Earth according to measurements on the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite, Materials of the International INTERKOSMOS-30 Conference]. Moscow, p. 5.
12. Russo A. et al. Investigation of the Unzen and Stromboli volcanoes with nuclear emulsions, International Workshop on Muon and Neutrino Radiography 2012.
13. Dedenko L.G., Managadze A.K., Roganova T.M., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., et al. *Perspektivy issledovaniy geologicheskikh struktur metodom myuonnoy radiografii na osnove emul'sionnykh trekovykh detektorov, Kratkie soobshcheniya po fizike Fizicheskogo instituta im. P.N. Lebedeva RAN 2014 g.* [Prospects of researches of geological structures by method of muonic radiography on the basis of emulsion track detectors, Short messages on physics of Physical institute named after P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences of 2014], vol. 41, no. 8, pp. 34–45.
14. Dedenko L.G., Managadze A.K., Roganova T.M., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., et al. *Perspektivy issledovaniy geologicheskikh struktur metodom myuonnoy radiografii na osnove emul'sionnykh trekovykh detektorov, Kratkie soobshcheniya po fizike Fizicheskogo instituta im. P.N. Lebedeva RAN 2014 g.* [Prospects of researches of geological structures by method of muonic radiography on the basis of emulsion track detectors, Short messages on physics of Physical institute named after P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences of 2014], vol. 41, no. 8, pp. 34–45.
15. Alexandrov A.B., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., Galkin V.I., Dedenko L.G., et al. (2015) *Testovye eksperimenty po myuonnoy radiografii v Rossii na osnove emul'sionnykh trekovykh detektorov. Pis'ma v EChAYa* [Test experiments on muonic radiography in Russia on the basis of emulsion track detectors, the Letter in EChAYa], vol. 12, no. 5 (196), pp. 1100–1111.