

УДК 53.087.53; 539.1; 53.06; 53.082.78; 550.31

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПТИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА ЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЕВ В СОВРЕМЕННЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ С ТРЕКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

С. Г. Васина, Н. И. Старков, Н. Г. Полухина, Т. В. Щедрина

*В статье описан тестовый эксперимент с использованием ядерной фотоэмульсии российского производства, целью которого было создание методики оптимизации количества эмульсионных слоев для современных ядерно-физических экспериментов. Впервые в России в автоматическом режиме сканирование и реконструкция треков в ядерной фотоэмульсии проводились в диапазоне углов до 75°. Приведен анализ реконструкции треков в различных конфигурациях детектора, выполнено сравнение полученных в эксперименте данных с результатами моделирования. Проведена оценка минимального числа фотоэмульсионных пластин, необходимых, в частности, для использования эмульсионных детекторов в экспериментах по мюонной радиографии.*

**Ключевые слова:** мюонная радиография, ядерная фотографическая эмульсия.

*Введение.* Развитие технологий производства современной ядерной фотографической эмульсии, прогресс в создании прецизионной техники и сканирующих автоматических оптических комплексов нового поколения [1, 2] дали возможность перейти на качественно более высокий уровень проведения экспериментов и значительно расширить круг решаемых задач в фундаментальных и прикладных исследованиях с использованием ядерной фотоэмульсии в качестве трекового детектора.

Целью данной работы было проведение тестового эксперимента для создания методики оптимизации количества эмульсионных слоев для ядерно-физических экспериментов на примере оценки минимального числа эмульсионных пластин при условии со-

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: tvshchedrina@gmail.com.

хранения высокой эффективности поиска треков заряженных частиц в эмульсии и точности их реконструкции даже при больших углах прохождения частиц через эмульсию. Эта методика важна для разработки конструкции трековых детекторов в современных ядерно-физических экспериментах, в частности, в работах по мюонной радиографии крупных природных и промышленных объектов, когда для восстановления внутренней структуры объекта используется множество детекторов.

*Постановка эксперимента.* Тестовый эксперимент проводился в лаборатории Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН). Детектор располагался в комнате на первом этаже главного здания, схема проведения эксперимента и фотография детектора на месте экспозиции представлены на рис. 1. В детекторе регистрировались потоки атмосферных мюонов, которых приходит примерно 10000 штук на квадратный метр в минуту.



Рис. 1: (а) схема проведения эксперимента (сделано с помощью GooglePro Earth); (б) фото детектора на месте экспозиции в лаборатории ФИАН.

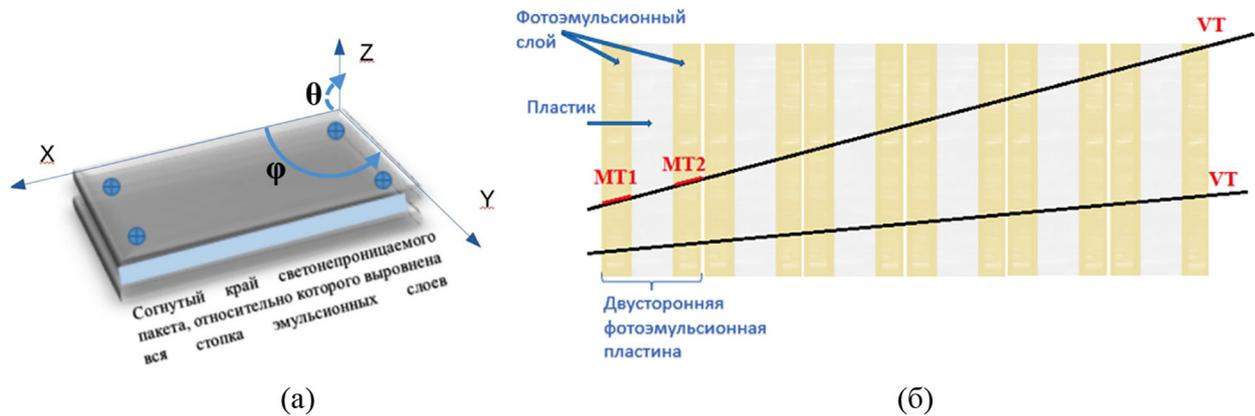


Рис. 2: (а) схематическое изображение детектора с десятью эмульсионными слоями, зажатыми сверху и снизу двумя металлическими пластинами и выравненными вдоль горизонтальной оси; (б) схематическое изображение нескольких двухсторонних фотоэмульсионных пластин, реконструированные микротреки – МТ, объемные треки – VT.

Детектор состоял из 10 двухсторонних эмульсионных пластин размером  $10 \times 12.5$  см<sup>2</sup> (каждая пластина представляла собой пластиковую основу 200 микрон, на которую с двух сторон была полита ядерная фотоэмульсия толщиной 50 микрон). Для идентификации эмульсионных пластин все они были промаркированы в темной комнате, и после этого каждая была упакована под вакуумом в светонепроницаемый пакет. Все эмульсионные слои выравнены относительно горизонтальной оси и прижаты двумя металлическими пластинами, как показано на рис. 2. Во время сборки детектора эмульсионные слои были перемешаны относительно порядка их расположения при хранении для исключения из обработки накопленных до момента экспозиции фоновых треков.

Время экспозиции атмосферными мюонами детектора составило один месяц, по истечении которого детектор был разобран, эмульсионные слои проявлены. После проявки эмульсионные пластины отсканированы с помощью Полностью Автоматизированного Измерительного КОМПлекса (ПАВИКОМ), позволяющего обрабатывать фотоэмульсионные пленки со скоростью до 190 см<sup>2</sup>/ч в диапазоне углов до 75° [1]. Область сканирования каждого эмульсионного слоя составила  $90 \times 105$  мм<sup>2</sup>, т. к. был сделан небольшой технический отступ от края пластины. В процессе сканирования в режиме реального времени производится реконструкция так называемых микротреков (micro track, МТ) – треков, проходящих через один чувствительный слой двухсторонней эмульсионной пластины. Дальнейший цикл процедуры реконструкции треков, так называемых объемных

треков (volume track, VT), проходящих через несколько эмульсионных пластин, входящих в состав детектора, выполняется в offline режиме на UBUNTU Linux сервере при помощи пакета FEDRA [3].

*Моделирование эксперимента.* Моделирование прохождения мюонов через эмульсионный детектор выполнено с помощью пакета Geant4 [4], который позволяет полностью описать физический эксперимент: геометрию детектора, химический состав образующих его материалов, процессы, происходящие с частицами при прохождении через вещество. Общая информация о геометрии модельного эксперимента представлена на рис. 3, 4. Начало системы координат – точка  $(x, y, z)=(0, 0, 0)$ , см. рис. 1, 2. Технические характеристики, заложенные при моделировании помещений ФИАН и “Здания 1” (см. рис. 3, 4): материал с плотностью  $2.650 \text{ г/см}^3$ , внешние стены толщиной 1 м, внутренние – 0.3 м, перекрытия (полы) и крыша – 0.3 м, расстояние от ФИАН до “Здания 1” – 20 м.

При моделировании “Здания 1” заложены шесть перекрытий (полов) на расстоянии три метра друг от друга, внутри пять стен. Для удобства визуального восприятия трехмерная модель “Здания 1” немного повернута вокруг оси  $Z$ , в таком положении отчетливо видны перекрытия этажей и внутренние стены помещения, см. рис. 4.

При моделировании помещений ФИАН заложены длинный коридор  $\approx 20$  метров и два ряда кабинетов площадью  $6 \times 6 \text{ м}^2$  со стенами между ними и вдоль коридора, полы 2-го и 3-го этажей, крыша и более широкая часть крыла, выступающая на 0.5 м относительно остальной части крыла, см. фото на рис. 3(б), а также полы 2-го и 3-го этажей, крыша. Часть здания, где стоит детектор, разделена на три кабинета, промоделированы окна и полуколонны снаружи. Навес крыши над колоннами не заложен в модель, остальная часть здания пустая.

В результате получается набор микротреков: координаты входа и выхода заряженной частицы в слой эмульсии, потери энергии между этими точками, импульс для верхнего и нижнего слоев эмульсии каждой пластины, идентификатор частицы (particle data group code, PDG), номер пластины, номер события и трека. В этом наборе сохраняется информация о прохождении мюонов через заложенные при моделировании трехмерные конструкции помещений.

*Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования.* Энергетический спектр мюонов, падающих на поверхность земли, взят из публикации [5], угловой спектр  $\sim \cos^2 \Theta$ . Основной задачей является оценка минимального количества пластин, необходимого для реконструкции треков даже под большими углами. Треки были ре-

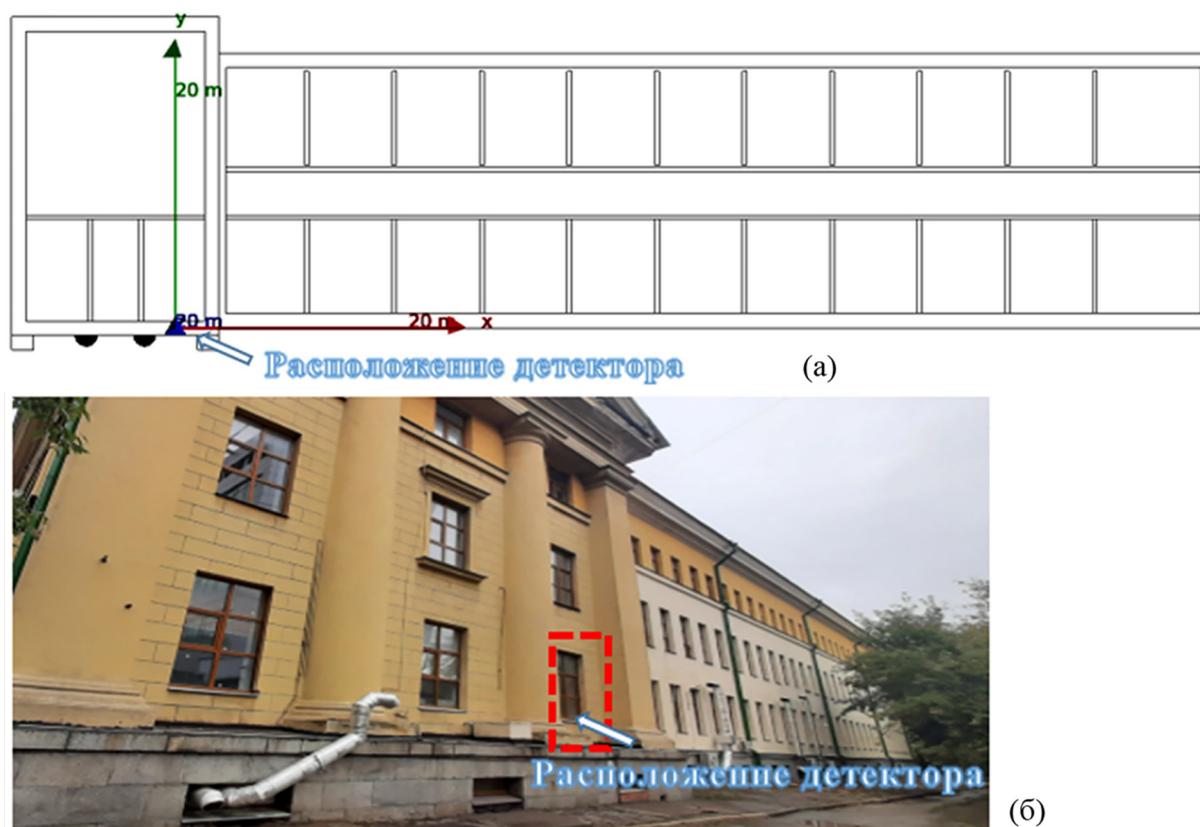


Рис. 3: (а) модель крыла здания ФИАН (вид сверху), где расположен детектор, и положение детектора на подоконнике лаборатории; (б) вид с улицы на окно с детектором в лаборатории ФИАН.

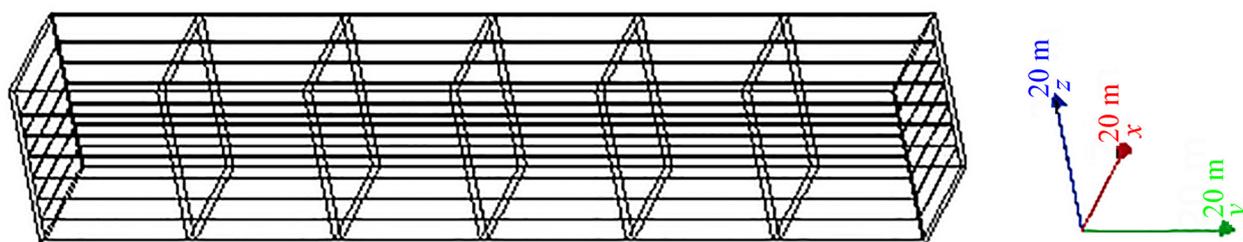


Рис. 4: Трёхмерная модель "Здания 1".

конструированы в наборах из 4, 6, 8 и 10 идущих подряд пластин, результаты соответствующих двумерных угловых распределений модельных расчетов представлены на рис. 5(а). При анализе данных моделирования в реконструкции участвовали только те треки, которые пересекли весь объём детектора, при анализе экспериментальных данных – три и более эмульсионных пластин, входящих в состав детектора. Каждый трек

характеризуется угловыми переменными  $\Theta$  и  $\phi$  – зенитным и азимутальным углами, задающими луч в пространстве, где  $\Theta$  – зенитный угол (угол к оси  $Z$ , меняется от 0 до 75 градусов, ограничения сканирующей системы),  $\phi$  – азимутальный угол (отсчитывается от оси  $X$  в направлении оси  $Y$  и меняется от 0 до 360 градусов), см. рис. 2(а).

Космические мюоны по-разному поглощаются в зависимости от количества вещества, пройденного ими в направлении  $(\phi, \Theta)$ . По разнице зарегистрированных потоков мюонов в разных направлениях можно судить о распределении материала внутри объекта. Таким образом, результатом экспериментов с использованием методики мюонной радиографии является число мюонов, зарегистрированных детектором в элементе телесного угла  $(\Delta\phi, \Delta\Theta)$  в определённом направлении  $(\phi, \Theta)$ .

На рис. 5 представлены результаты эксперимента (б) и модельных расчетов (а). Двумерные угловые распределения треков на рис. 5 и 6 представлены в полярных координатах  $(\cos \Theta, \phi)$ , цветовая шкала соответствует числу зарегистрированных в детекторе мюонов. На распределении с результатами моделирования, как и на данных, полученных в эксперименте, отчетливо видна тень от “Здания 1”, что соответствует диапазону углов  $\varphi = (270^\circ - 310^\circ)$  и  $\Theta = (40^\circ - 60^\circ)$ , для удобства отмечено белой пунктирной линией, см. рис. 5.

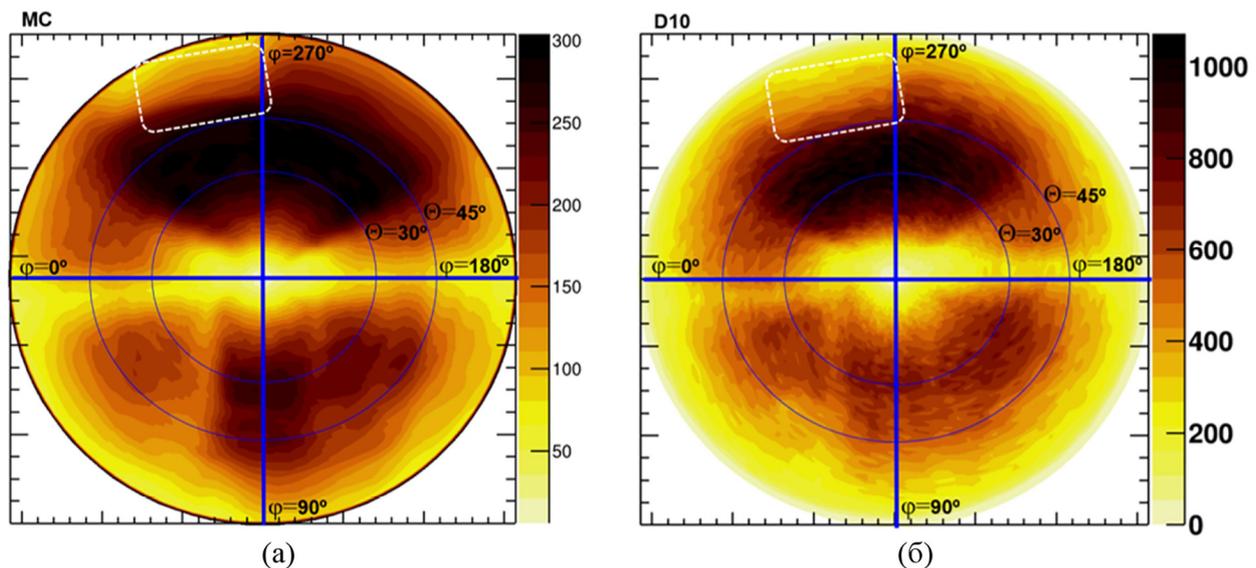


Рис. 5: (а) угловое распределение треков по результатам модельных расчетов с помощью пакета *Geant4*; (б) экспериментальные результаты детектора, состоящего из 10-ти фотоэмульсионных пластин.

Большой поток мюонов в верхней полусфере в диапазоне углов  $\phi = (180^\circ - 360^\circ)$ ,  $\theta = (20^\circ - 45^\circ)$  в горизонтальном направлении соответствует уличному просвету между “Зданием 1” и помещением ФИАН, где был установлен детектор. Асимметрия в нижней полусфере данного двумерного распределения интервала углов  $\phi = (10^\circ - 70^\circ)$  и  $\theta = (70^\circ - 170^\circ)$  отвечает положению детектора в здании ФИАН, слева от места установки детектора крыло здания ФИАН намного длиннее (см. рис. 1 фото GooglePro Earth).

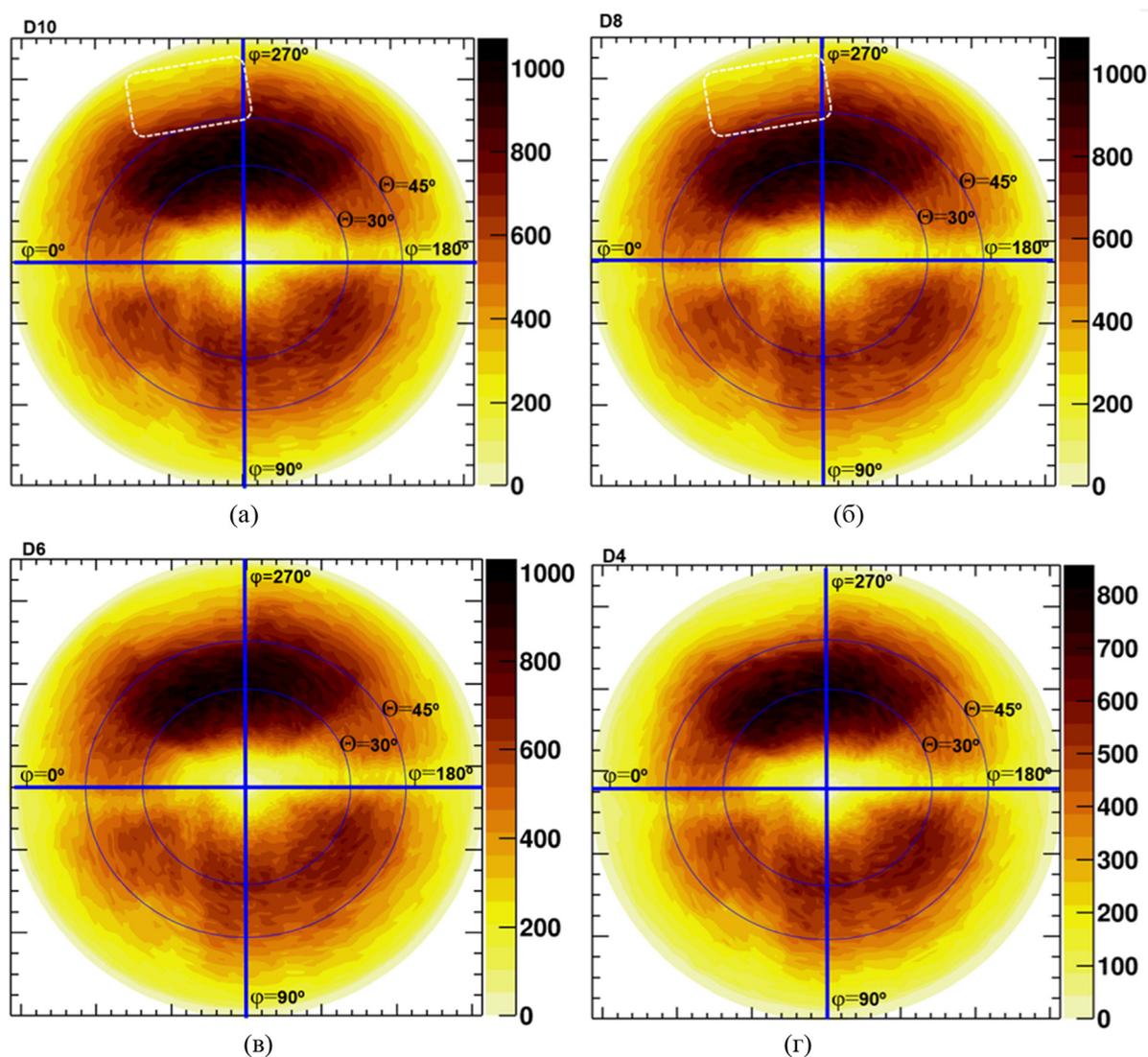


Рис. 6: Экспериментальное угловое распределение треков мюонов, прошедших минимум через три пластины детектора для различных его конфигураций: детектор состоит из 10-ти, 8-ми, 6-ти и 4-х эмульсионных пластин, соответственно.

Двумерные угловые распределения на основе экспериментальных данных представлены на рис. 6 и наглядно демонстрируют уменьшение потока мюонов при прохождении через “Здание 1”, что соответствует интервалу углов  $\varphi = (270^\circ - 310^\circ)$  и  $\Theta = (40^\circ - 60^\circ)$ , для удобства отмечено белой пунктирной линией для вариантов сборки детектора из 10 (рис. 6(а)) и 8 (рис. 6(б)) пластин, соответственно. Для сборок детектора с меньшим числом пластин: рис. 6(в),(г) – провал в области углов, отвечающих геометрии и местоположению “Здания 1”, также присутствует, однако стоит отметить, что при уменьшении числа эмульсионных пластин в детекторе данная область углов становится более размытой по причине уменьшения статистики. Т. е. при работе с большими углами сканирования  $\Theta$  до  $75^\circ$  необходимо большее число пластин.

На рис. 7 представлена развертка по углу  $\phi$  для диапазонов угла  $\Theta$ , при котором видна тень от “Здания 1”.

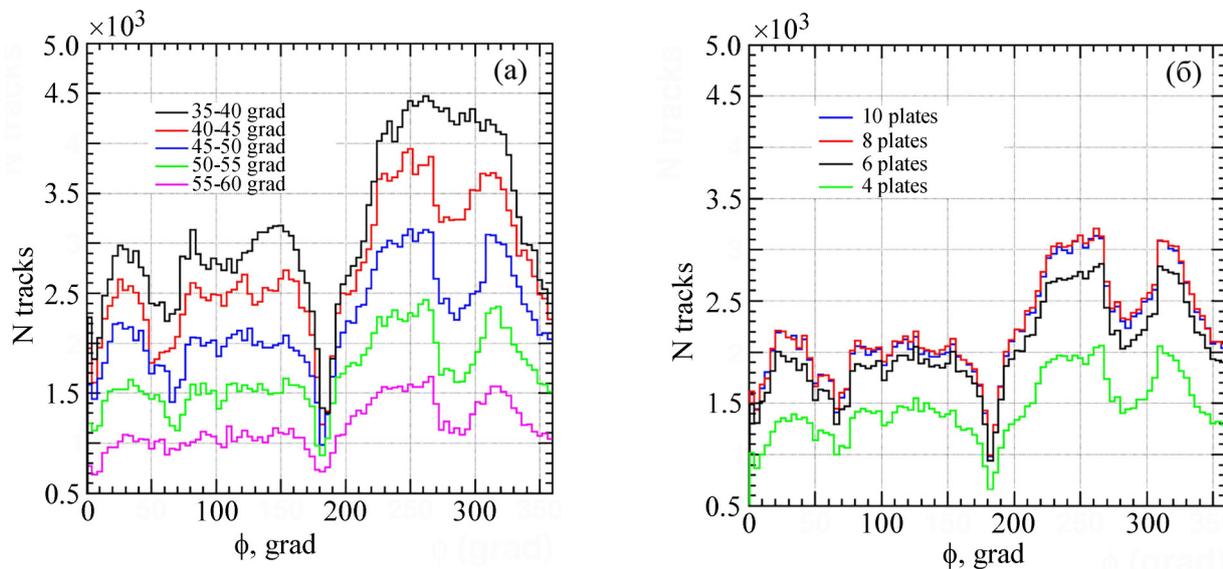


Рис. 7: (а) распределения по углу  $\phi$  для различных диапазонов угла  $\Theta$ ; (б) распределения по углу  $\phi$  при  $\Theta = 45 - 50^\circ$  для различного числа пластин, входящих в состав детектора.

Слева направо на рис. 7 первый провал:  $\varphi = (60^\circ - 70^\circ)$  в распределении по  $\phi$  соответствует внутренней вертикальной стене помещения ФИАН (см. фото на рис. 3(б)); второй провал:  $\varphi = 180^\circ$  соответствует внешней горизонтальной стене ФИАН; провал от “Здания 1”:  $\varphi = (270^\circ - 300^\circ)$ . Данные, представленные на рис. 7, наглядно демонстрируют, что при высокой эффективности реконструкции трека, в случае данного эксперимента – большей 80%, провал от “Здания 1” присутствует даже при небольшом

числе пластин, однако интенсивность зарегистрированных треков падает, что может быть критичным для регистрации объектов меньших размеров.

Таким образом, метод мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов дает возможность получения подробной томограммы исследуемого объекта с использованием новейших методов анализа изображений. Уникальность и преимущества методики состоят в том, что она осуществляет диагностику самых разнообразных природных и промышленных объектов с использованием экономичных и компактных детекторов достаточно простой конструкции, находя свое применение во многих прикладных исследованиях во всем мире, в частности, как перспективное дополнение к геофизическим и геологическим методам при анализе вулканических, сейсмических и карстовых процессов, в разведке полезных ископаемых, в области ядерной безопасности для радиационного мониторинга установок ядерно-энергетического комплекса, для осуществления неразрушающего контроля промышленных объектов.

В статье представлены модельные и экспериментальные результаты тестового эксперимента с использованием экспонированного атмосферными мюонами фотоэмульсионного детектора. Приведено описание постановки эксперимента и условия моделирования с использованием пакета Geant4. Целью эксперимента было создание методики оптимизации количества эмульсионных слоев для ядерно-физических экспериментов на примере определения минимального количества пластин в детекторе, необходимых для исследования внутренней структуры крупных объектов методом мюонной радиографии. Экспонировано и отсканировано 10 пластин фотоэмульсии, реконструкция треков произведена для различных комбинаций числа пластин, входящих в состав детектора. Экспериментальные результаты показали, что для исследования объектов, находящихся под большими углами к детектору ( $45^\circ < \Theta < 75^\circ$ ), необходимо минимум шесть фотоэмульсионных пластин, в то время как для объектов, располагающихся под малыми углами ( $\Theta < 45^\circ$ ) – достаточно четырех эмульсионных пластин.

Авторы выражают благодарность В. Тюкову за ценные рекомендации при проведении исследования, а также коллегам ООО “АВК Славич”, за помощь с производством и проявкой фотоэмульсионных пластин.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Alexandrov, N. Konovalova, N. Okateva, et al., *Measurement* **187**, 110244 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110244>.
- [2] A. Alexandrov, A. Buonauro, L. Consiglio, et al., *JINST* **11**, (2016). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/P06002>.

- [3] V. Tioukov, I. Kreslo, Y. Petukhov, G. Sirri, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **559**, 103 (2006).  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.214>.
- [4] S. Agostinelli, J. Allison, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **506**, 250 (2003).  
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- [5] J. Kremer, M. Boezio, M. L. Ambriola, et al., Physical Review Letters **83** (21), 4241 (1999).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4241>.

Поступила в редакцию 23 сентября 2022 г.

После доработки 24 октября 2022 г.

Принята к публикации 25 октября 2022 г.