

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ СВЯТО-ТРОИЦКОГО ДАНИЛОВА МОНАСТЫРЯ МЕТОДОМ МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ

© 2021 г. А. Б. Александров<sup>1)</sup>, С. Г. Васина<sup>1)</sup>, В. И. Галкин<sup>2)</sup>, Л. А. Гончарова<sup>1)</sup>, А. С. Коновалов<sup>3)</sup>, Н. С. Коновалова<sup>1)</sup>, П. С. Королев<sup>4)</sup>, А. А. Ларионов<sup>4)</sup>, И. А. Мельниченко<sup>5)</sup>, А. К. Манагадзе<sup>6)</sup>, Н. М. Окальева<sup>1)</sup>, Н. Г. Полухина<sup>1)</sup>, Т. М. Роганова<sup>6)</sup>, Ж. Т. Садыков<sup>5)</sup>, Н. И. Старков<sup>1)</sup>, Е. Н. Старкова<sup>1)</sup>, В. Э. Тюков<sup>1)</sup>, М. М. Чернявский<sup>1)</sup>, В. И. Шевченко<sup>7)</sup>, Т. В. Щедрина<sup>1)\*</sup>

Поступила в редакцию 24.06.2021 г.; после доработки 24.06.2021 г.; принята к публикации 24.06.2021 г.

Представлены результаты эксперимента по исследованию археологических объектов на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря города Переславль-Залесский, Ярославская область, проведенного методом мюонной радиографии. В статье дано описание эксперимента, представлены первые результаты анализа данных, демонстрирующие чувствительность выбранной методики к поставленной задаче.

DOI: 10.31857/S0044002721060027

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Метод мюонографии — инновационный метод получения информации о структуре массивных природных и промышленных объектов, который может применяться в самых различных областях: геологоразведка, мониторинг состояния ядерных реакторов, неразрушающий контроль крупных промышленных объектов, альтернативный геофизическим методам способ анализа сейсмических процессов. Мюонная радиография использует ту же концепцию, что и медицинская радиография (рентген): поглощение пучка (мюоны вместо рентгеновских лучей) при прохождении через вещество (порода или строительные материалы вместо человеческой плоти) и чувствительное устройство (детектор). Преимуществами метода являются его неинвазивность, использование природного источника излучения и высокая проникающая

способность атмосферных мюонов, проникающих на глубины до нескольких километров водного эквивалента. Поток проникающих мюонов на уровне моря составляет  $10^4/\text{м}^2$  в минуту. Сравнимая поглощение потока частиц различными частями исследуемого объекта, можно получить информацию о структуре данного объекта. В настоящее время эксперименты, проводимые методом мюонной радиографии, успешно осуществляются в ряде научных центров России, Италии, Швейцарии, Японии и других стран благодаря развитию методов автоматизированной системы обработки [1–5].

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представленная работа входит в ряд совместных исследований нескольких российских институтов при финансовой поддержке НИТУ “МИСиС” по изучению археологических объектов на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря города Переславль-Залесский, известного своими памятниками древнерусской архитектуры XII–XVII вв. Особое место среди них занимает Свято-Троицкий Данилов монастырь — один из древнейших в городе, основанный в 1508 г. Здание храма неоднократно ремонтировалось, достраивалось и перестраивалось, многие документы, в том числе технические планы помещений безвозвратно утеряны. Одной из поставленных задач научной группы было исследование на предмет наличия неизвестных подвальных помещений и фундамента здания церкви Похвалы Божьей Матери. Так

<sup>1)</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

<sup>2)</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия.

<sup>3)</sup>Российский государственный геологоразведочный университет им. Орджоникидзе, Москва, Россия.

<sup>4)</sup>Московская духовная академия, Сергиев Посад, Россия.

<sup>5)</sup>Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия.

<sup>6)</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

<sup>7)</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия.

\*E-mail: tvshchedrina@gmail.com

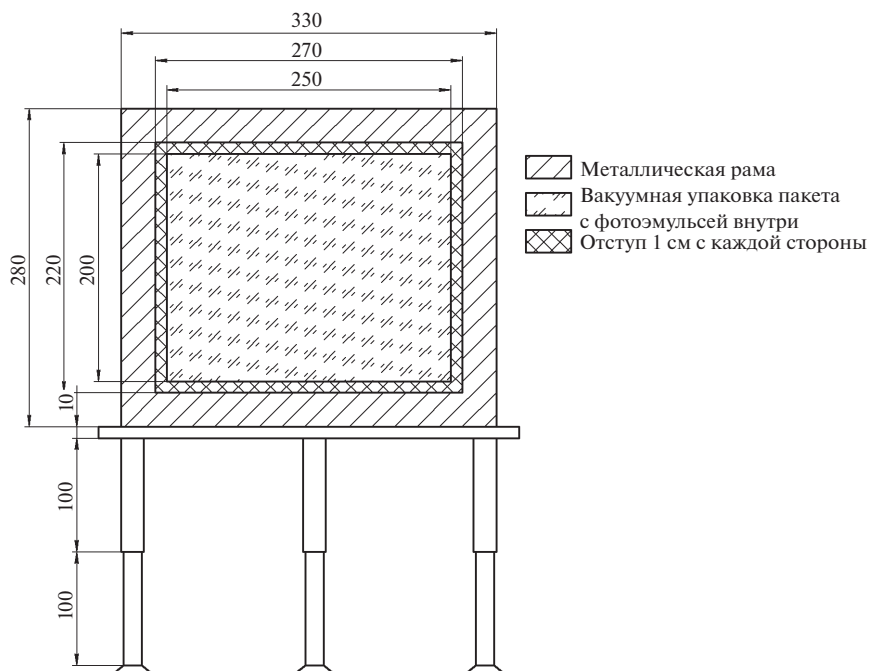


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции детектора с фотоэмульсионными слоями, указанные на схеме размеры конструкции представлены в миллиметрах.

как Данилов монастырь является действующим, а его храмы охраняемыми памятниками архитектуры, при планировании и проведении эксперимента данный критерий явился доминирующим в пользу использования детекторов на основе фотографической фотоэмульсии. К основным преимуществам трековых детекторов с использованием фотоэмульсии, помимо компактных размеров и простоты конструкции, относятся высокое пространственное ( $<1$  мкм) и угловое ( $\sim 1$  мср) разрешение, большая информационная емкость, простота эксплуатации (независимость от источников энергопитания и отсутствие необходимости электронной считывающей системы в процессе экспозиции), более того, исследование объекта с целью определения его внутренней структуры происходит без разрушения исследуемого объекта, дополнительных раскопок и т.п., что выгодно отличает данную методику от более затратных альтернативных методов.

### 3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Принципиальная схема эмульсионного детектора, используемая в данном эксперименте, показана на рис. 1. Детекторы для данной экспозиции имели площадь  $28 \times 33$  см<sup>2</sup>. В конструкции детектора были предусмотрены ножки, которые позволяли выровнять по уровню с точностью 0,5 мм/м. Таким образом, были установлены 10 детекторов

в подвальных помещениях здания церкви Похвалы Божьей Матери с тем, чтобы “увидеть” с их помощью максимальную площадь строений подвальных помещений в интересующей области исследования. В эксперименте были использованы фотоэмульсии российского производства ООО “АВК Славич”. Детекторы, подготовленные для испытаний, представляли собой плотно упакованные стопки из 5–6 двусторонних эмульсионных пластин размером  $20 \times 25$  см<sup>2</sup>, закрепленные в неподвижном положении с помощью металлической рамки детектора. Фото детектора на месте экспозиции в одном из подвальных помещений приведено на рис. 2. Таким образом, площадь эмульсионных пластин, входящих в каждый детектор, составила порядка 0,3 м<sup>2</sup>. Различное время экспозиции детекторов — от двух до четырех месяцев — было выбрано с целью оценки загруженности детекторов и определения оптимального времени экспозиции, достаточного для получения статистически обеспеченных результатов. Анализ экспериментальных данных показал, что оптимальной является трехмесячная экспозиция в условиях данного эксперимента. После экспозиции эмульсионные слои были проявлены ООО “АВК Славич” и переданы в Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук для сканирования на Полностью Автоматизированном Измерительном КОМПлексе (ПАВИКОМ-3), позволяющем сканировать фотоэмульсионные пленки со скоростью до 190 см<sup>2</sup>/ч в диапазоне углов до 75° [6–8].



Рис. 2. Фото двух детекторов в одном из подвальных помещений здания церкви Похвалы Божьей Матери.

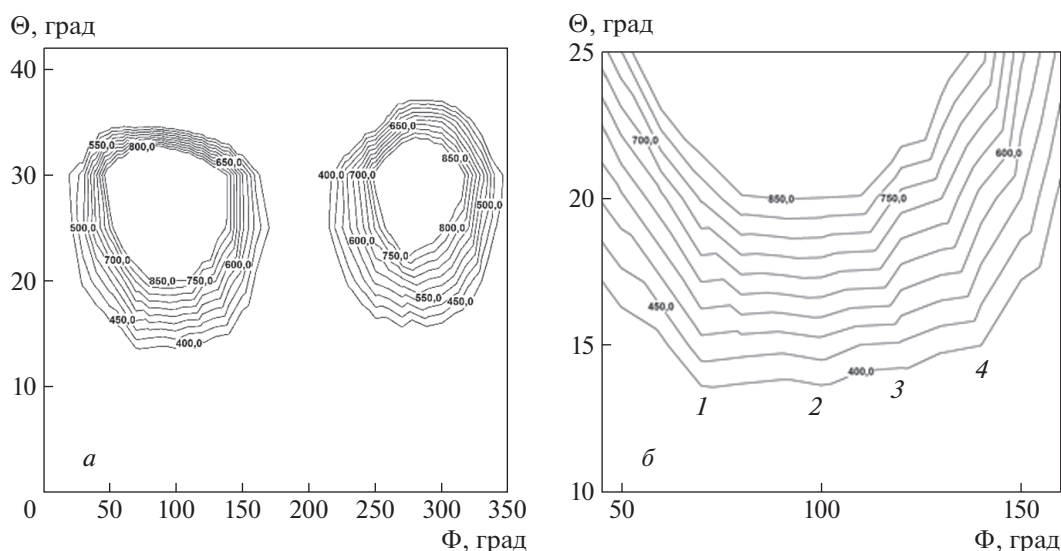
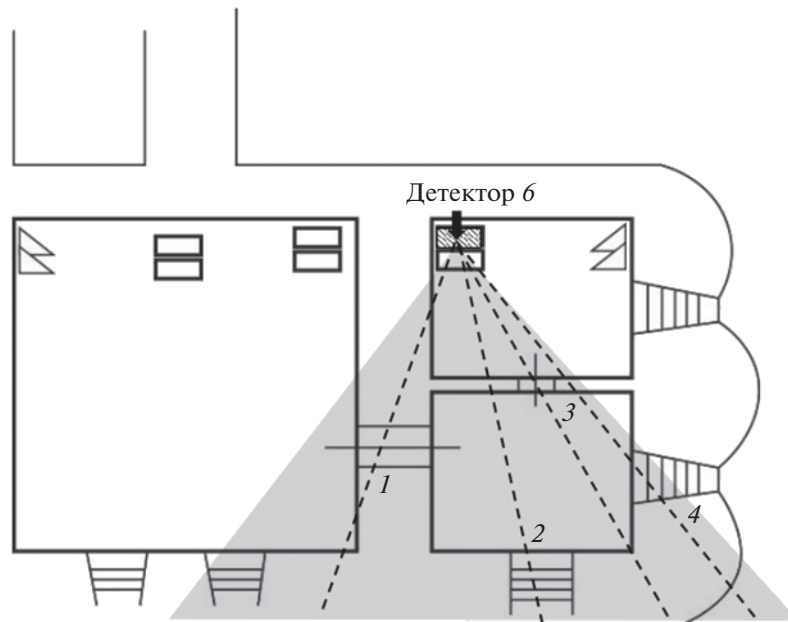


Рис. 3. *a* — Результаты измерений для детектора *b*, представленные в виде линий уровня. Слева (от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ) направление назад, справа (от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ ) направление вперед; *b* — увеличенная часть распределения в диапазоне углов  $\Theta = 10^\circ - 25^\circ$  и  $\Phi = 50^\circ - 150^\circ$ . Цифрами 1–4 обозначены направления, в которых поглощение мюонов меньше. Эти направления соответствуют проходам и проемам в подвальном помещении, отмеченным идентичным образом на схеме БТИ (см. рис. 4).

Эмульсионная пластина состоит из двух чувствительных эмульсионных слоев, толщиной 50 мкм каждый, политых на пластиковую основу, толщиной 175 мкм. В процессе сканирования в режиме реального времени производится реконструкция так называемых микротреков (МТ) — треков, проходящих через каждый чувствительный слой эмульсионной пластины. Дальнейший цикл процедуры реконструкции треков, проходящих через всю стопку эмульсионных пластин, входящих в состав

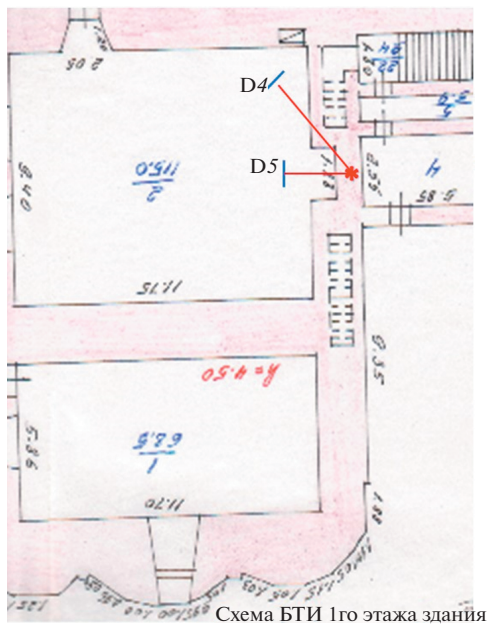
детектора, так называемых вольюмтреков (VT), выполняется в режиме offline на UNIX сервере при помощи пакета FEDRA [9]. Этот пакет написан в виде набора библиотек для пакета ROOT и позволяет производить весь дальнейший цикл обработки и анализа: реконструировать базовые треки, взаимное расположение эмульсионных пластин в пространстве и треки во всем объеме отсканированных данных. Пример такой реконструкции для одного из детекторов представлен на рис. 3. Эксперимен-



**Рис. 4.** Соответствие оконных и дверных проемов особенностям в распределениях для детектора 6. Положение детектора 6 в подвальном помещении схематически представлено в виде заштрихованного прямоугольника. Теневым конусом обозначена область видимости детектора по направлению "назад". Штриховые линии — направления потоков мюонов, соответствующие максимумам, обозначенным на рис. 2 цифрами 1–4: 1 — переход из маленького подвального помещения в большое, 2 — центральный вход в подвальные помещения здания церкви Похвалы Божьей Матери, 3 — переход между маленькими подвальными помещениями, 4 — окно в маленьком подвальном помещении.

тальные результаты представляют собой двумерное угловое распределение по азимутальному углу  $\Phi$  и зенитному углу  $\Theta$  в виде линий уровня. На рис. 3а приведено распределение потоков мюонов в зоне видимости детектора, диапазон углов  $0^\circ <$

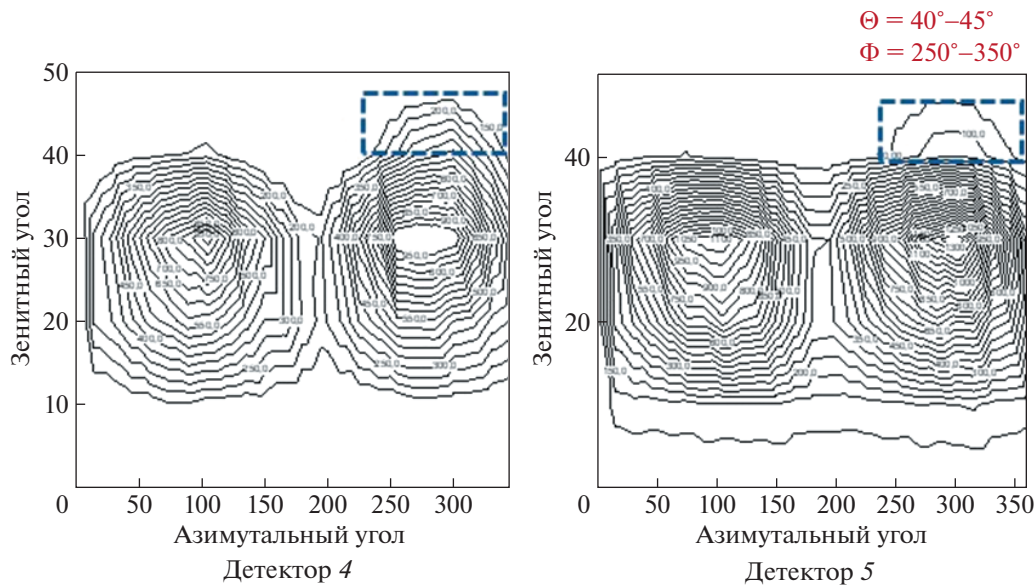
$< \Phi < 180^\circ$  соответствует заднему сектору обзора детектора, а  $180^\circ < \Phi < 360^\circ$  переднему сектору соответственно. На распределении в диапазоне углов  $0^\circ < \Phi < 180^\circ$  можно увидеть несколько выступов, которые отмечены цифрами 1, 2, 3 и 4 на увеличенном графике рис. 3б. При сравнении этих выступов из экспериментально полученных результатов и расположения проемов окон и двери на плане БТИ подвального помещения каждый из них находит соответствие с определенным проемом, см. рис. 4. Данные экспериментальные результаты наглядно демонстрируют чувствительность метода мюонной радиографии и предложенной конструкции детекторов к плотным объектам и пустотам размерами от 0.5 м до нескольких десятков и даже сотен метров (при соответственной площади детектора и времени экспозиции).



**Рис. 5.** Схема БТИ первого этажа церкви Похвалы Божьей Матери.

На рис. 5, показывающем схему по данным БТИ первого этажа церкви, условно показано положение детекторов 4 и 5, которые были установлены этажом ниже, в подвале. Звездочкой отмечено положение обнаруженной этими детекторами вертикальной полости в стене первого этажа, см. графики рис. 6.

В настоящее время продолжается физический анализ экспериментальных результатов, полученных с других детекторов данной экспозиции. Получены целеуказания в виде направления на неизвестную до настоящего момента полость в исследуемом объекте.



**Рис. 6.** Распределения потоков мюонов по данным детекторов 4 и 5 — линии уровня равной интенсивности в элементе телесного угла. Пунктиром отмечена область обнаруженной вертикальной полости в стене первого этажа церкви Похвалы Божьей Матери.

дуемой области здания церкви Похвалы Божьей Матери, для уточнения геометрических размеров которой предстоит дополнительная экспозиция детекторов в выбранном направлении неизвестного помещения. Для наглядности полученных результатов была создана 3D-модель помещения по планам БТИ и LIDARной съемки, идет финальный анализ данных и имплементация полученных экспериментальных результатов в 3D-модель помещения.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание эксперимента по исследованию территории Свято-Троицкого Данилова монастыря в Переславле-Залесском с целью поиска скрытых под землей фрагментов древних строений методом мюонной радиографии, позволяющим осуществлять исследования без нарушения структуры исторического объекта. Описаны основы метода, подробности проведения эксперимента, используемая аппаратура и алгоритм обработки экспериментальных результатов. Представлены результаты первых обработанных детекторов. Полученные экспериментальные данные наглядно демонстрируют высокую разрешающую способность эмульсионных детекторов по отношению к исследуемому объекту. В подвальных помещениях здания церкви Похвалы Божьей Матери обнаружены пустоты, отсутствующие на плане БТИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Окальева, Н. Г. Полухина, Т. М. Роганова, Н. И. Старков, В. Э. Тюков, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина, УФН **187**, 1375 (2017) [Phys. Usp. **60**, 1277 (2017)].

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

2. L. G. Dedenko, A. K. Managadze, T. M. Roganova, A. V. Bagulya, M. S. Vladimirov, S. G. Zemskova, N. S. Konovalova, N. G. Polukhina, N. I. Starkov, M. M. Chernyavskiy, and V. M. Grachev, Bull. Lebedev Phys. Institute **41**, 235 (2014).

<https://doi.org/10.3103/S1068335614080065>

3. A. Ariga, T. Ariga, A. Ereditato, S. Käser, A. Lechmann, D. Mair, R. Nishiyama, C. Pistillo, P. Scampoli, F. Schlunegger, and M. Vladymyrov, Instruments **2**(2), 7 (2018).

<https://doi.org/10.3390/instruments2020007>

4. V. Tioukov, G. De Lellis, P. Strolin, L. Consiglio, A. Sheshukov, M. Orazi, R. Peluso, C. Bozza, C. De Sio, S. M. Stellacci, C. Sirignano, N. D'Ambrosio, S. Miyamoto, R. Nishiyama, and H. K. M. Tanaka, Ann. Geophys. **60**, S0111 (2017).

<https://doi.org/10.4401/ag-7386>

5. H. Fujii, K. Hara, S. Hashimoto, K. Hayashi, F. Ito, H. Kakuno, H. Kodama, K. Nagamine, K. Sato, K. Satoh, S.-H. Kim, A. Suzuki, T. Sumiyoshi, K. Takahashi, Yu Takahashi, F. Takasaki, *et al.*, PTEP **2019**, 053C01 (2019).

<https://doi.org/10.1093/ptep/ptz040>

6. A. Alexandrov, A. Buonaura, L. Consiglio, N. D'Ambrosio, G. De Lellis, A. Di Crescenzo, G. Galati, A. Lauria, M. C. Montesi, V. Tioukov, and M. Vladymyrov, JINST **11**, P06002 (2016).

<https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/P06002>

7. A. Alexandrov, A. Buonauro, L. Consiglio, N. D'Ambrosio, G. De Lellis, A. Di Crescenzo, G. Galati, V. Gentile, A. Lauria, M. C. Montesi, V. Tioukov, M. Vladymyrov, and E. Voevodina, *Sci. Rep.* **7**, 7310 (2017).
8. A. Alexandrov, G. De Lellis, and V. Tioukov, *Sci. Rep.* **9**, 2870 (2019).
9. V. Tioukov, I. Kreslo, Y. Petukhov, and G. Sirri, *Nucl. Instrum. Methods A* **559**, 103 (2006).

## SEARCH FOR THE HIDDEN ROOMS OF THE HOLY TRINITY DANILOV MONASTERY BY THE MUON RADIOGRAPHY METHOD

**A. B. Alexandrov<sup>1)</sup>, M. M. Chernyavsky<sup>1)</sup>, V. I. Galkin<sup>2)</sup>, L. A. Goncharova<sup>1)</sup>,  
A. S. Konovalov<sup>3)</sup>, N. S. Konovalova<sup>1)</sup>, P. S. Korolev<sup>4)</sup>, A. A. Larionov<sup>4)</sup>, A. K. Managadze<sup>6)</sup>,  
I. A. Melnichenko<sup>5)</sup>, N. M. Okateva<sup>1)</sup>, N. G. Polukhina<sup>1)</sup>, T. M. Roganova<sup>6)</sup>, Zh. T. Sadykov<sup>5)</sup>,  
T. V. Shchedrina<sup>1)</sup>, V. I. Shevchenko<sup>7)</sup>, N. I. Starkov<sup>1)</sup>, E. N. Starkova<sup>1)</sup>,  
V. E. Tioukov<sup>1)</sup>, S. G. Vasina<sup>1)</sup>**

*<sup>1)</sup>Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*<sup>2)</sup>Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Russia*

*<sup>3)</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia*

*<sup>4)</sup> Moscow Theological Academy, Moscow region, Sergiev Posad, Russia*

*<sup>5)</sup> National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

*<sup>6)</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia*

*<sup>7)</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

The results of an experiment on the study of archaeological objects on the territory of the Holy Trinity Danilov Monastery in the city of Pereslavl-Zalessky, Yaroslavl Region, carried out by the method of muon radiography, are presented. The article describes the experiment and presents the first results of data analysis, demonstrating the sensitivity of the chosen technique to the task at hand.