

ОТЗЫВ

официального оппонента Яшина Игоря Ивановича на диссертацию Щедриной Татьяны Викторовны «Новые детекторные решения на основе ядерных фотоэмульсий в фундаментальных экспериментах по физике элементарных частиц и мюонографии объектов культурного наследия» на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа Т.В. Щедриной посвящена новому этапу развития фундаментальных и прикладных исследований на основе фотографической ядерной эмульсии, детектора с уникально высоким пространственным и угловым разрешением. Возрождение в России сложнейшей технологии производства высокочувствительных ядерных фотоэмульсий, соответствующих требованиям мирового уровня, позволило разработать уникальные регистрирующие системы для экспериментов в области физики высоких энергий и для прикладных исследований методом мюонографии особенностей внутренней структуры крупных промышленных объектов и объектов исторического наследия.

1. Актуальность выбранной темы

Фотографические ядерные эмульсии, как детекторы ионизирующих излучений, играли важную роль в ядерной физике и физике частиц на многих этапах их развития. Использование ядерных эмульсий для современной экспериментальной физики не утратило своей актуальности. В настоящее время технологией производства высокочувствительных ядерных фотоэмульсий, востребованных в современных экспериментах, обладают только два производителя – предприятие ООО «СЛАВИЧ» в г. Переславле-Залесском (Россия) и университет г. Нагойя (Япония). В силу исторических причин восстановление утраченной технологии производства ядерной фотоэмульсии в России было начато практически с нуля в 2010-х гг. Решение этой актуальной задачи при активном участии Т.В. Щедриной стало практическим и значимым вкладом не только в развитие отечественной экспериментальной физики, но и было востребовано в важнейших мировых экспериментах, таких как эксперимент OPERA в Лаборатории Гран-Сассо (Италия) и SND@LHC (ЦЕРН, Швейцария).

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения, и структурно может быть разбита на две достаточно независимые части, объединенные единой целью – разработка и практическая реализация метода ядерных фотоэмульсий для создания прецизионных трековых систем в физике высоких энергий и в развитии метода мюонографии.

Первая часть диссертации посвящена решению задач восстановления производства ядерных фотоэмульсий (ЯЭ) на производстве ООО «Славич», отвечающих самым высоким требованиям современного ядерно-физического эксперимента, и создания сканирующих микроскопов на основе оптических столов с высокой точностью автоматизированного перемещения

Решение проблемы восстановления производства потребовало разработки методик исследования, тестирования и оптимизации параметров фотоэмульсий, направленных на создание эффективных технологических процессов, обеспечивающих стабильное промышленное производство высококачественных эмульсий. Эта задача была успешно решена при активном участии автора диссертации.

Для получения фотографической ЯЭ надлежащего качества потребовался многолетний непрерывный мониторинг произведённых эмульсий, а также квалифицированные рекомендации по оптимизации её параметров (чувствительности, плотности вуали, размеров зерна и др.), поиск и тестирование необходимых ингредиентов (например, желатина для эмульсионного геля). Эта работа осуществлялась при непосредственном и определяющем вкладе автора, для чего была разработана уникальная методика визуального и микроскопического контроля качества образцов ЯЭ. Анализировались изменения свойств ядерной эмульсии с течением времени по результатам уникального авторского эксперимента по старению эмульсии в различных условиях. В результате была подтверждена высокая стабильность технических характеристик российской эмульсии в течение первых 4-5 месяцев и удовлетворительная сохранность свойств в период от 5 до 11 месяцев с момента производства.

Авторский мониторинг свойств ядерной эмульсии потребовал разработку процедуры “рефрешинга” (уничтожения фона, набранного при

длительном хранении эмульсии от момента её производства), включающей подбор оптимальных параметров для максимального уничтожения фона без потери чувствительности эмульсионных слоев при регистрации однозарядных частиц. Результатом стали параметры рефрешинг-процедуры ядерной фотоэмульсии для регистрации однозарядных частиц с минимальной потерей эффективности фотоэмульсионного слоя.

Результатом многолетней кропотливой работы с определяющим участием автора стало соответствующее мировым стандартам, стабильное качество ядерных фотоэмульсий, производимой предприятием ООО «СЛАВИЧ» в количестве, позволившем российским экспериментаторам стать полноправными участниками эксперимента OPERA по поиску осцилляций мюонных нейтрино в таонные, а также нового амбициозного международного эксперимента SND@LHC в ЦЕРНе по исследованию нейтрино всех трех ароматов и поиску Новой физики.

Опыт и квалификация автора успешно использовались в эксперименте OPERA. За время эксперимента сканирующими лабораториями мира (в число которых входила ЛЭЧ ФИАН) было зарегистрировано в эмульсиях мишенного блока детектора и обработано более 17000 событий взаимодействий нейтрино. Открытие осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти событий появления ν_τ в потоке мюонных нейтрино стало главным результатом эксперимента OPERA.

Важным результатом работы при определяющем участии автора стало создание в ЛЭЧ ФИАН высокотехнологичного автоматизированного сканирующего комплекса микроскопов. В диссертации приведено подробное описание этого автоматизированного измерительного комплекса, один из микроскопов которого был специально создан для обработки эмульсионных данных эксперимента OPERA. В диссертации приводятся результаты модификации автором оборудования автоматизированных оптических микроскопов для обработки эмульсионных данных и адаптацией их программного обеспечения к специфике различных эмульсионных экспериментов – фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц (в частности, в работах по нейтринной физике) и прикладных исследований с применением метода мюонографии. Именно

автором были созданы и имплементированы специальные конфигурационные файлы, учитывающие специфику конкретного эксперимента и типа детектора.

Полученные автором достижения в области быстрого автоматизированного анализа ЯЭ позволили реализовать успешное участие сотрудников ФИАН в крупнейших отечественных и международных проектах в области фундаментальных и прикладных исследований.

Большое внимание в диссертации уделено аспектам использования технологии использования отечественных фотоэмульсий в качестве трековых детекторов при разработке технологии нового направления в экспериментальной физике – мюонографии крупномасштабных объектов. В настоящее время данное направление прикладной физики активно развивается и переходит из стадии академических исследований к созданию коммерческих стартапов. Результатом работ по применению ЯЭ при сканировании различных объектов стало обнаружение скрытых объектов в Свято-Троицкого Даниловом и Свято-Успенском Псково-Печерском монастырях.

3. Достоверность полученных результатов

В достоверности основных результатов работы сомнений не возникает. Достоверность полученных в работе результатов была многократно подтверждена в результате перекрестных экспертных проверок качества российской эмульсии в ЦЕРНе и Университете Федерико II в Неаполе. Все основные полученные результаты, в том числе с помощью отечественных фотоэмульсий и при обработке ЯЭ на отечественном сканирующем оборудовании, прошли обсуждение на международных и российских конференциях и были опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

В результате проведения серии экспериментов по мюонографии сложных крупномасштабных конструкций и зданий была продемонстрирована точность и достоверность оценок разработанных автором методик.

Экспертные проверки в лабораториях ЦЕРН и университета Федерико II (Неаполь) и широкомасштабное использование фотографической ядерной

фотоэмульсии российского производства в глобальных научных исследованиях свидетельствует о международном признании высокого качества российской ядерной фотоэмульсии, существенный вклад в восстановление технологии производства внесён автором диссертации. Необходимо отметить большой личный вклад автора в получение результатов мирового уровня в области нейтринной физики и в развитие перспективного метода мюнографии.

4. Научная новизна

Впервые в России при определяющем участии автора разработана технология микроскопического анализа контроля качества ЯЭ, которая обеспечила производство ядерных эмульсий на уровне 100 м² в год.

Впервые в России проведены эксперименты по апробации метода мюнографии с использованием трековых детекторов на основе ядерных фотоэмульсий. Важным результатом этих работ являются разработанные автором рекомендации по оптимальному количеству эмульсионных слоев для эффективного распознавания треков атмосферных мюонов и механическая конструкция детекторов, определены оптимальные условия экспозиции, созданы эффективные алгоритмы обработки и анализа данных.

Разработанные автором методики сканирование и физического анализа эмульсионных пленок на комплексе ПАВИКОМ были успешно применены при анализе блоков эмульсий международного эксперимента OPERA, что внесло значительный вклад в получение впервые в мире убедительных доказательств существования осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино со статистической значимостью 6,1 σ . Это стало главным результатом эксперимента OPERA.

Наряду с ЯЭ производства университета г. Нагойи (Япония), для наполнения мишени нейтринного детектора SND@LHC используются ЯЭ российского производства. Мониторинг качества российской эмульсии перед отправкой в ЦЕРН проводился автором, что является критически важным для обеспечения качества проведения экспериментов.

Впервые в мире при определяющем участии Т.В. Щедриной были проведены уникальные мюнографические эксперименты с использованием ЯЭ по неинвазивному исследованию скрытых объектов в действующих

Свято-Троицком Даниловом и Свято-Успенском Псково-Печерском монастырях. В диссертации приводятся методика и результаты обнаружения неизвестных ранее их скрытых структурных особенностей.

Разработанные авторские подходы и практические решения открывают широкие возможности использования трековых детекторов на основе ядерных фотоэмульсий для развития методов дистанционного исследования особенностей внутренней структуры крупномасштабных природных и промышленных объектов, а также объектов культурного наследия.

Если характеризовать диссертационную работу в целом, в ней даётся описание единой экспериментальной системы, включающей разработку конструкции детекторов, практическое осуществление и анализ данных экспериментов в области фундаментальной и прикладной физики с использованием технологии ядерно-эмульсионных детекторов. Отражены исторические этапы становления эмульсионной технологии в России и в мире, описаны масштабы её применения в настоящем и представлены перспективы на будущее. Вовлеченность автора диссертации во все этапы эмульсионных экспериментов, включая производство и тестирование ядерной эмульсии, планирование и проведение экспозиций, обработку и анализ данных, свидетельствует об высокой квалификации и компетентности.

Экспертные проверки в лабораториях ЦЕРН и университета Федерико II (Неаполь) и широкомасштабное использование фотографической ядерной фотоэмульсии российского производства в глобальных научных исследованиях свидетельствует о международном признании высокого качества российской ядерной фотоэмульсии, существенный вклад в восстановление технологии производства которых внесён автором диссертации. Необходимо также отметить большой личный вклад автора в получение результатов мирового уровня в области нейтринной физики и в развитие перспективного метода мюнографии.

Оценивая диссертационную работу и её завершённость, необходимо сделать ряд **замечаний**:

1. В диссертации есть опечатки и стилистические неточности, в частности, -повторы абзацев (стр. 21, стр. 83 и др.),

- Рис. 1.1 и 1.2. нет подписей по осям. Полученные оценки в отдельной панели на рисунке очень трудно прочесть.

- Стр 113. Некорректно использовать термин «томограмма» в случае 2D измерения потока мюонов. Лучше использовать термин «мюонограмма», и др.

2. В главе 2 описаны фундаментальные исследования с использованием ЯЭ на базе обработки данных на комплексе ПАВИКОМ, в частности, в новом эксперименте SND@LHC (ЦЕРН). Хотелось бы иметь представление о том, какова доля использованной российской эмульсии.
3. В главе 4 представлены результаты мюонографических исследований, оптимальные условия постановки экспериментов, алгоритмы обработки. Для более наглядного представления методики хотелось бы видеть оценки количества треков, например, набранных за время экспозиции в эксперименте в Даниловом монастыре.
4. С точки зрения достоверности полученных результатов по мюонографии, хорошо было бы проверить, реально ли существуют обнаруженные с помощью мюонографии скрытые помещения в монастырях? Пока это лишь указания.

Приведенные замечания ни в коей мере не снижают научной и практической ценности диссертационной работы. Автор успешно решила все поставленные перед ней задачи, а ее вклад в полученные результаты является определяющим.

5. Заключение

Исследования и разработки, проведенные Т.В. Щедриной, выполнены на высоком научном и методическом уровне, полученные результаты, выводы и рекомендации оригинальны.

Разработанные методы будут крайне важны для проводимых и планируемых экспериментов на основе трековых детекторов из фотографических ядерных эмульсий.

Содержание работы и ее оформление показывают высокую компетентность и квалификацию автора.

Автореферат полностью соответствует положениям диссертации.

Список основных работ официального оппонента, доктора физико-математических наук Яшина Игоря Ивановича по тематике диссертации Щедриной Татьяны Викторовны «Новые детекторные решения на основе ядерных фотоэмульсий в фундаментальных экспериментах по физике элементарных частиц и мюонографии объектов культурного наследия» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Yashin, I.I., Davidenko, N.N., Dovgopoly, A.O. et al. "Muon Tomography of Large-Scale Objects". *Phys. Atom. Nuclei* 84, 1171–1181 (2021).
2. M. Aguilar, L. Ali Cavasonza, G. Ambrosi, ..., I. Yashin. (AMS Collaboration). "Properties of Daily Helium Fluxes". *Phys. Rev. Lett.* 128, 231102 (2022).
3. I. Astapov, P. Bezyazeev, M. Blank, ..., I.I. Yashin. "Optimisation studies of the TAIGA-Muon scintillation detector array". *Journal of Instrumentation*, Vol. 17, No. 6 (2022).
4. A.G. Bogdanov, N.S. Barbashina, S.S. Khokhlov... I.I. Yashin "Studying Muon Bundles of Inclined Air Showers in the NEVOD-DECOR Experiment". *Phys. Atom. Nuclei* 86, 1027—1034 (2023).
5. Юрина Е.А., Шутенко В.В., Хохлов С.С., ..., Яшин И.И. "Средние энергии мюонов в наклонных группах по данным эксперимента НЕВОД-ДЕКОР". *Известия российской академии наук. Серия физическая*, том 87, № 7, 979-982 (2023).
6. V.G. Getmanov, V.E. Chinkin, A.D. Gvishiani, M.N. Dobrovolsky, R.V. Sidorov, A.A. Soloviev, I.I. Yashin, A.N. Dmitrieva & A.A. Kovylyayeva "Recognition of Local Anisotropies of Muon Fluxes Using Normalized Variations for Matrix Observations of the URAGAN Hodoscope". *Pattern Recognition and Image Analysis*, Vol. 33, 192-202 (2023).
7. M.B. Amelchakov, A.G. Bogdanov, A. Chiavassa, A.N. Dmitrieva, K.G. Kompaniets, S.S. Khokhlov, R.P. Kokoulin, G. Mannocchi, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.A. Shulzhenko, G. Trincherio, I.I. Yashin, and E.A. Yurina. "Cosmic-Ray Anisotropy Study by Means of Detection of Muon Bundles". *The Astrophysical Journal*, Vol 945, Number 2 (2023).
8. M. Aguilar, L. Ali Cavasonza, B. Alpat, ..., I. Yashin. (AMS Collaboration) "Properties of Cosmic-Ray Sulfur and Determination of the Composition of Primary Cosmic-Ray Carbon, Neon, Magnesium, and Sulfur: Ten-Year Results from the Alpha Magnetic Spectrometer". *Phys. Rev. Lett.* 130, 211002 (2023).
9. Н.А. Пасюк, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, М.Ю. Целиненко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин "Сцинтилляционный стриповый детектор

гибридного годоскопа для мюонной томографии крупномасштабных объектов”. Приборы и техника эксперимента, №4, 57-68 (2024).

10. Пасюк Н.А., Борисов А.А., Компаниец К.Г., Кожин А.С., Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шутенко В.В., Яшин И.И. “Детектор на дрейфовых трубках гибридного годоскопа для мюонной томографии крупномасштабных объектов”. Приборы и техника эксперимента, №2, 29-38 (2024).

11. Н.А. Пасюк, Н.Н. Давиденко, А.С. Кожин, К.Г. Компаниец, Ю.Н. Конев, С.В. Олейник, А.А. Петрухин, Р.М. Фахрутдинов, М.Ю. Целиненко, Д.В. Шудра, В.В. Шутенко, И.И. Яшин “Прототип гибридного мюонного годоскопа для мюонографии крупномасштабных объектов”. ЖТФ, том 94, выпуск 8, 1398–1409 (2024).

12. Н.А. Пасюк, Р.Р. Алыев, Н.Н. Давиденко, С.М. Киселев, А.С. Кожин, К.Г. Компаниец, Ю.Н. Конев, С.В. Олейник, А.А. Петрухин, Р.М. Фахрутдинов, М.Ю. Целиненко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин “Мюонография структуры энергоблока Калининской АЭС”. ЖТФ, том 95, выпуск 1, 179–187 (2025).

13. Пасюк Н.А., Алыев Р.Р., Давиденко Н.Н., Киселев С.М., Кожин А.С., Компаниец К.Г., Конев Ю.Н., Олейник С.В., Петрухин А.А., Фахрутдинов Р.М., Целиненко М.Ю., Шутенко В.В., Яшин И.И. “Диагностика структуры работающего энергоблока АЭС методом мюонографии”. Ядерная Физика, том 88, №2, 169–184 (2025).