

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, в.н.с., заведующего Лабораторией нейтринной астрофизики Института ядерных исследований РАН Мухамедшина Рауфа Адгамовича на диссертацию Щедриной Татьяны Викторовны «Новые детекторные решения на основе ядерных фотоэмульсий в фундаментальных экспериментах по физике элементарных частиц и мюонографии объектов культурного наследия», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Актуальность темы диссертации. Развитие современной экспериментальной физики требует разработки новых детекторных систем и усовершенствованных высокотехнологичных систем обработки полученных данных. Это приводит к необходимости решения целого ряда актуальных нетривиальных наукоёмких задач, в частности, при работе с детекторами на основе ядерной фотоэмульсии. Специфика экспериментальной научной деятельности автора связана с методикой фотографических ядерных эмульсий, диапазон экспериментов с использованием которых в настоящее время очень широк: от фундаментальных ускорительных экспериментов по физике элементарных частиц до прикладных мюонографических исследований. В ходе работы была решена важнейшая актуальная проблема восстановления производства высококачественной ядерной фотоэмульсии в России. Стоит отдельно подчеркнуть, что в настоящее время только Россия и Япония обладают технологиями производства релятивистских ядерных эмульсий, которые успешно применяются во многих экспериментальных лабораториях мира.

В работе представлена информация об имплементации автором коммерческих систем и комплектующих при создании автоматизированных оптических систем обработки эмульсионных данных, оптимизированных для фундаментальных исследований. Создание таких систем дало возможность реализации уникальных экспериментов по физике элементарных частиц, направленных на решение актуальных проблем физики двадцать первого века, связанных с поиском явлений Новой физики.

Основной целью представленной работы являлась разработка комплексных физических и технологических детекторных решений для регистрации и идентификации релятивистских заряженных частиц в широком диапазоне ядерно-физических экспериментов на основе эмульсионной

трековой методики с использованием ядерной фотоэмульсии российского производства.

Полученные важнейшие результаты выполненной работы убедительно демонстрируют **ее научную новизну и практическую значимость**. Например, в рамках работы в эксперименте ОПЕРА открыты осцилляции мюонных нейтрино в таонные со статистической значимостью $6,1\sigma$. В настоящее время в новом черновском эксперименте SND@LHC для нейтринной мишени разработана конструкция эмульсионного детектора для регистрации нейтрино всех трех ароматов. В 2023 году в детекторе SND@LHC обнаружены восемь событий-кандидатов на взаимодействия мюонных нейтрино с превышением сигнала над фоном семь стандартных отклонений. Этот результат подтверждает эффективность использования компактных эмульсионных детекторов для регистрации ускорительных нейтрино высоких энергий и открывает возможности для их изучения на высокой статистике. Автором разработана комплексная методика микроскопического анализа и контроля качества современной ядерной фотоэмульсии, что позволило не только восстановить ее производство в России на уровне лучших мировых стандартов, но и обеспечить выход на международный рынок. Впервые в России проведена серия мюонографических экспериментов с использованием эмульсионных детекторов по неинвазивному исследованию объектов культурного наследия, в ходе которых выявлены неизвестные ранее их скрытые структурные особенности.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы.

Введение к диссертационной работе включает описание актуальности выбранной темы, сформулированные цель и задачи работы, научную новизну полученных результатов, доказательства достоверности выводов, оценки практической ценности работы.

Основное содержание **первой главы** посвящено вкладу автора в восстановление российского производства ядерной фотоэмульсии. Помимо исторического обзора по теме, в главе подробно описана разработанная и реализованная автором методология данного процесса. Ключевым результатом стала разработанная автором и детально описанная методика контроля качества эмульсии с помощью визуального и микроскопического анализа.

Вторая глава посвящена фундаментальным исследованиям в физике высоких энергий с применением ядерных фотоэмульсий и

автоматизированного сканирующего комплекса ПАВИКОМ (ФИАН). Детально описаны технические характеристики, архитектура и принципы работы комплекса. Продемонстрировано успешное применение ПАВИКОМ в международных экспериментах OPERA (изучение нейтринных осцилляций) и SND@LHC (ЦЕРН, регистрация всех трех ароматов нейтрино и поиск слабо взаимодействующих частиц). Для каждого эксперимента представлены цели, методики, результаты анализа данных и полученные физические выводы, в том числе, отмечающие уникальные возможности комплекса для прецизионной обработки больших массивов данных.

Содержание **третьей главы** охватывает два основных блока:

- 1) Методологический: детальное описание проведения мюонографических экспериментов, характеристик мюонных потоков и полной цепочки реконструкции треков в эмульсионных детекторах (алгоритмы, цифровая обработка изображений, трекинг, оценка точности).
- 2) Прикладной и новаторский: изложение авторского эксперимента, главным результатом которого стала методика оптимизации количества слоев в детекторе. Методика позволяет минимизировать используемые материалы (число пластин) без потери эффективности и точности измерений, даже для частиц с большими углами входа. Подчеркивается практическая значимость данного решения для конструирования детекторных систем в проектах по мюонографии.

Четвертая глава демонстрирует прорывные результаты практического внедрения метода мюонографии. Методология была успешно апробирована в ходе первых в России экспериментов по исследованию памятников культурного наследия: уникальное подземное здание в цитадели Нарын-Кала (г. Дербент, Дагестан), здания церквей и территория Свято-Троицкого Данилова монастыря (г. Переславль-Залесский), пещерная часть храмового комплекса Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря (Псковская область, г. Печоры), в ходе которых выявлены неизвестные структурные особенности. Результаты подтверждают высокую эффективность разработанных подходов и открывают широкие возможности для неинвазивного анализа в самых разных сферах — от промышленности и археологии до геофизики и сейсмологии, открывая новые возможности для решения фундаментальных и прикладных задач.

В заключении подведены итоги и сформулированы основные научные результаты. Автореферат и публикации точно отражают содержание диссертации.

Работа Т.В. Щедриной является законченным квалификационным исследованием, демонстрирующим полный и профессионально выполненный цикл работы — от постановки задачи до подтверждения выводов. Все защищаемые положения доказаны и обоснованы. Диссертация отличается логичной структурой, внутренней целостностью и ясностью подачи материала, что позволяет раскрыть научную проблему и обеспечивает четкое восприятие результатов.

Содержание автореферата и список публикаций полностью соответствуют тексту диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 34 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых международной научной базой данных Web of Science. Апробация результатов выполнена автором на международных и российских конференциях, международных совещаниях по эмульсионной методике и международных коллаборационных совещаниях экспериментов OPERA, SND@LHC.

Можно сделать несколько следующих замечаний:

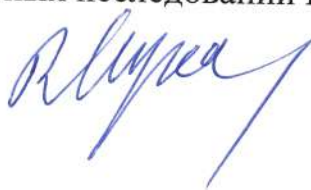
- 1) Не совсем ясна фраза на стр. 15 автореферата «Критерием отбора событий служило отсутствие мюона в конечном состоянии», поскольку тау-лептон с вероятностью около 18% распадается в мюон и два нейтрино (такие события тоже рассматривали в качестве сигнала).
- 2) Непонятно, что означает аббревиатура СНД (нет в глоссарии) и три знака вопроса после нее на стр. 100 диссертации
- 3) Остается неясным вклад эффекта многократного кулоновского рассеяния на реконструкцию треков в мюонографических экспериментах с использованием ядерной фотоэмульсии в качестве трекового детектора.

Указанные замечания носят, в первую очередь, характер рекомендаций по улучшению работы и не умаляют значимости её фундаментальных выводов и научной ценности. Доклад по материалам докторской диссертации был представлен Т.В. Щедриной и обсужден на научном общеотдельском семинаре ИЯИ, протокол семинара № 1213 от 23.05.2025. Представленная работа внесла значительный вклад в развитие актуального направления экспериментальной ядерной физики, связанного с исследованиями на базе эмульсионных детекторов и их высокотехнологичной обработкой на автоматизированных сканирующих комплексах.

Работа соответствует всем законодательным требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор - Т.В. Щедрина заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,
в.н.с., заведующий Лабораторией нейтринной астрофизики
Институт ядерных исследований РАН,

д.ф.-м.н.



20.10.2025
Мухамедшин Рауф Адгамович

117312, г. Москва, пр. 60-летия Октября, 7-а.
Телефон: +7 (903) 212 34 88
E-mail: rauf_m@mail.ru

Подпись Мухамедшина Рауфа Адгамовича заверяю

Зам. директора ИЯИ РАН
д.ф.-м.н.



Фещенко Александр Владимирович

Список основных работ официального оппонента, д.ф.-м.н. Мухамедшина Рауфа Адгамовича 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. R. Mukhamedshin *et al.* Study of High-Altitude Coplanarity Phenomena in Super-High-Energy EAS Cores with a Thick Calorimeter. Particles 2025, 8, 74. DOI: 10.3390/particles8030074

2. R.A. Mukhamedshin *et al.* Simulations of the EAS Development in the Atmosphere and Detectors for Experiments with the High-Altitude Ionization Calorimeter ADRON-55. *Particles* 7 (2024) 3, 768-779.
DOI: 10.3390/particles7030044
3. R.A. Mukhamedshin *et al.* First Results of Studying EAS Cores Using a High-Mountain Ionization Calorimeter. *Particles* 2024, 7(1), 40-51.
DOI: 10.3390/particles7010003
4. R. A. Mukhamedshin. Is It Possible to Estimate the Parameters of the 2D Evolution of the Space Metric Signature with Energy from the Correlations of the Azimuthal Characteristics of Particles? *Physics of Atomic Nuclei*, 2023, Vol. 86, No. 6, pp. 1281–1285.
DOI: 10.1134/S1063778823060091
5. Мухамедшин Р.А. Можно ли оценить параметры 2D-эволюции сигнатуры метрики пространства с энергией по корреляциям азимутальных характеристик частиц? *Ядерная физика*, 2023, том 86, №6, с. 735–741.
6. Р.А. Мухамедшин. Об изучении сигнатуры метрики пространства по корреляциям частиц во взаимодействиях адронов. *Известия РАН. Сер. Физ.* 2023, том 87, № 7, с. 962–965.
7. R. A. Mukhamedshin. On connection between the collider long-range near-side “ridge” effect at $|\eta| < 2.4$ and cosmic-ray coplanarity of most energetic particles. *Eur. Phys. J. C* (2022) 82:155.
DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10082-w
8. Мухамедшин Р.А. Есть ли связь между коллайдерным “ridge” эффектом и компланарностью частиц в гамма-адронных семействах? // *Известия РАН. Сер. Физ.* 2021, т. 85, № 4, с. 534
DOI: 10.31857/S0367676521040232
9. R.A. Mukhamedshin, T. Sadykov. FANSY 2.0: a Monte Carlo tool for study of superhigh-energy cosmic-ray interactions: meson–proton interactions. *Eur. Phys. J. Plus* 136 (2021) 1, 17.
DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00985-6