

ОТЗЫВ

официального оппонента Янке Виктора Гуговича на диссертационную работу **Маурчева Евгения Александровича** “Моделирование взаимодействия частиц космических лучей с системами детекторов и атмосферой Земли”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Существует ряд объектов, для которых создание аналитических моделей практически невозможно. В этом случае аналитическая модель заменяется имитационной. В последнее время, благодаря развитию информационных технологий, возможности таких исследований существенно расширились. Использование идей моделирования эксперимента стало обязательным при проведении современного ядерного эксперимента. Исключительная польза моделирования заключается в том, что для детальных исследований можно экспериментировать не с самой системой, а с ее аналогом – моделью. Большинство наземных детекторов в области космофизики регистрируют интегральные потоки частиц. Адекватная математическая модель позволяет расширить возможности эксперимента и исследовать дифференциальные потоки и энергетические характеристики объекта.

Современные детекторы наземного мониторинга стационарны и громоздки и практически исключают калибровку на ускорителях частиц. Математическое моделирование в совокупности с вычислительными возможностями современной компьютерной техники позволяет рассчитать практически любой процесс, происходящий в детекторе, и дополнить эксперимент недостающим элементом наиболее вероятного результата работы детектора.

Диссертационная работа посвящена разработке численных моделей для комплекса детекторов, функционирующих на станции космических лучей Апатиты ПГИ. Также рассматривается модель взаимодействия космических лучей с ядрами атмосферы Земли, созданная для получения количественных характеристик воздействия излучения на окружающее их вещество. На основе этих данных получены профили скорости ионизации для различных значений жесткости геомагнитного обрезания.

Целью работы являлись исследования методом численного моделирования взаимодействия галактических и солнечных лучей с атмосферой Земли, а также оценка эффективности и энергетических характеристик детекторов различных компонент вторичного космического излучения.

В соответствии с этой целью были поставлена и решена задача моделирования детекторов нейтронов и гамма излучения на основе GEANT4 и получения функций их эффективности. Были изучены особенности образования каскадов вторичных частиц при использовании модельного генератора первичного излучения с характеристиками, соответствующими спектрам протонов ГКЛ и СКЛ. Было исследовано воздействие первичного и вторичного космического излучения на скорость ионизации вещества атмосферы Земли.

Диссертационная работа Маурчева Е.А. состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 104 страниц, 51 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 108 наименований.

Во введении представлено обоснование актуальности выполненной диссертационной работы, обозначена цель исследования, приводится аргументирование

научной новизны. Раскрывается научно-практическая значимость и достоверность полученных результатов, приводится их апробация посредством публикаций в рецензируемых журналах и докладов, формулируются основные научные положения, выносимые на защиту. В общей форме излагается содержание работы.

В первой главе представлен обзор современного состояния исследований прохождения космических лучей через атмосферу Земли и их взаимодействия с детекторами различных типов элементарных частиц (нейтронов, заряженной компоненты, гамма излучения). Рассматриваются основные методы расчетов энергетических характеристик детекторов, а также особенности построения модуля программного комплекса, предназначенного для моделирования прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, для получения данных о развитии каскадов вторичных частиц и профилей ионизации вещества.

Во второй главе рассматривается модель прохождения протонов через атмосферу Земли для галактических космических лучей во время минимума солнечной активности. В ходе расчетов получены энергетические распределения вторичного излучения (электроны, позитроны, мюоны, протоны, нейтроны, гамма излучение). Одним из наиболее важных результатов являются полученные высотные зависимости суммарных потоков частиц.

В третьей главе представлены результаты моделирования прохождения солнечных космических лучей через атмосферу во время событий GLE65, GLE67, GLE69, GLE70.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы представленной диссертационной работы.

Актуальность темы исследования.

Мониторинг наземными детекторами космических лучей широко используется при исследовании гелиосферных процессов, и детальное знание характеристик детекторов является определяющим. Космические лучи оказывают значительное влияние на окружающую среду и технику. Примером актуальных задач могут служить расчет эффективной дозы при осуществлении авиаперелетов через полярные области Земли или оценка негативного воздействия вторичного излучения на электронные устройства. Также важными являются проблемы радиобиологической безопасности в целом. Чтобы уменьшить негативный эффект от взаимодействия КЛ, необходимо представлять механизмы прохождения этих частиц через вещество в зависимости от конкретных начальных условий. Самым распространенным методом является экспериментальное исследование, однако такой подход не всегда дает исчерпывающую информацию о составе и характеристиках вторичных КЛ, поскольку измеряются только интегральные характеристики. Численный эксперимент в таком случае позволяет расширить возможности исследований.

Степень обоснованности научных результатов.

Автор корректно использует известные научные методы. Список литературы содержит 108 наименований. Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов следует из их тщательного анализа и верификации при помощи больших массивов экспериментальных данных. Рассчитанные значения потоков вторичных частиц в атмосфере хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными о высотном распределении различных компонент. В дальнейшем была создана программа RUSCOSMICS для полного моделирования рассматриваемых экспериментов.

Научная новизна работы.

Для детекторов, установленных на станции Апатиты и имеющих уникальную конфигурацию, предложен и испытан метод получения функций эффективности детекторов при помощи параметризации моделей, выполненных на основе GEANT4. Полученные данные являются не только отличным методом калибровки уже существующих детекторов, но и используются при параметризации вновь разрабатываемых устройств.

Впервые, при помощи численного моделирования, получены данные, позволяющие модельным путем оценить воздействие протонов ГКЛ на скорость ионизации атмосферы Земли в глобальном масштабе. На основе этих результатов построены соответствующие высотные и пространственные профили, и произведена их верификация при помощи экспериментальных данных.

Впервые предложен метод использования спектральных характеристик СКЛ, полученных по уникальной методике по данным сети нейтронных мониторов, для оценки характеристик потоков вторичных частиц и скорости ионизации атмосферы во время событий GLE посредством соответствующего модуля RUSCOSMICS.

Впервые, на основе компьютерного моделирования, получены результаты, доказывающие эффективность использования природного декагидрата тетрабората натрия ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) в качестве эффективного поглотителя нейтронов с энергией $0.025 \text{ эВ} < E < 1 \text{ МэВ}$ как основы нейтронных детекторов.

Методические подходы, экспериментальные результаты и их теоретические обоснования, содержащиеся в диссертационной работе, безусловно, обладают новизной.

Достоверность.

Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов следует из их тщательного анализа и верификации при помощи больших массивов экспериментальных данных. Рассчитанные значения потоков вторичных частиц в атмосфере хорошо согласуются с профилями, полученными при стратосферном зондировании заряженной компоненты. Полученные в представленной работе данные используются для расчета скорости ионизации атмосферы Земли протонами первичных КЛ, а также применяются другими группами авторов для решения широкого спектра задач в области физики космических лучей.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в возможности использования результатов в будущих исследованиях:

- 1) полученные в ходе моделирования оборудования для регистрации космического излучения результаты позволяют лучше понять особенности распространения частиц внутри системы рассматриваемого детектора и, в случае необходимости, производить калибровку или пересчет эффективных параметров.
- 2) результаты, полученные в ходе ряда модельных экспериментов по расчету прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, позволяют получить количественную оценку потоков вторичного излучения, которая, в свою очередь, находит применение, как в фундаментальных исследованиях, так и в прикладной области (радиационная безопасность).

Уверен, что результаты работы Маурчева Е.А. будут использованы в ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ, ФИАН, МФТИ, ИФЗ, СПбГУ и других российских и зарубежных научных организациях, в которых проводятся исследования по данной тематике.

Новизна и научная значимость

Новизна и научная значимость диссертационной работы Е.А. Маурчева не вызывает сомнений. Основные результаты исследований опубликованы в журналах, перечень которых утвержден ВАК. Работа рассматривалась на семинаре ИЗМИРАН по солнечно-земной физике 20 января 2022 года.

Общая оценка работы.

В целом, диссертация производит очень хорошее впечатление. Она написана доходчиво и хорошим языком, аккуратно оформлена, результаты хорошо иллюстрированы. Структура диссертации логична, оформление текста и рисунков качественное и производит хорошее впечатление. Следует отметить хорошее владение литературным материалом, на основе которого была выполнена формулировка основных идей, тенденций для обоснования теоретической базы исследования.

Безусловно, диссертационная работа Маурчева Е.А. это законченное научное исследование, открывающее широкое поле деятельности в области космофизического эксперимента. При выполнении диссертационной работы Маурчев Е.А. продемонстрировал уверенное владение наиболее современными методами экспериментальной ядерной физики, математического моделирования эксперимента, способность ставить задачи и вопросы и находить правильные решения.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения и свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку. Предложенные автором решения аргументированы и сопоставлены с другими известными решениями. Диссертант продемонстрировал высокую квалификацию и понимание предмета исследований и диссертацию следует оценить положительно.

Проведенный анализ достаточно детален и методически выверен, выводы хорошо обоснованы. Вместе с тем есть некоторые критические замечания и пожелания на будущее.

1. При рассмотрении прохождения КЛ через атмосферу учитывались только протоны спектра галактических лучей. Каковы оценки для вклада ядер гелия?
2. Неудачное выражение “Спектры ГКЛ и СКЛ заметно отличаются друг от друга в области энергий до единиц ГэВ” – просто отличаются. (Автореферат, стр. 3 абзац 1).
3. “ $(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O})$ в качестве эффективного поглотителя нейтронов с энергией $0.025 \text{ эВ} < E < 1 \text{ МэВ}$ “ - 1 МэВ это не ошибка?
4. “Рассматриваются основные методы расчетов о б о р у д о в а н и я, включенного в состав комплексной системы сбора данных, установленной на станции НМ ПГИ г. Апатиты (раздел 1.2, 1.3), а также...” – все правильно, но д е т е к т о р ы, на мой взгляд, лучше.
5. Автореферат стр. 15 “Во **второй** главе рассматривается ч а с т н ы й случай”. Ч а с т н ы й в каком смысле?

Имеются незначительные неточности: стр. 9, абзац 1;. Автореферат стр. 11, 4 строка снизу; Автореферат стр. 14, 2 абзац, 2 строка .

Отмеченные недостатки не касаются фундаментальных вопросов, изложенных в диссертации, и положений, вынесенных на защиту, но указывают на потенциал дальнейших исследований и профессионального роста диссертанта.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных публикациях в рецензируемых журналах и 11 публикациях из списка ВАК, они неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата(доктора) наук, а ее автор, **Маурчев Евгений Александрович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата(доктора) физико-математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент Янке Виктор Гугович,
кандидат физ.-мат. наук,
зав. отделом космических лучей ИЗМИРАН,

Тел. 8(495) 851-09-25, e-mail: yanke@izmiran.ru

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, РАН (ИЗМИРАН).

14 февраля 2022

Подпись В.Г.Янке удостоверяю.

Директор ИЗМИРАН, д.ф.-м.н.



В.Г.Янке

В.Д.Кузнецов

**Список основных работ Янке Виктора Гуговича
в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):**

1. Melkumyan A A, Belov A V, Abunina M A, Abunin A A, Eroshenko E A, Yanke V G, Oleneva V A Solar wind temperature–velocity relationship over the last five solar cycles and Forbush decreases associated with different types of interplanetary disturbance // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Oxford University Press (OUP)*, V. 500 N 3 P. 2786-2797. **2021**. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa3366> (Q1)
2. Gerontidou M., Katzourakis N., Mavromichalaki H., Yanke V., Eroshenko E. "World grid of Cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade", *Advances in Space Research*, V. 67, No 7, P. 2231-2240, **2021**
3. Papailiou M. , M. Abunina, H. Mavromichalaki, A. Belov, A. Abunin, E. Eroshenko, V. Yanke. Precursory Signs of Large Forbush Decreases // *Solar Physics*, V.296, №100 **2021**
4. Miroshnichenko Leonty I., Li Chuan, Yanke Victor G. Small Size Ground Level Enhancements During Solar Cycle 24 // *Solar Physics*, V. 295 N 7 P. 102. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-020-01659-3> (Q2)
5. Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., Abunin A.A., Yanke V.G., Melkumyan A.A., Shlyk N.S. Ring of Stations Method in Cosmic Rays Variations Research // *Solar Physics Springer Science and Business Media LLC*, V. 295 N 5 P. 69. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-020-01639-7> (Q2)
6. Papailiou M., Abunina M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Mavromichalaki H. Large Forbush Decreases and their Solar Sources: Features and Characteristics // *Solar Physics*, V. 295 N 12 P. 164. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-020-01735-8> (Q2)
7. Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A. Comparison between statistical properties of Forbush decreases caused by solar wind disturbances from coronal mass ejections and coronal holes // *Advances in Space Research*, V. 63 N 2 P. 1100-1109. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.009> (Q2)
8. Yanke V.G. Reformatting of the Combined Muon—Neutron Detector to Increase Efficiency: Estimates, Calculations, Experiments // *Physics of Atomic Nuclei*, V. 82 N 6 P. 902-908. 2019. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063778819660499> (Q2)
9. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, V. Oleneva, A. Abunin, M. Abunina, A. Papaioannou, E. Mavromichalaki The Global Survey Method applied to Ground Level Cosmic Ray Measurements. *Solar Physics*, Volume 293 Issue 4, article id. 68, 23 pp., 2018 doi: s11207-018-1277-6 (Q2)
10. Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г. "Вклады в модуляцию космических лучей изменений различных солнечных индексов в 20–23 и 24 циклах" // *Известия РАН. серия физическая*, 2017, том 81, № 2, с. 165–169. <перевод> Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G. "Contributions from Changes in Various Solar Indices in Cycles 20–23 and 24 to the Modulation of Cosmic Rays" // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, Vol. 81, No. 2, pp. 146–150. ISSN 1062-8738, 2017. DOI: 10.3103/S1062873817020101.
11. Miroshnichenko L.I., Yanke V.G. "Size Distributions of Solar Proton Events: Methodological and Physical Restrictions", *Solar Phys*, 291:3685-3704, 2016, doi: 10.1007/s11207-016-1002-2. (Q2)
12. Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M. Solar Activity Parameters and associated Forbush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24 // *Solar Physics*: V. 291, I. 3, P. 1025-1041. DOI: 10.1007/s11207-016-0863-8. 2016. (Q2)
13. Shepetov A., A. Chubenko, O. Kryakunova, N. Nikolayevsky, N. Salikhov, V. Yanke. The STM32 microcontroller based pulse intensity registration system for the neutron monitor. *European Physical Journal (EPJ Web of Conf.)*, 145:19002, 2017. DOI: 10.1051/epjconf/201614519002)

14. Белов А. В., Ерошенко Е. А., Абунина М. А., Абунин А. А., Оленева В. А., Янке В. Г. Поведение плотности потока космических лучей в начале Форбуш-эффектов // Геомагнетизм и Аэрономия: Т. 56, №6, С. 683-689, 2016. << Перевод >> Belov A.V., Eroshenko E.A., Abunin A.A., Abunina M.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. "Behavior of cosmic-ray flux density at the onset of Forbush effects"
15. Gvozdevsky B.B., Belov A.V., Gushchina R.T., Kobelev P.G., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Long-Term Changes in Vertical Geomagnetic Cutoff Rigidities of Cosmic Rays. Physics of Atomic Nuclei, 2018, Vol. 81, No. 9, pp. 1–8. doi: 10.1134/S1063778818090132

14 февраля 2022

Подпись В.Г.Янке удостоверяю.

Директор ИЗМИРАН, д.ф.-м.н.



В.Г.Янке

В.Д.Кузнецов