

**Отзыв официального оппонента Михайлова Владимира Владимировича**  
на диссертационную работу Германенко Алексея Владимировича «Исследование солнечных космических лучей и проникающих излучений в атмосфере арктических и субарктических регионов земли», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «приборы и методы экспериментальной физики»

Сеть нейтронных мониторов уже более 70 лет применяется для мониторинга потока околоземных космических лучей. Космические лучи галактического и солнечного происхождения являются основным источником радиационной опасности на авиационных высотах, их интенсивность необходимо контролировать, и это одна из задач нейтронных мониторов. Нейтронные мониторы используются для теоретических исследований, особенно для исследований долговременных вариаций космических лучей, где качество данных и стабильность мониторов имеют большое значение.

Крайне важно продолжать такие измерения, чтобы расширить этот уникальный долгосрочный временной ряд. Более того, в связи с возросшим интересом к влиянию космической погоды на функционирование наземных и спутниковых технических средств и к радиационному риску, создаваемому частицами солнечной энергии и галактическими космическими лучами, важно совершенствовать существующую сеть нейтронных мониторов. Это необходимо, с одной стороны, для обеспечения контроля радиационной обстановки в режиме, близком к реальному времени, и, с другой стороны, для более полного понимания процессов взаимодействия космического излучения с атмосферой Земли, чему способствует регистрации сопутствующих радиационных явлений на станциях мониторинга. Особое значение имеют измерения в приполярных областях с минимальной жесткостью геомагнитного обрезания, где эффекты космического излучения наиболее заметны.

В этой связи актуальность работы Германенко Алексей Владимировича, посвященная созданию программно-аппаратного комплекса для мониторинга состава вторичного излучения на уровне земли в Апатитах и Баренцбурге и разработке методики оперативного прогнозирования радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов, не вызывает сомнений.

Диссертация Германенко Алексей Владимировича, озаглавленная «Исследование солнечных космических лучей и проникающих излучений в атмосфере арктических и субарктических регионов Земли», состоит из введения, трех глав, заключения со списком публикация автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Полный объём диссертации – 123 страницы.

**Во введении** описываются цели работы, обосновывается актуальность темы, её научная новизна и формулируются основные положения, выносимые на защиту. Во введении также указываются научные конференции, на которых докладывались работы по теме диссертации.

**В первой главе** рассматриваются вопросы, связанные с разработкой экспериментального комплекса для регистрации проникающих излучений на уровне земли, а также обработкой и анализом данных, получаемых с помощью детекторов, входящих в состав комплекса. Анализируется состав регистрируемых излучений, влияние на измерения факторов окружающей среды. Описана проведённая работа по расширению и улучшению существовавших ранее аппаратных измерительных комплексов в Апатитах и Баренцбурге. В состав комплекса в Апатитах входят стандартный нейтронный монитор 18-НМ-64, бессвинцовая секция нейтронного монитора, один большой и два малых сцинтилляционных спектрометра рентгеновского излучения, детектор заряженной компоненты вторичного излучения, датчики состояния окружающей среды для контроля атмосферного давления, температуры и осадков, система сбора и обработки информации. Приводится общая схема нового измерительного комплекса, и подробно рассматриваются его основные детекторы и их калибровка. На станции в Баренцбурге использовался ограниченный набор детекторов. Система является модульной и может включать в себя различные комбинации устройств. В главе описывается проведённое моделирование характеристик сцинтилляционных спектрометров. Моделирование производилось при помощи программного пакета GEANT4. Были получены эффективности регистрации и функции отклика детекторов, которые затем были использованы для определения спектров рентгеновского излучения в приземном слое. Также описан созданный в ходе работ комплекс датчиков для контроля состояния окружающей среды: вариаций давления, температуры и осадков. На основе данных с этих датчиков была проведена оценка

влияния температурных и барометрических эффектов на результаты измерений, определены необходимые поправочные коэффициенты.

**Во второй главе** обсуждаются эффекты, обнаруженные при регистрации рентгеновского гамма-излучения на уровне Земли. В первую очередь это сезонные вариации счёта сцинтилляционных датчиков и возрастание фона гамма-квантов во время выпадения осадков, а также связь между вариациями счёта сцинтилляционных детекторов и темпом счёта нейтронного монитора. В данной главе приведены примеры событий возрастания фонового гамма-излучения для разных сезонов, показана методика отбора событий и контроля данных. Производится анализ периодических сезонных вариаций счёта детекторов гамма-излучения и влияние на темп счёта детекторов атмосферных осадков. Связь между выпадением осадков и возрастанием рентгеновского гамма-излучения в приземном слое обсуждается особенно подробно. Автором предложена физическая модель, описывающая механизм генерации дополнительного излучения. По мнению автора, ускорение вторичных электронов и позитронов, образованных от взаимодействия космического излучения в атмосфере электрическим полем дождевых облаков, может приводить к возникновению дополнительного рентгеновского излучения при последующем торможении электронов и позитронов. Был проведен ряд дополнительных опытов, подтверждающих эту модель. Интересным представляется обнаруженный автором эффект осадков на показания нейтронных мониторов, представленный на рис.2.13.

**В третьей главе** описывается созданная автором методика оперативного прогноза радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов. Дается описание методики моделирования параметров событий СКЛ на уровне земли во время GLE, позволяющей давать в реальном времени оперативный прогноз радиационной опасности на несколько часов вперёд по результатам наблюдений отклика нейтронных мониторов на высокоэнергетичную часть спектра солнечных протонов. Приводятся примеры такого моделирования на примере нескольких событий

**Новизна работы и практическая значимость результатов** заключается в создании комплексной установки для мониторинга основных компонентов вторичных космических лучей в приполярной области и обнаружение на этой установке новых характеристик вариаций потоков вторичного гамма-излучения излучения в приземном слое, в разработке новых методик использования данных мировой сети нейтронных мониторов для оперативного прогноза радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей в экстремальных случаях в режиме реального времени.

Несомненным достоинством работы является большой объем проведенных исследований, как экспериментальных, так и теоретических. Степень достоверности результатов подтверждается успешной эксплуатацией аппаратуры и разработанных автором алгоритмов обработки, выводы работы подкреплены результатам многочисленных контрольных экспериментов и расчетов.

В качестве замечаний к работе можно указать следующее:

В главе 2 при описании обнаруженных на установке эффектов вариаций рентгеновского излучения в приземном слое во время атмосферных осадков отсутствует сравнение с аналогичными работами, выполненными другими средствами. Например, в работе «Some observations of variations of the natural background radiation» T. Thompson and Per Å. Wiberg //Tellus,15,3,313-318,1963 наблюдалось увеличение излучения, регистрируемого ионизационной камерой, во время осадков. Авторы некоторых работ связывают увеличение темпа счета детекторов в приземном слое с продуктами распада изотопов радона, вымываемыми дождем. Модель автора, основанная на доускорении электронов в слоисто-дождевых облаках, опирается на результаты моделирования потоков электронов и позитронов в слое облаков на основе программного пакета GEANT4 (рис. 2.18). Между тем, в 60-70гг прошлого века были проведены многочисленные измерения и расчеты потоков электромагнитной компоненты вторичного излучения от верхних слоев атмосферы до уровня моря. В частности, потоки электронов и позитронов приведены в обзоре R. R. Daniel and S. A. Stephens, Cosmic-Ray-Produced Electrons and Gamma Rays in the Atmosphere //Rev. Geophys. and Space Phys, 12, 2, 1974. В диссертации отсутствуют сравнения рассчитанных потоков с результатами предыдущих расчетов и измерений потоков

электронов. И, наконец, из описания механизма генерации дополнительного потока гамма излучения остается не ясным, какую роль играет в нем выпадение осадков. В работе (Rust W.D., Trapp R.J., 2002) по измерению электрических полей в слоисто-дождевых облаках, цитируемой автором, только в двух из шести полетов наблюдался дождь.

Что касается оперативного прогноза развития GLE, то к сожалению в работе не рассмотрены GLE №71 (2012-05-17) и GLE №72 (2017-09-10). Эти события, а также GLE №70 (2006-12-13), регистрировались магнитными спектрометрами PAMELA и AMS-02. Прецизионные прямые измерения магнитными спектрометрами дают существенно более точное представление о спектрах солнечных протонов на орбите Земли, чем данные мониторов GOES (см., например, O. Adriani et al, *The Astrophysical Journal*, 42, 2, 102, 11 (2011)).

В работе есть ряд неточностей и опечаток. Так в формуле (1.1) энергия реакции 2.8, а не 2.5 МэВ (стр. 11), не приведены погрешности полученных барометрических (стр.58) и температурных (стр.60) коэффициентов. При оценках линейного коэффициента поглощения в крыше здания (стр. 62) не учитывается порода древесины – известно, что поглощение различно для сосны, лиственницы и т.д. На рис.2.18 поток, по-видимому, приведен в  $1/(m^2 \text{ с ср МэВ})$ , а не в  $1/(m^2 \text{ с ср})$ , на стр.107 ссылка дана на рис.3.2б, а не на 3.1б.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку работы. Выводы работы соответствуют поставленным целям и решаемым задачам. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями Положения о присуждении учёных степеней, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. Основные результаты диссертационной работы Германенко А.В. неоднократно докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и РИНЦ. Материалы диссертационной работы со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора.

Диссертация Германенко Алексея Владимировича «Исследование солнечных космических лучей и проникающих излучений в атмосфере арктических и субарктических регионов Земли» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор  
ИЯФИТ НИЯУ МИФИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Михайлов Владимир Владимирович



подпись

Дата 25.02.22

Контактные данные:

тел.: 7(917)5203746, e-mail: vvmikhajlov@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Адрес места работы:

115409, г. Москва, Каширское шоссе д.31,  
НИЯУ МИФИ,

Тел.: +7 495 788 5699, +7 499 324 7777

e-mail: info@mephi.ru;

Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

В. М. Самиров

В. Сам



Список работ Михайлова Владимира Владимировича по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Solar-cycle Variations of South Atlantic Anomaly Proton Intensities Measured with the PAMELA Mission // Astrophysical Journal Letters, 2021 Vol. 917, No. 2
2. Time and Charge-sign Dependence of the Heliospheric Modulation of Cosmic Rays // Astrophysical Journal, 2021 Vol. 909, No. 2,
3. Rigidity dependences of the main characteristics of Forbush decreases // Journal of Physics: Conference Series, 2020 Vol. 1690, No. 1,
4. Cosmic Rays Investigation by the PAMELA experiment // Journal of Physics: Conference Series, 2020 Vol. 1342, No. 1,
5. The development of solar neutron search method with PAMELA neutron detector // Journal of Physics: Conference Series, 2019 Vol. 1189, No. 1,
6. An Anisotropic Cosmic-Ray Enhancement Event on 07-June-2015: A Possible Origin // Solar Physics, 2018 Vol. 293, No. 11,
7. Solar Energetic Particle Events Observed by the PAMELA Mission // Astrophysical Journal, 2018 Vol. 862, No. 2,

Михайлов В.В. .



29.09.2021