

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ**



**ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ  
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН им. Н.В. Пушкива  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

108840, г. Москва, г.Троицк

Тел. канц.:88(495) 851-02-80

izmiran@izmiran.ru

Калужское шоссе, 4, ИЗМИРАН

Факс:8(495) 851-01-24

http://www.izmiran.ru

ОКПО 02699636

ОГРН 1035009350375

ИНН/КПП

5046005410/775101001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИЗМИРАН

В. Д. Кузнецов

« 31 » августа 2022 г.



**ОТЗЫВ**

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкива Российской академии наук о диссертации

**Барбашиной Натальи Сергеевны**

**«Метод мюнографии и его применение для исследования гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли»,**

представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа посвящена разработке и развитию новых подходов к исследованию космического и околоземного пространства, а также возможностям заблаговременного обнаружения потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли методом мюнографии на основе анализа потока мюонов, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН.

Мюнография представляет собой снимок небесной полусферы в «мюонном» свете, поскольку мюонный годоскоп способен измерять

пространственно-угловые характеристики каждого зарегистрированного мюона, в отличие от многонаправленного мюонного телескопа, регистрирующего суммарный поток мюонов в пределах диаграммы направленности, определяемой конструкцией телескопа.

### **Актуальность**

Уникальную возможность обнаружения гелиосферных возмущений предоставляют космические лучи, которые при прохождении через гелиосферу испытывают влияние возмущений в солнечном ветре и в межпланетном магнитом поле.

Учитывая задержку времени распространения гелиосферных возмущений относительно прохождения космических лучей через гелиосферу, непрерывная регистрация потока космических лучей позволяет отслеживать гелиосферные возмущения и строить модели прогноза их прихода к Земле.

Кроме того, мюонная компонента сильно зависит от метеоусловий в атмосфере, что позволяет также рассматривать применение мюонографии для исследований в атмосфере Земли крупномасштабных барических образований во время грозных явлений.

Для проведения подобных исследований на поверхности Земли создана сеть нейтронных мониторов и многонаправленных мюонных телескопов, которая позволяет получить количественные характеристики анизотропии, однако более детальную информацию, в том числе и снимок небесной полусферы в «мюонном» свете, дают только мюонные годоскопы. Создание сети мюонных годоскопов позволит вывести исследования на новую ступень. Сегодня для прогноза потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли это особенно актуально.

**Целью работы** является разработка и развитие новых подходов к исследованию космического и околоземного пространства, а также методов заблаговременного обнаружения потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.

### **Новизна исследования и полученных результатов**

Важно, что метод мюонографии открывает новые области использования мюонной компоненты космических лучей для раннего обнаружения, мониторинга и предсказания дальнейшего развития потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Применение метода позволило выявить качественно новые

закономерности в вариациях потока мюонов космических лучей во время развития возмущений в космическом и околоземном пространстве, а именно:

Впервые получены мюонографии событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах: GLE(глава 3), форбуш-понижений (глава 4) и грозовых аномалий (глава 6).

Впервые введена в методику анализа событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах (глава 5), горизонтальная проекция вектора относительной анизотропии потока мюонов. Показано, что ее изменения могут служить предвестником геоэффективных событий.

Впервые изучены долговременные вариации (глава 2) проекций вектора локальной анизотропии потока мюонов космических лучей.

Впервые с помощью одной установки и в рамках единого подхода определены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики вариаций потока мюонов во время событий GLE и форбуш-понижений (глава 3 и 4).

Впервые на основе мюонографий и карт метеорологических доплеровских радаров показано, что параметры анизотропии потока мюонов позволяют идентифицировать грозовые явления с вероятностью ~70%, а при прохождении атмосферных фронтов – более 80% (глава 6).

### **Практическая значимость**

Метод мюонографии окружающего пространства является новым источником информации о процессах как атмосферного, так и космического, масштабов. Способ и устройство для получения мюонографий могут быть использованы при проектировании новых мюонных годоскопов и при анализе их экспериментальных данных. Разработанные методы комплексного анализа данных по исследованию вариаций потока мюонов космических лучей, зарегистрированных мюонным годоскопом во время возмущений в космическом и околоземном пространствах, могут быть использованы для анализа подобных событий, регистрируемых другими детекторами мировой сети мюонных детекторов. Научная новизна и практическая значимость самого метода мюонографии и способов обнаружения гелиосферных и атмосферных возмущений подтверждены двумя патентами на изобретения, двумя патентами на модели и двумя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

**Достоверность полученных научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертации, обеспечивается применением**

современных методов проведения ядерно-физического эксперимента, адекватностью полученных моделей и разработанных методик. Экспериментальные результаты получены на нескольких независимо работающих супермодулях мюонного годоскопа УРАГАН, что позволяет контролировать эффективность регистрации мюонов. Высокую степень согласованности показало сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными сети нейтронных мониторов, полученными во время различных гелиосферных и магнитосферных явлений в пересекающихся областях асимптотических направлений. Сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными метеорологических доплеровских радаров, полученными во время гроз, показало их хорошее согласие.

**Степень обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, достаточно высокая. На это указывает сравнительный анализ данных большого числа источников на русском (27 публикаций) и английском (21 публикаций) языках, привлечение данных прямых измерений в гелиосфере и атмосфере.

Материалы диссертации могут быть рекомендованы научным группам, проводящим исследования вариаций космических лучей, гелиосферных и геомагнитных возмущений, а также всем, кто связан с наземными мюонными наблюдениями. Результаты могут найти применение в ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ, ИКФИА СО РАН, ИСЗФ СО РАН, ПГИ РАН и других научных учреждениях и могут быть использованы для прогнозирования возмущений в околоземном пространстве, связанных с активностью Солнца.

### **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. Следует отметить хорошее владение литературным материалом, на основе которого была выполнена формулировка основных идей, тенденций для обоснования теоретической базы исследования.

Безусловно, диссертационная работа Барбашиной Н.С. это законченное научное исследование, открывающее широкое поле деятельности в области космофизического эксперимента. При выполнении диссертационной работы Барбашиной Н.С. продемонстрировано 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.

Мюонный годоскоп УРАГАН является уникальным детектором космических лучей, открывающим новые пути для исследований в физике космоса и солнечно-земной физике. Следует отметить роль диссертанта в создании экспериментальных и методических основ измерений на базе годоскопа. Большие возможности таких измерений несомненны. Представленная диссертация, безусловно, заметный шаг в правильном направлении.

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

1. В отличие от гелиосферных и атмосферных возмущений магнитосферным возмущениям уделено гораздо меньшее внимание, и хочется надеяться, что этот раздел исследований будет расширен.
2. Страница 11, строка 5: нужно “изучение модуляции космических лучей”.
3. Страница 23, строка 13: должно быть “согласие”.

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

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных публикациях в рецензируемых журналах (WoS, Scopus), они неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Барбашиной Натальи Сергеевны «Метод мюонографии и его применение для исследования гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении

ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Барбашина Наталья Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики за разработку и применение метода мюонографии в исследованиях гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли, совокупность которых является важным научным достижением в солнечно-земной физике. Диссертационная работа Барбашиной Н.С. заслушана на семинаре Отдела космических лучей ИЗМИРАН 11 июля 2022 года. Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен в качестве официального на семинаре Отдела космических лучей ИЗМИРАН (протокол № 532 от 11 июля 2022 года).

Отзыв подготовили:

Зав. лабораторией исследований  
вариаций космических лучей ИЗМИРАН

Анатолий Владимирович Белов

(почтовый адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4.  
ИЗМИРАН. Тел. 8(495)851-0924 (раб), 8(925)050-1526 (моб),  
[abelov@izmiran.ru](mailto:abelov@izmiran.ru))

Зав. отделом космических лучей ИЗМИРАН

Виктор Гугович Янке

(почтовый адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4.  
ИЗМИРАН. Тел. 8(495)851-0925 (раб), 8(926)034-7950 (моб),  
[yanke@izmiran.ru](mailto:yanke@izmiran.ru))

Список основных публикаций сотрудников ИЗМИРАН, составляющих отзыв, за последние 5 лет, по тематике защищаемой диссертации

1. N.S. Shlyk, A.V. Belov, M.A. Abunina, A.A. Abunin, V.A. Oleneva, V.G. Yanke. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. V. 511 (4), pp 5897–5908
2. М.А. Абунина, А.В. Белов, Н.С. Шлык, Е.А. Ерошенко, А.А. Абунин, В.А. Оленева, И.И. Прямушкина, В.Г. Янке. Форбуш-эффекты, созданные выбросами солнечного вещества с магнитными облаками. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2021. Т.61 (5), с. 572-582
3. Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Влияние взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических космических лучей. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2021. Т. 61 (6), с. 694-703.
4. Балабин Ю.В., Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Янковский И.В. О вариациях потока космических лучей в конце 24 цикла солнечной активности. *Известия российской академии наук. Серия физическая*. Т. 85 (3), с. 321-325 (*Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021. V. 85 (3). pp. 230-233.)
5. Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т. О долговременной модуляции космических лучей в 23–24 циклах солнечной активности. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85. (9), с. 1355-1358. (*Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021. V. 85 (9).pp. 1045-1048.)
6. Янке В.Г., Белов А.В., Шлык Н.С., Кобелев П.Г., Трефилова Л.А. Экспериментальный спектр вариаций космических лучей в широком диапазоне жесткостей по данным AMS-02. *Космические исследования*. 2021. Т. 59 (6), с. 454-459.
7. A.V. Belov, R.T. Gushchina, V.A. Oleneva & V. G. Yanke. Large Scale Modulation: View from the Earth Points. *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. V. 84 (6), pp. 1170
8. Papaioannou A., Belov A., Abunina M., Anastasiadis A., Patsourakos S., Mavromichalaki H. Interplanetary Coronal Mass Ejections as the Driver of Non-recurrent Forbush Decreases. *Astrophysical Journal*. 2020. V. 890 (2), p. 101
9. Мирошниченко Л.И., Ли Ч., Янке В.Г. Малые наземные возрастания солнечных космических лучей в 24-ом цикле солнечной активности. *Космические исследования*. 2020. Т. 58 (3), с. 191-198. (*Cosmic Research*. 2020. V. 58 (3). pp. 150-157.)
10. Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф., Янке В.Г. Распределение космических лучей в гелиосфере по данным сети станций мюонных телескопов. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019. Т. 83 (5), с. 606-609.
11. Grigorev V.G., Gololobov P.Y., Starodubtsev S.A., Zverev A.S., Abunina M.A., Preobrazhensky M.S., Yanke V.G. The temperature effect of the muon

- component observed on A.I. Kuzmin cosmic ray spectrograph in Yakutsk. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1181 (1), p. 012066.
12. Belov A.V., Gushchina R.T., Eroshenko E.A., Abunin A.A., Kobelev P.G., Yanke V.G. Long-term stability of the neutron monitors global network for overall monitoring period. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1181 (1), p. 012063.
  13. 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 forrush decreases caused by solar wind disturbances from coronal mass ejections and coronal holes. *Advances in Space Research*. 2019. V. 63 (2). pp. 1100-1109.
  14. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Основные свойства форбуш-эффектов, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр. *Геоматетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58 (2), с. 163-176. (*Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. V. 58 (2). pp. 154-168.)
  15. Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Oleneva V., Abunin A., Abunina M., Papaioannou A., Mavromichalaki H. The global survey method applied to ground-level cosmic ray measurements. *Solar Physics*. 2018. V. 293 (4). p. 68.