

## Отзыв

официального оппонента

на диссертацию **Барбашиной Натальи Сергеевны**

### **«МЕТОД МЮОНОГРАФИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛИОСФЕРЫ, МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ»**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.**

Диссертационная работа Н.С. Барбашиной "Метод мюонографии и его применение для исследования гелиосферы, магнитосферы и атмосферы земли" состоит из 197 страниц, включая 140 рисунков, 12 таблиц и 160 наименований литературы. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой и посвящена разработке созданию нового прибора для регистрации космических лучей (КЛ) — мюонного годоскопа, нового метода исследования КЛ — мюонографии, и его применению к изучению различных физических процессов и явлений, происходящих в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Тема диссертационного исследования представляется весьма актуальной, так как в настоящее время во всем мире, включая Россию, США, страны Европейского союза, Японию, Китай и другие, предпринимаются попытки создания физических и прогностических моделей, а также оперативного мониторинга солнечной, гелиосферной и магнитосферной обстановки подобно тому, как это делается с погодой на Земле. Цель работы диссертанта состоит в исследовании пространственно-временных характеристик мюонов, порождаемых КЛ при их взаимодействии с атмосферой Земли, и их связи с различными физическими процессами происходящими в разных средах. Новизна работы обусловлена тем, что при непосредственном участии автора в НИЯУ МИФИ создан оригинальный прибор для регистрации космического излучения — мюонный годоскоп УРАГАН, и в ней впервые применен созданный там же дистанционный метод для изучения распространения КЛ в различных средах — мюонография. Поставленная цель диссертационного исследования успешно достигнута, причем были получены новые научные результаты, сформулированные в девяти защищаемых положениях, отличающиеся достоверностью и практической значимостью. Рассмотрим эти положения по порядку.

1. Диссертант принимала непосредственное участие в разработке и создании принципиально нового прибора для непрерывной регистрации интенсивности КЛ - мюонного годоскопа УРАГАН, который в настоящее время является неотъемлемой частью Уникальной Научной Установки «Экспериментальный комплекс НЕВОД» (<https://ckp->

[rf.ru/usu/73556](https://ckp-rf.ru/usu/73556)). В отличие от мюонных телескопов, этот прибор позволяет изучать интенсивность КЛ с энергий выше единиц ГэВ, приходящих не из нескольких, а из тысяч направлений характеризующихся значительно более высоким пространственно-угловым и временным разрешением. Это дает уникальную возможность использовать данные непрерывной регистрации годоскопа для исследования различных физических процессов и явлений на казалось бы не сопоставимых временных масштабах - от десятков миллионов до единиц километров, происходящих в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Создание такого прибора и его значение для науки представляется весьма важным и своевременным, поскольку с ним можно связать видимые перспективы в направлении практического применения регистрации КЛ в области космической и земной погоды, что и отмечено автором в приложении к диссертации.

2. Разработанные автором алгоритмы для комплекса программ обработки и анализа вариаций потока мюонов во время атмосферных, магнитосферных и гелиосферных событий, а также унифицированные формы исследуемых событий являются основой для созданной технологии мюонографии, которая, в свою очередь, может стать важным элементом Уникальной Научной Установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (<https://ckp-rf.ru/usu/433536>) и международного сотрудничества в области исследования КЛ.

3. Проведенный автором анализ временных рядов матричных данных за длительный период времени с 2007 по 2020 гг. и их сравнение с данными нейтронных мониторов станций КЛ Москва (ИЗМИРАН) и Апатиты (ПГИ) показал, что они хорошо согласуются с данными этих приборов, работающих на других физических принципах (в нейтронных мониторах регистрация сигнала основана на реакции захвата нейтронов молекулами наполняющего счетчики газа  $\text{BF}_3$  или  $\text{He}_3$ ), а мюонный годоскоп УРАГАН способен устойчиво работать в режиме непрерывной регистрации. Это очень важно для получения и накопления длинных однородных рядов данных, которые могут быть использованы не только для рассматриваемых в диссертации прикладных задач прогноза космической погоды и грозовой активности, но и для изучения структуры гелиосферы в целом.

4. Амплитуда наблюдаемых в мюонных данных событий Форбуш-понижений (ФП) существенно меньше, чем по наблюдениям на нейтронных мониторах. Это является следствием того, что мюоны порождаются в атмосфере Земли КЛ более высоких энергий, чем нейтроны. Поэтому для изучения таких событий на основе данных регистрации установки УРАГАН автором были разработаны специальные методы определения их энергетических характеристик, функции связи первичного и вторичного потоков КЛ для

пяти зенитно-угловых интервалов, а также методика исследования пространственно-угловых и временных характеристик регистрируемого космического излучения, которая сейчас известна как «мюонография». В итоге проведенной работы стало возможным получать наглядную пространственно-угловую картину модуляции КЛ в окрестности различного рода крупномасштабных возмущений солнечного ветра, которые и приводят к понижению интенсивности КЛ, известным как понижения Форбуша. Более того, это позволило изучать динамику параметров анизотропии КЛ в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов. Важным свойством разработанного метода мюонографии является тот факт, что на его базе можно проводить такие исследования с помощью всего одной установки, что в настоящее время весьма актуально для изучения наземных проявлений космической погоды с финансовой стороны.

5. Для количественного описания мюонографий автором используется понятие вектора относительной анизотропии потока мюонов, причем для целей анализа его поведения удобно рассматривать его проекции на направления географического юга и востока, а также использовать проекции вектора относительной анизотропии от среднего на те же направления. А с помощью простых манипуляций полученные мюонографии можно пересчитать в общепринятую систему координат GSE. Это позволяет наглядно визуализировать и изучать динамические изменения потока КЛ и их угловое распределение во время различных крупномасштабных возмущений солнечного ветра в гелиосфере и наблюдать соответствующую динамику анизотропии КЛ. Автором установлено, что при использовании данных мюонного годоскопа появляется возможность получать более детальную и полную информацию об особенностях и динамике анизотропии потока КЛ во внутренней гелиосфере, чем при использовании данных мюонных телескопов.

6. Общеизвестно, что мюонные телескопы регистрируют только крупные события вспышек солнечных КЛ, известные как GLE, и форбуш-понижения, поэтому и полученные с помощью них результаты соотносятся с явлениями солнечной и корональной активности, характеризующихся значительным энерговыделением. Несомненным преимуществом метода мюонографии является возможность изучения не только крупных, но и «мелких» событий типа sub-GLE и форбуш понижений с амплитудой менее 1%, которые не видны в регистрируемой годографом интенсивности мюонов. А возможность в рамках единого подхода изучать интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики вариаций мюонов во время этих событий лишний раз подчеркивает уникальность созданного нового детектора космического излучения для изучения событий солнечной и корональной активности, характеризующихся

относительно небольшим энерговыделением, что несомненно принесет новые знания о механизмах генерации солнечных КЛ в нижней короне Солнца, а также распространения и модуляции потока солнечных и галактических КЛ в межпланетной среде.

7. Основным достижением при анализе GSE-отображения деформаций углового распределения КЛ нужно считать то, что даже небольшие понижения Форбуша с амплитудой около 0.5% и не видимые на фоне суточной вариации КЛ (средняя амплитуда которой также составляет величину 0.5%) четко выделяются с помощью метода мюнографии, что позволяет сделать определенные выводы относительно геоэффективности корональных выбросов массы в различные периоды солнечной активности. В этом проявляется несомненное преимущество разработанного и созданного при непосредственном участии автора диссертации мюонного годоскопа перед мюонными телескопами.

8. Результаты проведенного автором анализа корреляций вариаций интенсивности КЛ и параметров локальной анизотропии мюонов, регистрируемого мюонным годоскопом УРАГАН показали, что их изменения происходят за 1–2 суток до прихода гелиосферных возмущений на орбиту Земли. Это служит обнадеживающим указанием на возможность разработки нового метода кратковременного прогноза геоэффективных проявлений космической погоды на основе данных только одной установки. Нужно отметить, что другими авторами (например, в России, США, Германии) также разрабатываются методы прогноза космической погоды, в частности, интенсивных геомагнитных возмущений на основе информации об анизотропии КЛ с привлечением данных мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов. В этом контексте полученные автором результаты вполне согласуются с ними.

9. Применение мюнографии к исследованию атмосферных процессов вызвано насущной необходимостью изучения опасных атмосферных явлений обусловленных процессами глобального изменения климата на планете. В диссертации приведены убедительные свидетельства, с большой вероятностью показывающие возможность прогноза развития грозных явлений и атмосферных фронтов в московском регионе на основе измерений мюонного годоскопа УРАГАН, причем это подтверждается независимыми измерениями доплеровского метеорадаара.

Диссертация написана простым, доступным для понимания языком и хорошо оформлена, но имеется несколько замечаний относительно текста диссертации и небольших погрешностей, которые никоим образом не меняют общей высокой оценки этого законченного научного исследования.

1. Обзор во Введении мог бы быть несколько более полным за счет включения в него свежих работ в контексте сопоставления с другими исследованиями в данной области знания. Например, в 2020 г. на станции Апатиты в комплексную систему регистрации КЛ был включен мобильный мюонный телескоп, использующий в качестве детекторов небольшие современные сцинтилляционные счетчики. В результате весь комплекс приборов на станции КЛ Апатиты позволяет решать широкий круг задач, таких как определение функции отклика детекторов, моделирование прохождения КЛ через атмосферу Земли, проводить расчет энергетических спектров вторичного излучения частиц, скорости ионизации атомов атмосферы и прочего. Было бы также полезно более детально обсудить различные методы прогнозирования космической погоды и изучения грозных явлений в атмосфере на основе измерений различных мюонных детекторов.

2. В диссертации автор постоянно использует термин «мюоны космических лучей». Но, как известно, в КЛ нет мюонов. КЛ примерно на 90% состоят из протонов, около 6% и 1% приходится на ядра гелия и электроны, соответственно, а остальное на ядра тяжелых элементов. Мюоны же рождаются в атмосфере при ее взаимодействии с входящим извне потоком КЛ, на что и указывает в самом начале диссертации сам автор. Использование этого термина в конечном итоге не мешает правильному пониманию смысла, но, для снятия неоднозначности толкования текста, автору нужно было использовать устоявшуюся терминологию.

3. При анализе возможностей мониторинга и прогноза различных проявлений космической погоды по данным мюонного годоскопа было бы более уместно говорить не о мюонной компоненте КЛ, а непосредственно о КЛ. Основанием этому служит ряд работ самого автора, в которых она использует понятие функции связи между первичным и вторичным потоками КЛ, что как раз и позволяет перейти от наземных измерений интенсивности мюонов непосредственно к потоку КЛ за пределами магнитосферы.

4. Повсеместно в диссертации на графиках приведена не интенсивность, а скорость счета мюонного годоскопа в единицу времени как для различных интервалов времени, так и в сравнении со скоростью счета нейтронных мониторов (см, например, рисунки 2.16 и 5.6). Однако, в таком представлении данных измерений весьма затруднительно проводить какой-либо анализ и/или простое сравнение между собой данных или событий (например, амплитуды суточной вариации, Форбуш-понижений или наземных возрастаний КЛ - GLE). Одна из причин этого заключается в том факте, что интенсивность КЛ значительно изменяется во времени в зависимости от уровня солнечной активности даже на коротких временных отрезках, а другая в том, что в природе нет двух одинаковых счетчиков частиц и их характеристики порой весьма различаются. Поэтому принято переводить скорость

счета различных приборов в интенсивность, измеряемую в процентах относительно некоторого периода времени, что и позволяет корректно сравнивать между собой данные регистрации различных приборов в разное время, анализировать различные события и т. д..

Подытоживая проведенное выше рассмотрение диссертации в целом, следует отметить, что работа выполнена на высоком научном уровне. Сделанные замечания не касаются защищаемых положений. Личный вклад автора в коллективные работы подробно отражен и не вызывает сомнений. Автореферат в целом правильно и полностью отражает содержание диссертации. Полученные автором результаты и все защищаемые положения надежно обоснованы, сформулированные выводы и рекомендации не вызывают сомнений, как и их достоверность и новизна, а также актуальность избранной темы. Вместе с тем, нужно отметить, что все основные результаты тщательно апробированы и опубликованы в рекомендованных ВАК и других рецензируемых, в том числе зарубежных, изданиях, кроме того на результаты интеллектуальной деятельности автором получены 6 патентов и свидетельств. Таким образом, можно сделать вывод, что все основные результаты диссертации прошли независимую научную экспертизу. Это, в свою очередь, позволяет сделать заключение, что диссертации отвечает всем предъявляемым требованиям, а ее автор – **Барбашина Наталья Сергеевна** безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

19 августа 2022 г.

Официальный оппонент:

Стародубцев Сергей Анатольевич

директор Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера  
Сибирского отделения Российской академии наук

доктор физико-математических наук, доцент

/Стародубцев С.А./

Почтовый адрес: 677027, г. Якутск, пр. Ленина, д. 31, ИКФИА СО РАН

раб. тел.: 8 (4112) 390 401; моб. тел.: +7 (914) 22 50 442

электронный адрес: [starodub@ikfia.ysn.ru](mailto:starodub@ikfia.ysn.ru)



Подпись С.А. Стародубцева удостоверяю:

Ученый секретарь ИКФИА СО РАН,

кандидат физико-математических наук

Е.Д. Бондарь

Список основных публикаций д.ф.-м.н. С.А. Стародубцева  
по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за  
последние 5 лет.

1. Gololobov P.Y., Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Zverev A.S., Gerasimova S.K. Method of global survey involving data of muon telescope network. // *Astroparticle Physics*. 131 (2021) 102586 <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2021.102586>
2. Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Зверев А.С., Стародубцев С.А., Егоров А.Г., Неустроев Н.И., Михеев А.А., Сорокин Е.Е., Кармадонов А.Я., Пахмуллов А.В. Мюонный телескоп на сцинтилляционных счетчиках. // *Приборы и техника эксперимента*. 2021. №4 С. 65-73. DOI: 10.31857/S0032816221040042 (*Перевод: Gerasimova S.K., Gololobov P.Y., Grigor'ev V.G., Zverev A.S., Starodubtsev S.A., Egorov A.G., Neustroev N.I., Mikheev A.A., Sorokin E.E., Karmadonov A.Y., Pakhmullov A.V. Muon telescope based on scintillation counters. // Instruments and Experimental Techniques*. 2021. Т. 64. № 4. С. 558-565. DOI: 10.1134/S0020441221040047)
3. V.G. Grigorev, P.Yu. Gololobov, S.A. Starodubtsev, A.S. Zverev, M.A. Abunina, M.S. Preobrazhensky and V.G. Yanke. The temperature effect of the muon component observed on A.I. Kuzmin cosmic ray spectrograph in Yakutsk. // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1181, 26th Extended European Cosmic Ray Symposium 6–10 July 2018, Altai State University, Barnaul-Belokurikha, Russian Federation Citation V.G. Grigorev et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1181 012066 doi:10.1088/1742-6596/1181/1/012066
4. V. G. Grigoryev, P. Yu. Gololobov, P. A. Krivoshapkin, G. F. Krymsky, S. A. Starodubtsev, A. S. Zverev, and V. G. Yanke. Method of Global Survey by Data of Muon Telescopes. // *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, Vol. 82, No. 6, pp. 879–885. DOI: 10.1134/S1063778819660220
5. С.А. Стародубцев, Д.Г. Баишев, В.Г. Григорьев, Р.Р. Каримов, В.И. Козлов, А.А. Корсаков, Г.А. Макаров, А.В. Моисеев. Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН. // *Солнечно-земная физика*, 2019, Т.5, №1, С. 17-38. DOI: 10.12737/szf-51201903 (*Перевод: S.A. Starodubtsev, D.G. Baishev, V.G. Grigoryev, R.R. Karimov, V.I. Kozlov, A.A. Korsakov, G.A. Makarov, A.V. Moiseev. Analyzing solar, cosmic, and geophysical events in September 2017, using SHICRA SB RAS complex observations. // Solar-Terrestrial Physics*, 2019, Vol.5, Iss.1, P. 14-27. DOI: 10.12737/stp-51201903)
6. Зверев А.С., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А. Мониторинг параметров анизотропии космических лучей в реальном времени и краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений. // *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6. № 4. С. 42-45. DOI: 10.12737/szf-64202005 (*Перевод: Zverev A.S., Grigoryev V.G., Gololobov P.Yu., Starodubtsev S.A. Real-*

- time monitoring of cosmic ray anisotropy parameters and short-term forecasting of geomagnetic disturbances. // Solar-Terrestrial Physics. 2020. V. 6. Is. 4. P. 37-39. DOI: 10.12737/stp-64202005)*
7. P.Yu. Gololobov, S.A. Starodubtsev, G.F. Krymsky, S.I. Petukhov, V.G. Grigoryev, I.S. Petukhov, A.S. Petukhova, S.K. Gerasimova, S.N. Taneev, V.I. Kozlov, and A.S. Zverev. Studies of Heliospheric Modulation and of Cosmic Rays at ShICRA SB RAS and Prospects of Their Further Development. // Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 6, pp. 1087–1097. DOI:10.1134/S1063778821130111.
  8. Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G., Krymsky G.F., Gerasimova S.K. Dynamics of energetic spectrum of solar-diurnal variations of cosmic rays in 19-24 solar activity cycles // NMDB@Home 2020: Proceedings of the 1st virtual symposium on cosmic ray studies with neutron detectors. - 2021. Vol. 1. pp.43-48. DOI: 10.38072/2748-3150/p6.
  9. Petr Yu. Gololobov, Sergey A. Starodubtsev, Vladislav G. Grigoryev, Anton S. Zverev. NMDB database and global survey method. // NMDB@Home 2020: Proceedings of the 1st virtual symposium on Cosmic ray studies with neutron detectors. 2021. Vol. 1. pp. 137-140. DOI: 10.38072/2748-3150/p17.
  10. Зверев А.С., Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю. Прогноз геоэффективных возмущений солнечного ветра по данным наземных измерений космических лучей. / В сборнике: Климатические риски и космическая погода. материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 40-47.
  11. Зверев А.С., Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю. Динамика поведения зональных составляющих распределения космических лучей и Vz-компоненты межпланетного магнитного поля в периоды геомагнитных бурь в 23 и 24 циклах солнечной активности. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1646-1649. DOI: 10.31857/S0367676521110405 (Перевод: Zverev A.S., Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., Gololobov P.Yu. Behavior of Zonal Components of the Cosmic Ray Distribution and Bz Component of the Interplanetary Magnetic Field during Geomagnetic Storms in Solar Cycles 23 and 24 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. No.11. pp.1297–1300. doi: 10.3103/S106287382111040X)
  12. С.Н. Танеев, С.А. Стародубцев, В.Г. Григорьев, Е.Г. Бережко. Ускорение солнечных космических лучей ударной волной в нижней короне Солнца 22 ноября 1977 г. // ЖЭТФ, Т.156, Вып.3 (9), С.449-460, 2019. DOI: 10.1134/S0044451019090074 (Перевод: Taneev S.N., Starodubtsev S.A., Grigor'ev V.G., Berezhko E.G. Solar cosmic ray acceleration by a shock wave in the lower solar corona on November 22, 1977. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2019. T. 129. № 3. С. 375-385. DOI: 10.1134/S1063776119080089)
  13. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Мониторинг геомагнитных возмущений на основе метода глобальной съемки в реальном



- времени. // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 110-115. DOI: 10.12737/szf-53201911 (Перевод: Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Yu. *Monitoring of geomagnetic disturbances using the global survey method in real time.* // *Solar- Terrestrial Physics.* 2019. Т. 5. № 3. С. 93-97. DOI: 10.12737/stp-53201911)
14. Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., Gololobov P.Yu. Behavior of zonal components of cosmic ray distribution and Dst-index of geomagnetic field during periods of geoeffective disturbances of solar wind. // *Journal of Physics: Conference Series* 26. Сер. "26th Extended European Cosmic Ray Symposium" 2019. С. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012011
15. Танеев С.Н., Стародубцев С.А., Бережко Е.Г. Ускорение частиц и генерация альфвеновских волн на межпланетной ударной волне 4 апреля 2001 г. // *ЖЭТФ*, Т.153, №5, С. 765-775, 2018. DOI: 10.7868/S0044451018050085 (Перевод: Taneev, S. N., Starodubtsev, S. A., Berezhko, E. G.. *Particle Acceleration and Alfv'en Wave Generation at the April 4, 2001 Interplanetary Shock.* // *Journal of experimental and theoretical physics*, V.126, Iss.5, P. 636-644, 2018. DOI: 10.1134/S106377611804009X)