

ОТЗЫВ официального оппонента
д.ф.-м.н., доцента Струминского Алексея Борисовича
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**»

Метод мюонографии защищаемый диссертантом предназначен для исследования вариаций космических лучей (КЛ), наблюдаемых на поверхности Земли в мюонном компоненте вторичных КЛ с помощью мюонного годоскопа.

Мюонный годоскоп регистрирует направление прихода каждого мюона, что позволяет точно измерять функцию распределения мюонов по углам, и исследовать эффекты анизотропии первичных и вторичных КЛ. Мюонография является альтернативным методом исследования вариаций и анизотропии КЛ. С середины 50-х годов прошлого века для исследования различных вариаций КЛ (гелиосферных, магнитосферных и атмосферных) используются сеть нейтронных мониторов (НМ) — нейтронный компонент и сеть много направленных телескопов (ММТ) — мюонный компонент. В деле предсказания космической погоды по вариациям первичных КЛ метод мюонографии (мюонной томографии) претендует быть конкурентом методам, основанным на патрульных наблюдениях Солнца (рентген, радио и коронографы), а для предсказания неблагоприятных явлений в атмосфере Земли (вариации вторичных КЛ) — георадарам. Пионером развития методов мюонной диагностики в МИФИ является В.В. Борог (см. ссылки [55-58] в диссертации), им было введено понятие мюонной томографии.

Целью представленной диссертационной работы является развитие метода мюонографии для предсказания с его помощью опасных процессов в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. **Актуальность** диссертации определяется необходимостью решения задачи предсказания «космической погоды» в реальном времени.

Диссертант принял участие в создании качественно нового мюонного годоскопа «Ураган» и в анализе данных его наблюдений в 2006-2021 годах. Диссертация Н.С. Барбашиной соответствует специальности 01.04.01 – «**Приборы и методы экспериментальной физики**» в части разработки и создания новых приборов для исследований в области астрономии и астрофизики, а также в части разработки методов математической обработки экспериментальных результатов. Выбранное направление исследований представляется актуальным и своевременным, в начале 25-го цикла солнечной активности безусловно необходимо подвести итоги деятельности, начавшейся в конце 23-го цикла. **Научная новизна и практическая значимость** выполненного исследования гелиосферных и атмосферных возмущений методом мюонографии подтверждены двумя патентами на изобретения, двумя патентами на полезные модели и двумя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

Мое основное замечание к диссертации заключается в недостаточно полном сравнении результатов с конкурирующими методами исследований и предсказания возмущений межпланетной среды. Это замечание было бы критическим, если бы диссертация была по «физике Солнца», а не «приборам и методам эксперимента». Ниже, я комментирую различные Главы диссертации и задаю вопросы, которые выделяю *курсивом*. Для краткости я не привожу формулировки защищаемых положений (их можно найти в автореферате и тексте диссертации), а даю только их ключевые слова.

Диссертация состоит из ВВЕДЕНИЯ, шести научных ГЛАВ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ и ПРИЛОЖЕНИЯ. На защиту диссертант выносит девять защищаемых положений. Четкого соответствия между Главами и защищаемыми положениями нет, некоторые защищаемые положения основаны на материале нескольких глав. Порядок следования Глав 2-6 фактически соответствует длительности наблюдаемых вариаций.

На материале **Главы 1** «Мюонография — новый метод мюонной диагностики», в которой рассмотрена общая концепция метода мюонографии, описан мюонный годоскоп «Ураган» и общие принципы обработки его наблюдательных данных, сформулированы **первое (метод измерения) и второе (метод обработки данных) защищаемые положения.**

Тождественны ли термины «мюонная томография» и «мюонография»? Какое преимущество дает мюонный годоскоп по сравнению с сетями НМ и ММТ, если все равно в итоге необходима сеть годоскопов? Какие ограничения на результаты диссертации возникают, если в ней рассмотрены данные только одного годоскопа, а не сети?

Ответы на часть из этих вопросов вынесены диссертантом почему-то в ПРИЛОЖЕНИЕ, а не в основной текст. Только после прочтения ПРИЛОЖЕНИЯ становится понятно, что диссертант осознает основную сложность метода мюонографии, которая связана с наложением возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере. В диссертации для их разделения используется разница характерных времен гелиосферных, магнитосферных и атмосферных возмущений.

На основе материала **Главы 2** «Экспериментальные исследования вариаций мюонов космических лучей», в которой исследовались долговременные вариации первичных КЛ, сформулированы **третье (результаты обработки данных - мюонографии) и пятое (количественные параметры мюонографий) защищаемые положения.**

Мне непонятна формулировка **четвертого защищаемого положения (гелиосферные события)**, «Методы выявления гелиосферных событий по форбуш-понижениям, зарегистрированных в потоке мюонов, и результаты анализа более ста таких событий за 2007 – 2020 гг.».

Что имеет в виду диссертант под методами выявления гелиосферных событий в данном случае? В чем состоит принципиальное отличие четвертого защищаемого положения от шестого, седьмого и восьмого?

На исследованиях **Главы 3** «Мюонография событий типа GLE» и **Главы 4** «Мюонография форбуш-понижений» сформулировано **шестое защищаемое положение** (характеристики GLE и форбуш-понижений).

Можно ли по наблюдаемым в реальном времени мюонографиям дать количественный критерий начала регистрации GLE или форбуш-понижения (пятое защищаемое положение)? Почему важно знать пространственную картину GLE в потоке мюонов и ее изменение во времени?

Для ФП в диссертации выполнены энергетические оценки с использованием функций связи (их иллюстрирует рис. 4.3), но этого не сделано для GLE событий. Факт не регистрации GLE событий может быть связан с очень мягким спектром солнечных протонов, а не только с их угловым распределением и направлением силовой линии ММП.

Замечу, что 28 октября 2021 года было зарегистрировано GLE 73, первое событие 25-го цикла. Было ли зарегистрировано GLE 73 мюонным годоскопом Ураган?

На материале **Главы 5** «МЮОНОГРАФИЯ ГЕЛИОСФЕРНЫХ И МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ», в которой рассматривается применение мюонографий для спорадических и рекуррентных возмущений солнечного ветра, сформулированы **седьмое** (особенность мюонографий гелиосферных возмущений) и **восьмое** (корреляция параметров первичных КЛ и анизотропии мюонов) **защищаемые положения**.

Несмотря на название Главы 5, мюонографии чисто магнитосферных вариаций мюонов не рассматриваются. Исследовались магнитосферные вариации в момент, когда в Москве наблюдались полярные сияния (например, 17 марта 2015 года, обсуждение этого события было в «Троицком варианте»)?

В подписи к Рис. 5.10. неправильно указан! Год 2011, а 2022. Непонятны рассуждения про КВМ, зарегистрированного в базе данных SASTus 24 апреля 2011 года со скоростью 300 км/с. Верна ли привязка к нему геоэффективного ($Kp=5$) возмущения солнечного ветра со средней скоростью 508 км/с?

В **Главе 6** «МЮОНОГРАФИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ» рассматривается применение мюонографий для исследований в атмосфере Земли, на ее основе сформулировано **девятое защищаемое положение** (мюонографии гроз). Впервые на основе мюонографий и карт метеорологических доплеровских радаров показано, что параметры анизотропии потока мюонов позволяют идентифицировать грозные явления с вероятностью ~70%, а при прохождении атмосферных фронтов – более 80%.

Является ли различие между ~70% и более 80 % значимым? Если да, то можно ли утверждать, что влияние электрических полей грозных фронтов размывает анизотропию, вызванную плотностью?

Достоверность результатов диссертации обосновывается идентичностью явлений, наблюдаемых на трех независимых супермодулях мюонного годоскопа, высокой степенью согласованности данных мюонного годоскопа с данными нейтронных мониторов и метеорологических доплеровских радаров. Результаты прошли **апробацию** на 42-х международных и российских конференциях. Статьи по теме диссертации опубликованы в трудах конференций, а также в рецензируемых журналах «Astroparticle Physics», «Physics of Atomic Nuclei», «Известия РАН. Серия физическая», «Геомагнетизм и аэронавигация», «Advances in Space Research», «Journal of Physics: Conference Series», «Proceedings of Science». Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Сделанные выше замечания не влияют на основные выводы диссертации и ее высокую оценку. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

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, за разработку и реализацию нового метода дистанционного исследования космического и околоземного пространства в потоке мюонов космических лучей – метода мюонографии, который является научным достижением, имеющим важный прикладной характер, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики**.

Официальный оппонент

Струминский Алексей Борисович

Ведущий научный сотрудник ИКИ РАН

Доктор физ-мат. наук, доцент

02.09.2022

e-mail astrum@iki.rssi.ru

тел +7(926)275-71-88

/Струминский А.Б./

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

Подпись Струминского А.Б. удостоверена

Ученый секретарь ИКИ РАН, Садовский А.М.



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

1. Grigor'eva I.Y., Struminsky A.B. Flares Unaccompanied By Interplanetary Coronal Mass Ejections And Solar Proton Events. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. V. 61 (8), pp. 1263-1273.
2. Struminsky A.B., Sadovski A.M., Grigor'eva I.Y., Logachev Y.I. Relationship Between Duration and Rate of the CME Acceleration. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. V. 61 (6), pp. 781-791.
3. Struminsky A.B., Sadovskii A.M., Grigorieva I.Y., Logachev Y.I. Solar Electrons And Protons In Flares With A Pronounced Impulsive Phase. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021. V. 85 (8), pp. 907-910.
4. Struminsky A.B., Sadovski A.M., Logachev Y.I., Grigorieva I.Y. Two Types Of Gradual Events: Solar Protons And Relativistic Electrons. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. V. 60 (8), pp. 1057-1066.
5. Grigor'eva I.Y., Struminskii A.B., Shakhovskaya A.N. Prolonged, Weak C1.2 Flares: A Source Of Protons And Electrons. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. V. 60 (6), pp. 699-707.
6. Struminsky A.B., Sadovski A.M., Grigorieva I.Y., Logachev Y.I. Two Phases Of Solar Flares And A Stochastic Mechanism For Acceleration Of Electrons And Protons. *Astrophysics*. 2020. V. 63 (3), pp. 388-398.
7. Struminskii A.B., Sadovskii A.M., Grigor'eva I.Y., Logachev Y.I. Solar Electrons And Protons In The Events Of September 4–10, 2017 And Related Phenomena. *Plasma Physics Reports*. 2020. V. 46 (2), pp. 174-188.
8. Struminsky A.B. Solar Proton Events Of September 6 And 10, 2017: Moments Of The First Arrival Of Protons And Electrons. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019. V. 83 (5), pp. 538-542.
9. Struminsky A., Sadovski A. Astrospheres And Cosmic Rays. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1181 (1) p. 012002.
10. Struminsky A.B., Sadovski A.M., Zharikova M.S. Radiation conditions near exoplanets of the TRAPPIST-1 system. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. V. 58 (8), pp. 1108-1112.
11. Zimovets I.V., Wang R., Liu Y.D., Wang C., Sharykin I.N., Struminsky A.B., Kuznetsov S.A., Nakariakov V.M. Magnetic structure of solar flare regions producing hard X-ray pulsations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. V. 174, pp. 17-27.
12. Frolov D.A., Ostryakov V.M., Pavlov A.K., Vasilyev G.I., Struminsky A.B. Isotopic Terrestrial Imprints Of Solar Superflares. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1038 (1), pp. 012008.
13. Sadovski A.M., Struminsky A.B., Belov A. Cosmic Rays Near Proxima Centauri B. *Astronomy Letters*. 2018. V. 44 (5), pp. 324-330.

14. Belov A.V., Struminsky A.B. Ultimate Ground Level Enhancements Of Solar Cosmic Ray Intensity. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2017. V. 81 (2), pp. 124-127.
15. Struminsky A. Gamma-Ray Solar Flares And In Situ Particle Acceleration. *Proceedings of the International Astronomical Union*. 2017. V. 13 (S335), pp. 43-48.