

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

УДК 520.2/.4:523.3/.4:520.6.04/.08 523.3/.4 520.876:523.3/.4
Per. № 122042500014-1

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ИКИ РАН,

Член корреспондент РАН

А.А. Петрукович

12 2022 г.



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследование Луны, планет и объектов Солнечной системы методами ядерной физики для
изучения физической природы этих небесных тел для выяснения условий их освоения

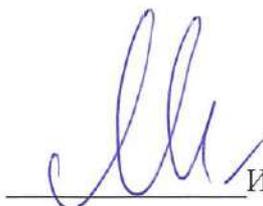
(промежуточный, этап 1)

по теме

ОСВОЕНИЕ

FFWG-2022-0003

Научный руководитель
заведующий отделом 63 ИКИ РАН,
д.ф.-м.н.


И.Г. Митрофанов

Москва 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель
заведующий отделом 63 ИКИ РАН,
д.ф.-м.н.

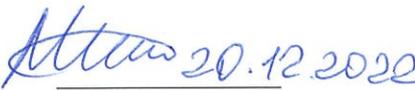

_____ (И.Г. Митрофанов)
подпись, дата 20.12.2022 (введение, заключение, раздел 1)

Исполнители:

заведующий лабораторией
отдела 63 ИКИ РАН,
д.ф.-м.н., проф. РАН


_____ (М.Л. Литвак)
подпись, дата 20.12.2022 (разделы 1, 2, 3)

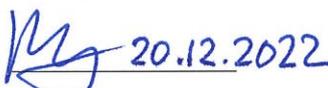
заведующий лабораторией
отдела 63 ИКИ РАН, к.ф.-м.н.


_____ (М.И. Мокроусов)
подпись, дата 20.12.2022 (раздел 5)

старший научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН
к.ф.-м.н.


_____ (А.Б. Санин)
подпись, дата 20.12.2022 (разделы 2, 3)

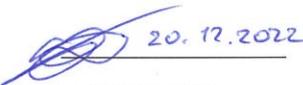
старший научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН
к.ф.-м.н.


_____ (А.С. Козырев)
подпись, дата 20.12.2022 (разделы 1, 4)

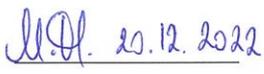
научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН


_____ (В.М. Лозников)
подпись, дата 20.12.2022 (раздел 1)

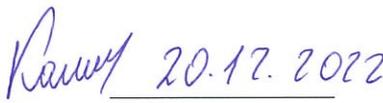
научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН,


_____ (С.Ю. Никифоров)
подпись, дата 20.12.2022 (раздел 3)

младший научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН


_____ (М.В. Дьячкова)
подпись, дата 20.12.2022 (разделы 2, 3)

ведущий специалист
отдела 63 ИКИ РАН


_____ (Д.В. Калашников)
подпись, дата 20.12.2022 (введение, заключение,
разделы 1, 2, 3, 4, 5)

Нормоконтроль


_____ (В.Г. Прохоров)
подпись, дата 20.12.2022



РЕФЕРАТ

Отчет – 56 с., 1 кн., 19 рис., 2 табл., 67 источн.

ЯДЕРНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ, ЛУНА, МАРС, ВЕНЕРА, МЕРКУРИЙ, ПРИБОР БТН, ПРИБОР ХЕНД, ПРИБОР ДАН, ПРИБОР ФРЕНД, ПРИБОР МГНС, ПРОЕКТ ЛУНА-25, ПРОЕКТ ЛУНА-27, ГЕОЛОГИЯ МАРСА, ГЕОЛОГИЯ ЛУНЫ, РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В КОСМОСЕ, КОСМИЧЕСКИЕ ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ, СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Объектами фундаментальных исследований по теме являются Луна, планеты, объекты и межпланетное пространство Солнечной системы, а также космические источники гамма-излучения.

Практической целью исследований является изучения физической природы небесных тел Солнечной системы для выяснения условий их освоения.

Исследование осуществлялось посредством общенаучных и специальных методов на основе применения ядерно-физических технологий.

В результате исследований определены перспективные направления исследования объектов Солнечной системы с точки зрения их освоения: разработаны научные концепции перспективных лунных проектов, обнаружены районы на Марсе с высоким содержанием воды, получены данные о космическом радиационном фоне. В рамках работ по теме «ОСВОЕНИЕ» проводилось научное сопровождение лунных проектов Луна-25 и Луна-27.

Осуществлялись изучение полярных районов Луны для выбора мест посадок перспективных космических аппаратов; создание приборов для исследований лунного и марсианского грунта; практическое применение новых методов: оценки содержания водного эквивалента водорода в подповерхностном слое Марса по данным пассивных измерений прибора ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити»; метода пиксельного представления данных измерений прибора ДАН; составление первой части каталога с данными о концентрации воды и хлора вдоль трассы марсохода «Кьюриосити» по данным измерений прибора ДАН, изучение радиационного фона на Марсе на основе данных измерений приборов ФРЕНД и ХЕНД; определение небесных координат с точностью порядка угловых минут для новых источников космических гамма-всплесков с на основе данных измерений приборов МГНС и ХЕНД на межпланетных расстояниях от Земли.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Наиболее значимый результат за 2022 год.	7
1 Изучение космического гамма- и нейтронного излучения; оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел солнечной системы; исследование радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий	8
2 Изучение полярных районов Луны (полярный реголит, полярная экзосфера), оценка содержания в лунном веществе воды и природных ресурсов, условия обеспечения ресурсами лунных пилотируемых экспедиций, перспективы освоения Луны	13
3. Изучение элементного состава вещества Марса и его спутников, оценка содержания в их грунте воды, исследование сезонных вариаций атмосферы, выяснение условий обеспечения ресурсами марсианских пилотируемых экспедиций	22
4 Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы	33
5 Разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению	36
Заключение.....	45
Список использованных источников	50

ВВЕДЕНИЕ

Институт космических исследований Российской академии наук проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по теме FFWG-2022-0003 ОСВОЕНИЕ в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы) в рамках подпрограммы 2 «Фундаментальные и поисковые научные исследования» по следующим направлениям исследований: 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц (разделы: 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц; 1.3.3.4. Физика космических лучей; 1.3.3.6. Развитие методов детектирования элементарных частиц, атомных ядер и ионизирующего излучения, методов рентгеновской и нейтронной оптики; 1.3.3.7. Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях); 1.3.7. Астрономия и исследования космического пространства (разделы: 1.3.7.4. Солнце и физика околоземного космического пространства, солнечно-земные связи; 1.3.7.5. Планеты и планетные системы).

В 2022 году проводились следующие исследования:

- оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел Солнечной системы;
- изучение космических источников гамма-всплесков, оценка с высокой точностью их координат на небесной сфере;
- изучение полярных районов Луны (полярный реголит, полярная экзосфера), оценка содержания в лунном веществе воды и природных ресурсов, отбор перспективных мест посадки космических аппаратов; разработка перспектив освоения Луны;
- изучение элементного состава вещества Марса, картографирование содержания в марсианском грунте воды, изучение сезонных вариаций марсианской атмосферы;
- изучение элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия и Венеры;
- разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению.

В данном отчете отражены основные результаты исследований, проведенных в 2022 г. по теме

В данном отчете отражены основные результаты исследований, проведенных в 2022 г. по теме ОСВОЕНИЕ. Исследование Луны, планет и объектов Солнечной системы

методами ядерной физики для изучения физической природы этих небесных тел для выяснения условий их освоения.

Наиболее значимый результат за 2022 год. Разработка перспективного прибора «Космический гамма-спектрометр с мечеными заряженными частицами» (КГС-МЗЧ) для изучения Луны, Марса и других небесных тел солнечной системы методами ядерной физики

Митрофанов И.Г.¹, Литвак М.Л.^{1✉}, Санин А.Б.¹, Аникин А.А.¹, Мокроусов М.И.¹, Головин Д.В.¹, Никифоров С.Ю.¹, Тимошенко Г.Н.², Швецов В.Н.²

В настоящее время становятся актуальными эксперименты по анализу вещества Луны и Марса с использованием методов гамма-спектроскопии. Эти небесные тела излучают гамма-лучи под воздействием на них галактических космических лучей (ГКЛ). Измерения характеристических ядерных линий этого излучения в принципе позволяют определить состав породообразующих элементов, провести разведку внеземных природных ресурсов. Но для этого необходимо избавиться от собственного фона космического аппарата, на котором установлен прибор.

Разработанный в ИКИ РАН перспективный гамма-спектрометр нового типа (Космический гамма-спектрометр с метками заряженных частиц, КГС-МЗЧ) позволяет проводить анализ состава вещества только в выделенном объеме поверхности небесного тела. Это достигается включением в состав прибора детектора заряженных частиц ДГКЛ, метки от которого отмечают для спектрометрического анализа только те фотоны, которые были испущены ядрами из выделенного объема исследования (см. рисунок).

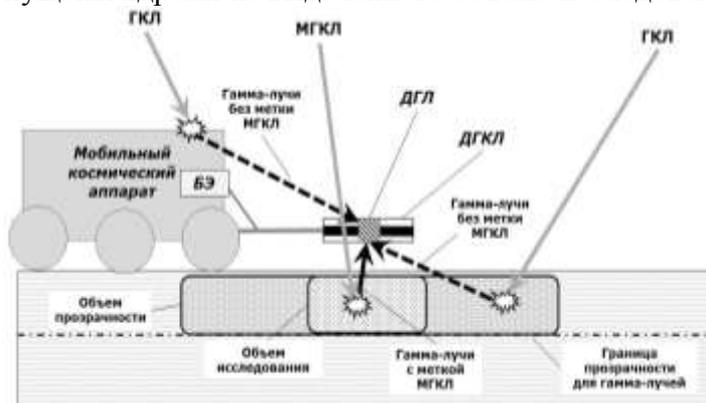


Рисунок. Эксперимент КГС-МЗЧ на борту мобильного космического аппарата

Лабораторный макет прибора прошел натурные испытания на протонном ускорителе-фазотроне Объединенного института ядерных исследований. На основе анализа полученных экспериментальных данных было показано, что КГС-МЗЧ на борту мобильного аппарата позволит исследовать вариации состава лунного или марсианского грунта вдоль трассы движения, проводить геологоразведку под поверхностью залежей редкоземельных элементов.

Результаты опубликованы: Mitrofanov, I. G.; Sanin, A. B.; et al. The concept of gamma-ray remote sensing of Martian surface composition onboard a Mars Rover, *Acta Astronautica*, Volume 199, p. 134-141, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.019>; Mitrofanov I.G., Litvak M.L., et al. Laboratory demonstration of space gamma-ray spectroscopy experiment with tags of Galactic cosmic rays for testing different types of Martian regolith, *Nucl. Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, Vol. 1028, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166364>
Работа выполнена при поддержке гранта 18-12-00487 Российского научного фонда.

Направления ПФНИ: 1.3.3.7. Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях; 1.3.7.5. Планеты и планетные системы.

¹ Институт космических исследований Российской академии наук

² Объединенный институт ядерных исследований.

✉ litvak@mx.iki.rssi.ru, 8(495)333-15-22

1 Изучение космического гамма- и нейтронного излучения; оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел солнечной системы; исследование радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий

Руководитель Раздела д.ф.-м.н. И.Г. Митрофанов

В 2022 году было продолжено изучение космического гамма- и нейтронного излучения и оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел солнечной системы; исследование радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий.

Продолжена работа по локализации источников космических гамма-всплесков в рамках международной программы IPN (InterPlanetary Network), частью которой с 21 октября 2021 года стал разработанный в ИКИ РАН прибор МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) миссии «БепиКоломбо» (см. Отчет по теме «ОСВОЕНИЕ» за 2021 г.). Кроме МГНС, в программе IPN на сегодняшний день участвуют еще пять приборов на бортах различных космических аппаратов, из которых еще один, российский прибор ХЕНД на борту КА «Марс Одиссей», также создан в ИКИ РАН. Важной особенностью участия приборов МГНС и ХЕНД в программе IPN является также то, что они единственные из числа участвующих в ней приборов, кто работает не на земной орбите (МГНС – на орбите перелета к Меркурию, ХЕНД – на марсианской орбите). Такое положение создает предпосылки для особой точности локализации гамма-всплеска с использованием данных этих двух приборов.

Так, гамма-всплеск, наблюдаемый и МГНС, и ХЕНД с временной задержкой ΔT может быть локализован как кольцо на астрономической сфере с углом наклона θ относительно вектора между двумя космическими аппаратами. Угол θ определяется из выражения:

$$\cos\theta = \frac{C\Delta T}{D_{12}} \quad (1)$$

где D_{12} расстояние между КА «БепиКоломбо» и «Марс Одиссей», C - скорость света, а ΔT – время задержки регистрации гамма-всплесков приборами ХЕНД и МГНС. Ширина окружности $\delta\theta$ определяется точностью определения времени регистрации одиночного гамма-всплеска двумя гамма-детекторами $\delta(\Delta T)$ и точностью определения их

относительного положения в пространстве. Важно, что точность локализации гамма-всплесков возрастает с увеличением расстояния D_{12} и с увеличением точности хронометража, т.е. минимизации $\delta(\Delta T)$. Систематическая погрешность определения взаимного положения КА «БепиКоломбо» и «Марс Одиссей» вычисляется для каждого из них и учитывается в соответствующих базах данных, входящих в систему SPICE. Но в любом случае она значительно меньше статистической неопределенности, полученной из корреляции между кривыми блеска приборов МГНС и ХЕНД.

Точность синхронизации тесно связана с продолжительностью интервала сбора данных прибора, который, в свою очередь, определяется необходимостью накапливать статистически значимое количество отсчетов в течение каждого интервала. Ограниченная чувствительность детектора, определяемая его геометрическими размерами и типом используемого сцинтилляционного кристалла, не позволяет выбрать сколь угодно малый интервал накопления данных и тем самым повысить точность синхронизации. Поэтому основным путем повышения точности локализации гамма-всплесков методом триангуляции является увеличение расстояния между детекторами до межпланетных диапазонов. Очевидно, что и МГНС, и ХЕНД оптимально отвечают указанным требованиям, несмотря на то, что регистрация гамма-всплесков не является их основной научной задачей.

Для локализации гамма-всплесков по данным МГНС и ХЕНД была применена специальная процедура аппроксимации, учитывающая разницу во временном разрешении измерений указанных приборов. Проверка полученных при применении этой процедуры результатов осуществлялась посредством сравнения с данными, полученными независимо другими космическими приборами, а также с данными, полученными сетью IPN. Результаты сравнения показали, что данные МГНС-ХЕНД могут значительно улучшить локализацию гамма-всплесков, как показано на примере гамма-всплеска GRB200219C на рисунке 1.1, демонстрирующем как данные МГНС и ХЕНД обеспечивают значительное уменьшение площади неба, соответствующей вероятному местоположению источника гамма-всплесков, полученному по данным прибора FERMI.

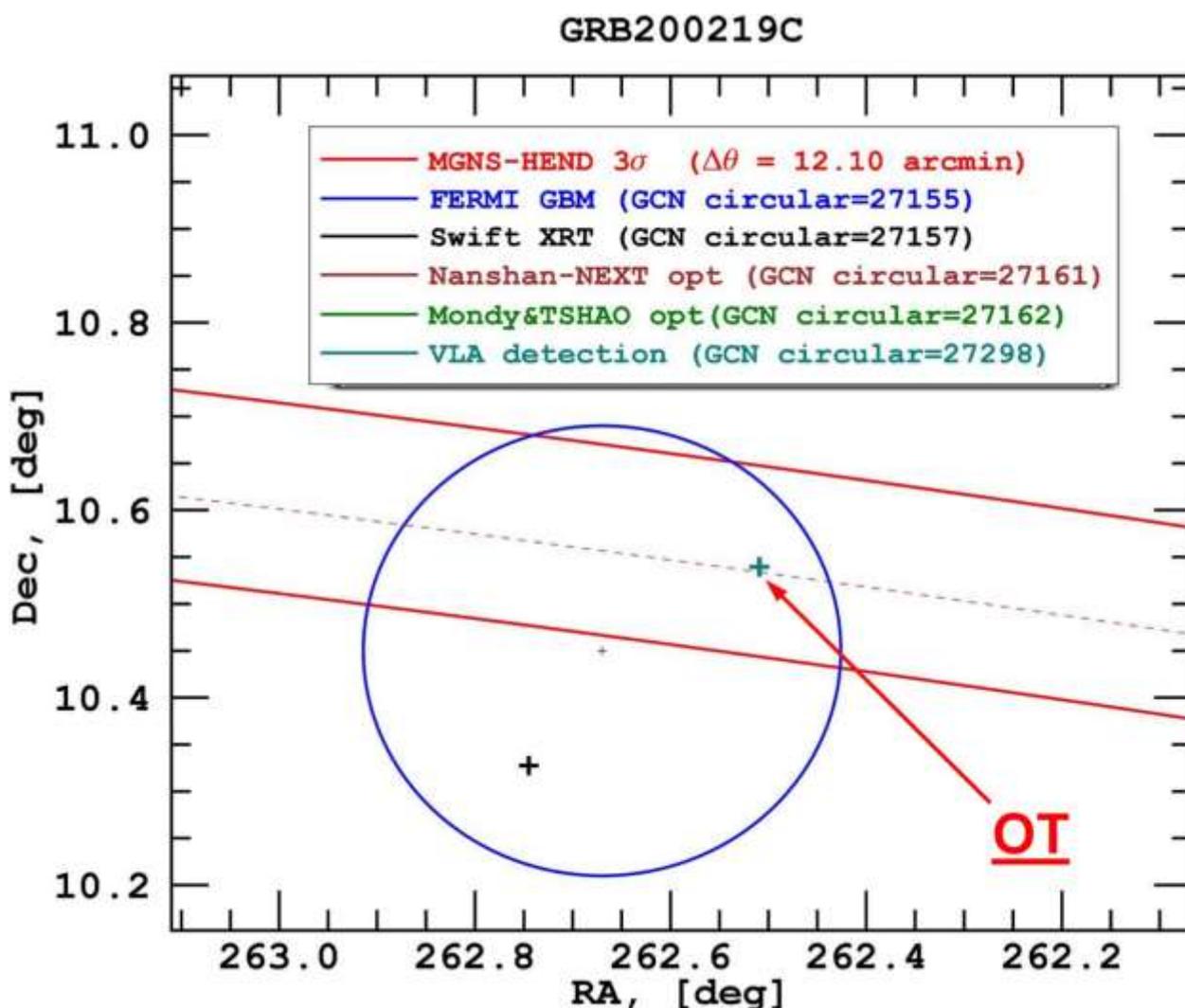


Рисунок 1.1 Область локализации гамма-всплеска GRB200219C, полученная по данным приборов МГНС и ХЕНД (показана красным). Стрелкой показаны точки обнаружения оптического и рентгеновского транзиентов, отождествленных с источником гамма-всплеска GRB200219C (циркуляры GSN 27161, 27162 и 27298)

Всего за первые 3,5 года перелета КА «БепиКоломбо» к Меркурию прибором МГНС было зарегистрировано 43 подтвержденных гамма-всплеска. Для 24 из них была выполнена локализация методом триангуляции совместно с данными прибора ХЕНД, и полученные кольца локализации обеспечили среднюю точность около 13 угловых минут. Для 16 гамма-всплесков область локализации была либо значительно улучшена, либо пересмотрена. Ожидается, что в последующем пара МГНС-ХЕНД сможет обеспечить точную локализацию с частотой обнаружения около 2 гамма-всплеска в месяц.

За 2022 год (приборами ХЕНД и МГНС) было зарегистрировано 32 гамма-всплеска, о чем выпущено 35 циркуляров.

Так же в рамках системы IPN был, с использование данных прибора ХЕНД, подготовлен Второй каталог локализаций кратковременных гамма-всплесков,

зарегистрированных в ходе российско-американского эксперимента «Конус-Винд» в период с 1 января 2011 г. по 31 августа 2021 г. Всего каталог охватывает 199 гамма-всплесков, из которых 72 локализованы с привлечением данных прибора ХЕНД.

Проведен поиск переменности в спектрах протонов космических лучей. Необходимость такого поиска обусловлена существованием спектральных особенностей, наличие которых противоречит стандартному сценарию формирования спектра космических лучей («регулярного механизма ускорения», «диффузионного ускорения частиц ударной волны», «ускорение Ферми первого рода») и указывает на необходимость уточнения общепринятого сценария формирования энергетического спектра космических лучей.

Диффузионное ускорение частиц ударной волны и другие статистические механизмы ускорения космических лучей фактически являются различными вариантами идеи о возможности ускорения космических лучей с повторным рассеянием заряженных частиц на неоднородностях магнитного поля в Галактике. Существенным является то, что эти механизмы ускорения медленные, т.е. для ускорения космических лучей требуется время около 1000 лет.

За последние 20 лет появились новые высокоточные приборы, позволившие обнаружить, что энергетический спектр космических лучей не плавный, а имеет особенности.

Так, в спектрах электронов и позитронов космических лучей в диапазоне энергий (~10 - 1000) ГэВ в ряде экспериментов обнаружены достоверные спектральные особенности разного типа (эксперименты ATIC 1-2, PPB-BETS, PAMELA, Fermi-LAT, AMS-02, DAMPE, CALET, HESS).

В энергетических спектрах протонов, ядер гелия и других тяжелых ядер в диапазоне энергий (~20 ГэВ - 1000 ТэВ) также были обнаружены достоверные спектральные особенности. Обнаружен излом энергетического спектра вблизи энергии ~ 300 ГэВ в экспериментах PAMELA, ATIC, BESS-TEV, AMS-02. В экспериментах CREAM, RUNJOB, CALET, DAMPE, NUCLEON были обнаружены широкие квазипики в диапазоне (~20 ТэВ - 1000 ТэВ).

Для объяснения существования особенностей спектров космических лучей (и их переменности во времени) необходим механизм быстрого ускорения. Кроме того, источники особенностей спектров должны находиться близко к Земле.

Поиск глобальной временной переменности в энергетических спектрах протонов космических лучей проводился по данным экспериментов CALET, DAMPE, NUCLEON, CREAM-III, AMS-02 (3 года наблюдений) и AMS-02 (7 лет наблюдений). Аппроксимация

всех спектров (в диапазоне энергий ~ 6 ГэВ - 300 ТэВ) производилась посредством эмпирической модели, описывающей экспериментальные данные как сумму трех спектральных компонентов: постоянного фона и двух переменных компонент с различным обрезанием на высоких энергиях. Установлено, что «мягкая» компонента имеет показатель степени $\alpha_H \approx 3$ и параметр обрезания ~ 200 ГэВ, а «жесткая» компонента имеет показатель степени $\alpha_L \approx 2,4$ и параметр обрезания ~ 100 ТэВ.

Для поиска переменности спектров космических лучей все эксперименты сравнивались попарно. Достоверных изменений спектральных кривых в данных разных экспериментов обнаружено не было, при том что в рамках задействованной модели параметры аппроксимаций объединенных спектров с точностью до ошибок совпали с параметрами аппроксимаций отдельных спектров, что доказывает ее высокое качество.

Различие между средними значениями показателей степени «мягкой» и «жесткой» компоненты установлено достоверно и составляет более 28σ . Следовательно, «мягкие» и «жесткие» компоненты спектров протонов космических лучей действительно существуют. Так же было установлено, что параметр обрезания «жесткой» компоненты в некоторых экспериментах может отличаться более чем на 5σ . Так параметр обрезания «жесткой» компоненты E_{L_cut} аппроксимации результатов пары экспериментов «AMS (3 года наблюдений) - DAMPE» достоверно отличается на $8,6\sigma$ от соответствующего параметра обрезания пары экспериментов «AMS (3 года наблюдений) - NUCLEON». В экспериментах «AMS (7 лет наблюдений) - DAMPE» и «AMS (3 года наблюдений) - NUCLEON» параметр E_{L_cut} достоверно различается на $8,3\sigma$. Следовательно, вариативность параметра обрезания «жесткой» компоненты вполне реальна.

Предпринятые оценки показали, что может быть обнаружена глобальная переменность спектров космических лучей (т.е. переменность всей спектральной кривой) для ядер элементов с большими Z .

Существование переменных источников космических лучей можно объяснить наличием близких (<1 пк) сурфатронных ускорителей. «Мягкий» переменный компонент космических лучей, согласно предложенной гипотезе, расположен на периферии гелиосферы на расстоянии $\sim 100-200$ а.е. (или $\sim 10-3$ пк) от Земли, а «жесткий» переменный источник космических лучей может находиться в ближайших межзвездных облаках в локальном пузыре горячего межзвездного газа на расстоянии <1 пк.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.4, 1.6, 1.9, 1.10, 2.2, 2.4).

2 Изучение полярных районов Луны (полярный реголит, полярная экзосфера), оценка содержания в лунном веществе воды и природных ресурсов, условия обеспечения ресурсами лунных пилотируемых экспедиций, перспективы освоения Луны

Руководитель раздела - к.ф.-м.н. А.Б. Санин

В 2022 году распределение усилий по теме продолжало быть сконцентрированным на «лунной» тематике, что связано прежде всего с планируемым переходом к активной части отечественной лунной программы – запланированным на 2023 год стартом КА «Луна-25».

Продолжена работа по выбору мест посадки на Луне отечественных космических аппаратов. Так, если в 2021 году рассматривались вопросы выбора места посадки КА «Луна-25» (см. Отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.), планируемого к запуску в 2023 году, то в 2022 году исследовались вопросы выбора места посадки следующего по времени старта миссии (2025 год) отечественного посадочного КА – «Луна-27».

«Луна-27» представляет собой спускаемый аппарат, предназначенный для посадки на широтах южнее 80° ю.ш. Основной целью научной миссии КА «Луна-27» является *in situ* обнаружение и изучение летучих веществ в грунте Луны, в том числе водяного льда, вблизи южного полюса. Для достижения этой цели должны быть решены следующие научные задачи: анализ грунта и исследования его физических (механических, тепловых и др.) свойств, исследования минералогического, элементного и изотопного состава лунного реголита в образцах, доставляемых с различных глубин от 1 м до поверхности, взятых в непосредственной окрестности космического аппарата. Также в проекте будут выполнены исследования ионной, нейтральной и пылевой составляющих экзосферы Луны и эффектов взаимодействия поверхности Луны с межпланетной средой и солнечным ветром, сейсмологические исследования внутреннего строения Луны и исследования ее глобального движения.

Научные цели проекта «Луна-27» требуют приближения сектора выбора района посадки ближе к южному полюсу относительно выбранных основного и резервного районов посадки КА «Луна-25» (см. Отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.), которые расположены на границе южной полярной области. Выбор мест посадки КА «Луна-25» обусловлен поиском компромисса между научными целями миссии и инженерными ограничениями, связанными, прежде всего, с размером эллипса посадки, составляющим (15 × 30) км. Площадки такого размера, соответствующие инженерным требованиям,

предъявляемым к месту посадки КА «Луна-25», удалось обнаружить только вблизи параллели 70° ю.ш.

Южная полярная область Луны характеризуется пересеченным рельефом. Последний вместе с небольшим наклоном оси вращения Луны к плоскости эклиптики, равным 1.54° , формируют экстремальные условия освещенности поверхности в окрестности Южного полюса. Большая часть территорий получает солнечный свет менее 50% времени, при этом они могут соседствовать с территориями, освещенными Солнцем значительно более 50% (в редких случаях – до 80%) времени лунных суток.

Для выбора в южной полярной области Луны районов-кандидатов для места посадки был применен метод, ранее разработанный для КА «Луна-25» (см. отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.), который предполагает разделение научных и инженерных критериев и различный подход к их дальнейшему анализу: научные критерии носят рекомендательный характер при выборе благоприятных территорий для посадки, в то время как инженерные критерии соответствуют жестким ограничениям.

В качестве предварительных инженерных ограничений, накладываемых на выбор места посадки, были выбраны следующие параметры. Уклон поверхности, обеспечивающий полностью безопасную посадку, принят равным 7° на базе, сравнимой с размерами космического аппарата. Невозможность опрокидывания аппарата обеспечивает такой уклон поверхности, который не может превышать 15° . Требование к продолжительности средней освещенности поверхности было определено в значениях $>35\%$. Критерий пригодности района для посадки с точки зрения видимости Земли был определен равным значению $>50\%$.

Среди всех приполярных участков поверхности, которые удовлетворяют инженерным требованиям безопасной посадки и обеспечения работы аппарата на поверхности, прежде всего следует выбрать именно те, для которых наблюдается высокое ожидаемое количество водяного льда в реголите. Таким образом, в качестве научного критерия для выбора благоприятных районов посадки были предложены значения водного эквивалента водорода (ВЭВ), построенные на основе анализа данных нейтронных измерений с российским прибором ЛЕНД. Другим научным критерием выбора мест посадки стали данные карт температур поверхности, доступные благодаря измерениям с инструментом Diviner на борту КА ЛРО.

На основе данных прибора ЛЕНД была построена карта эквивалентного содержания воды (ВЭВ) в подповерхностном слое лунного грунта для видимой стороны южного полярного региона Луны, а с использованием цифровых моделей рельефа по данным лазерного альтиметра LOLA, установленного на его борту КА ЛРА, для вышеупомянутого

региона были построены карты уклонов поверхности, средней освещенности Солнцем поверхности, средней видимости Земли.

С использованием указанных карт и анализа имеющихся данных о поверхности видимой стороны южного полярного региона Луны на основе перечисленных выше инженерных и научных критериев было предложено области для выбора места посадки КА «Луна-27». В связи с тем, что в настоящий момент еще не определены окончательно параметры его системы посадки, нами рассмотрены три случая, когда возможные отклонения относительно намеченной точки посадки соответствуют разбросу в 5, 3 и 0.5 км.

Анализ поверхности для сектора посадки с уровнем пригодности эллипса выше 50% дал шесть и пятнадцать районов-кандидатов при точности посадки соответственно в 5 км (см. рисунок 2.1) и 3 км (см. рисунок 2.2).

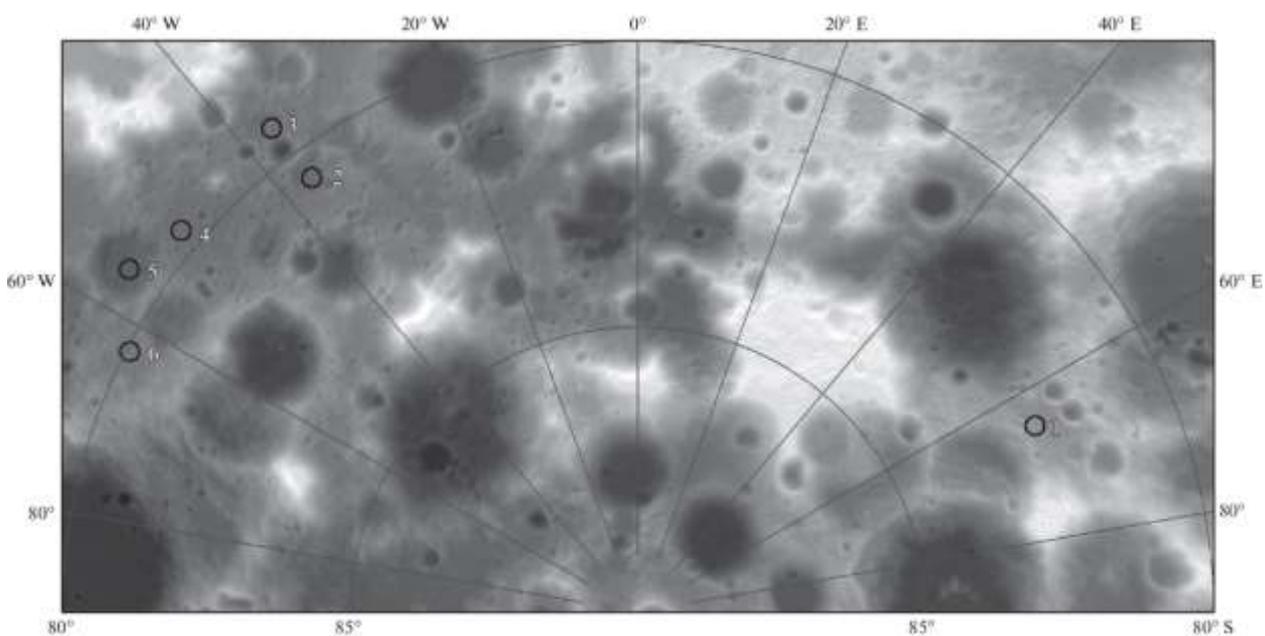


Рисунок 2.1 Районы-кандидаты в места посадки КА «Луна-27», имеющие радиус 5 км. Нумерация районов проведена в произвольном порядке

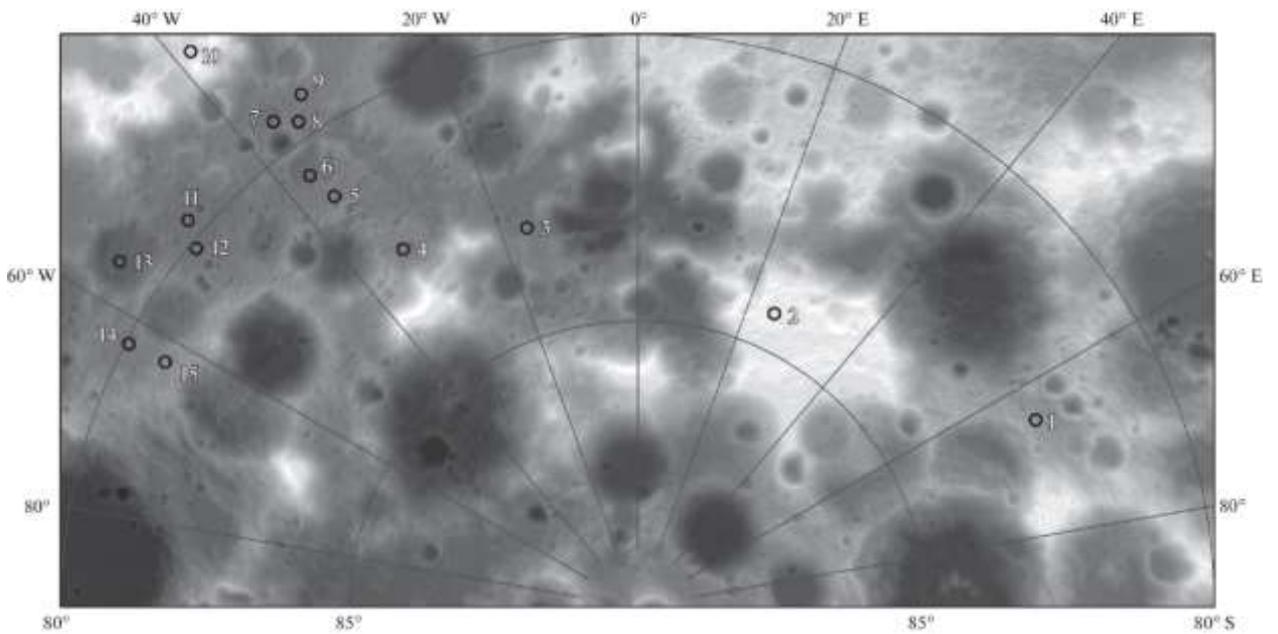


Рисунок 2.2 Районы-кандидаты в места посадки КА «Луна-27», имеющие радиус 3 км. Нумерация районов проведена в произвольном порядке

На основании приведенных выше критериев было проведено ранжирование районов-кандидатов, в соответствии с которым наиболее благоприятным для посадки среди районов с радиусом в 5 км оказался район 2, а для районов с радиусом посадки в 3 км район 6, аналогичный по расположению району 2 при точности посадки 5 км.

Отклонение от намеченной точки посадки в 0.5 км, требующее достаточно высокой точности посадки, вывело выбор районов-кандидатов на уровень отбора обширных областей, в пределах которых посадка может осуществляться на различные площадки, и при этом уровень их пригодности составляет более 85%. Таким образом, полукилометровый масштаб области разбросов относительно выбранной точки посадки обеспечивает возможность выбора конкретного места посадки из гораздо большего числа районов-кандидатов, чем число районов-кандидатов, допустимых при посадке с меньшей точностью (см. рисунок 2.3).

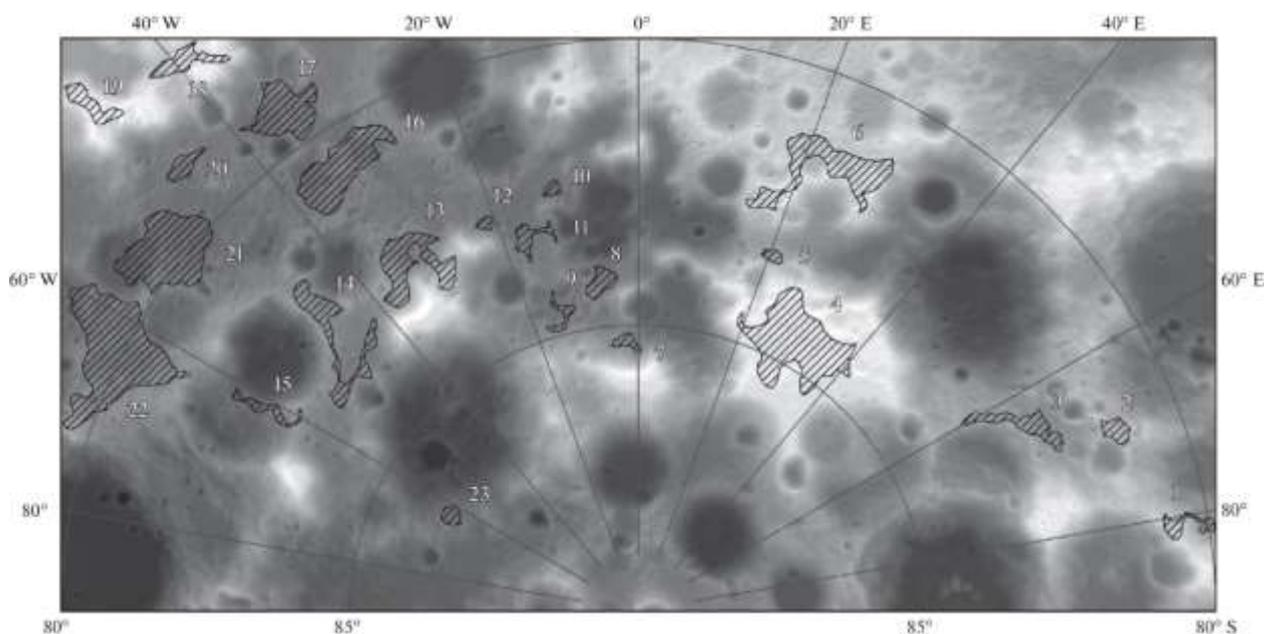


Рисунок 2.3 Области, внутри которых могут быть выбраны места посадки КА «Луна-27», имеющие радиус 0.5 км. Нумерация областей проведена в произвольном порядке

Выбор окончательного места посадки будет зависеть от итоговой точности посадки, которую смогут обеспечить бортовые системы КА и достигнутая точность его навигации. В случае наиболее высокоточной посадки представится широкий выбор из множества районов, допустимых с инженерной точки зрения, и решающим фактором при выборе станут научные критерии, такие как геологические особенности поверхности в месте посадки, температуры поверхности, предполагаемое максимальное значение ВЭВ.

Работа по выбору мест посадки для КА «Луна-27» пока находится на начальном этапе. Предполагается, что окончательный выбор кандидатов будет сделан в том числе по результатам картографирования поверхности Луны орбитальным КА «Луна-26». Опыт и результаты миссии «Луна-25» также будут приняты во внимание.

В части, касающейся миссии «Луна-25», была продолжена научно-практическая подготовка к ее проведению, начало которого запланировано на 2023 год, прежде всего, в части отработок научной аппаратуры проекта.

Как уже указывалось ранее (см. Отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.), ключевым элементом миссии «Луна-25» должен стать манипуляторный комплекс ЛМК.

Подробное описание указанного комплекса, проведенных с ним отработок возможных на лунной поверхности нештатных ситуаций, режима копания и забора проб мерзлого лунного реголита представлены в отчете по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 год. В настоящем отчете представляется необходимым остановиться на представленных научной

общественности в 2022 году наземных экспериментов по наведению ЛМК на различные объекты в его рабочей зоне.

ЛМК, состоящий из двухзвенного манипулятора, оснащённого ковшом и грунтозаборным устройством, в той или иной степени в своей работе на лунной поверхности взаимодействует с еще тремя приборами научной аппаратуры космического аппарата «Луна-25»: СТС-Л, ЛИС-ТВ-РПМ, ЛАЗМА-ЛР. В этой работе важно иметь возможность выбирать наиболее интересные участки лунного грунта в окрестности посадочного аппарата, а в те из них, которые лежат в пределах рабочей зоны ЛМК, уметь наводить манипулятор, забирать там с разной глубины пробы грунта и затем быстро и безопасно доставлять их в аналитический прибор ЛАЗМА-ЛР.

В верхней части посадочного модуля КА «Луна-25» установлена служебная телевизионная система (СТС-Л), часть камер которой отвечает за панорамную съёмку, а часть (стереокамера) — за выход манипулятора в заданную точку копания/забора проб грунта и за прецизионное наведение в лазерный ионизационный масс-спектрометр (ЛАЗМА-ЛР), в которой ЛМК должен доставить образцы лунного грунта.

Сам выбор точки копания и забора грунта предполагается осуществлять с использованием фотографий, полученных с камер СТС-Л. На полученных снимках по различным критериям (научная привлекательность, возможность доступа ЛМК, рельеф, наличие камней, освещённость, потенциальная загрязнённость отработанным топливом и т.п.) будет определяться список мест, которые пригодны для забора проб грунта. Чтобы обеспечить наведение и попадание ЛМК в заданную точку, необходимо перевести систему координат СТС-Л в систему координат ЛМК и получить в системе ЛМК координаты выбранной точки: азимут, радиус и высота. Для обеспечения этого были проведены специальные наземные отработки, где ЛМК задавались 36 точек (положений). В каждом положении СТС производил съёмку ЛМК и объединял все полученные данные. После чего была аналитически создана и затем экспериментальным образом проверена матрица перехода системы координат СТС-Л в систему координат ЛМК. В ходе проверки использовались монеты номиналом в десять рублей, которые случайным образом располагались на поверхности рабочей зоны ЛМК (см. рисунок 2.4).

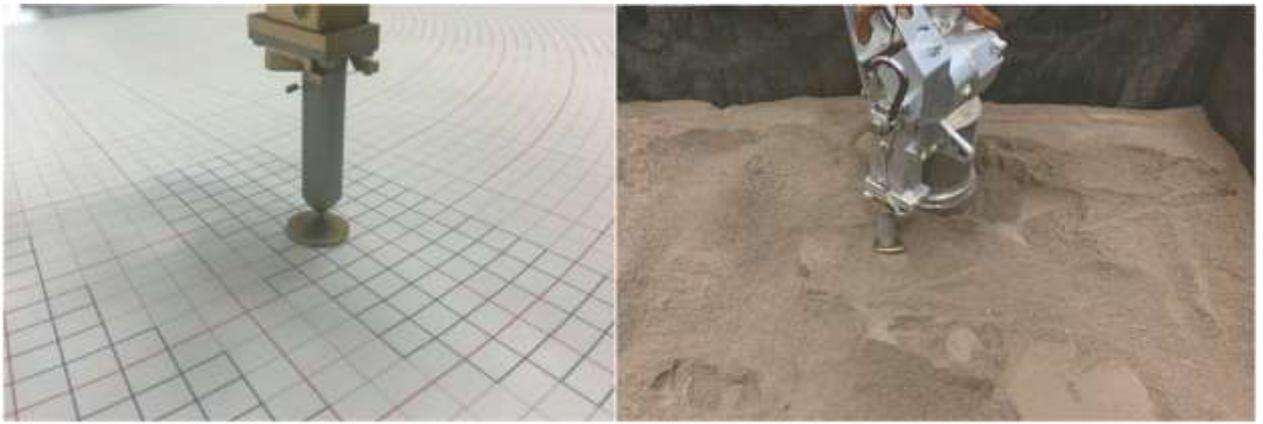


Рисунок 2.4 Результат наведения ЛМК с помощью СТС-Л

В ходе проведенных отработок было экспериментально показано, что грунтозаборник ЛМК наводится на монету с погрешностью в 3–5 мм, т. е. всегда попадает в неё. Такая точность наведения отвечает выполнению поставленных научных задач.

Забранные с поверхности Луны образцы грунта ЛМК, как уже указывалось выше, будет необходимо доставить в аналитический прибор ЛАЗМА-ЛР (см. рисунок 2.5). Приемное окно последнего невелико, что требует от ЛМК особой точности действий по доставке, при этом так же необходимо избегать столкновения ЛМК как с самим прибором ЛАЗМА-ЛР, так и с другими элементами конструкции и приборами КА.

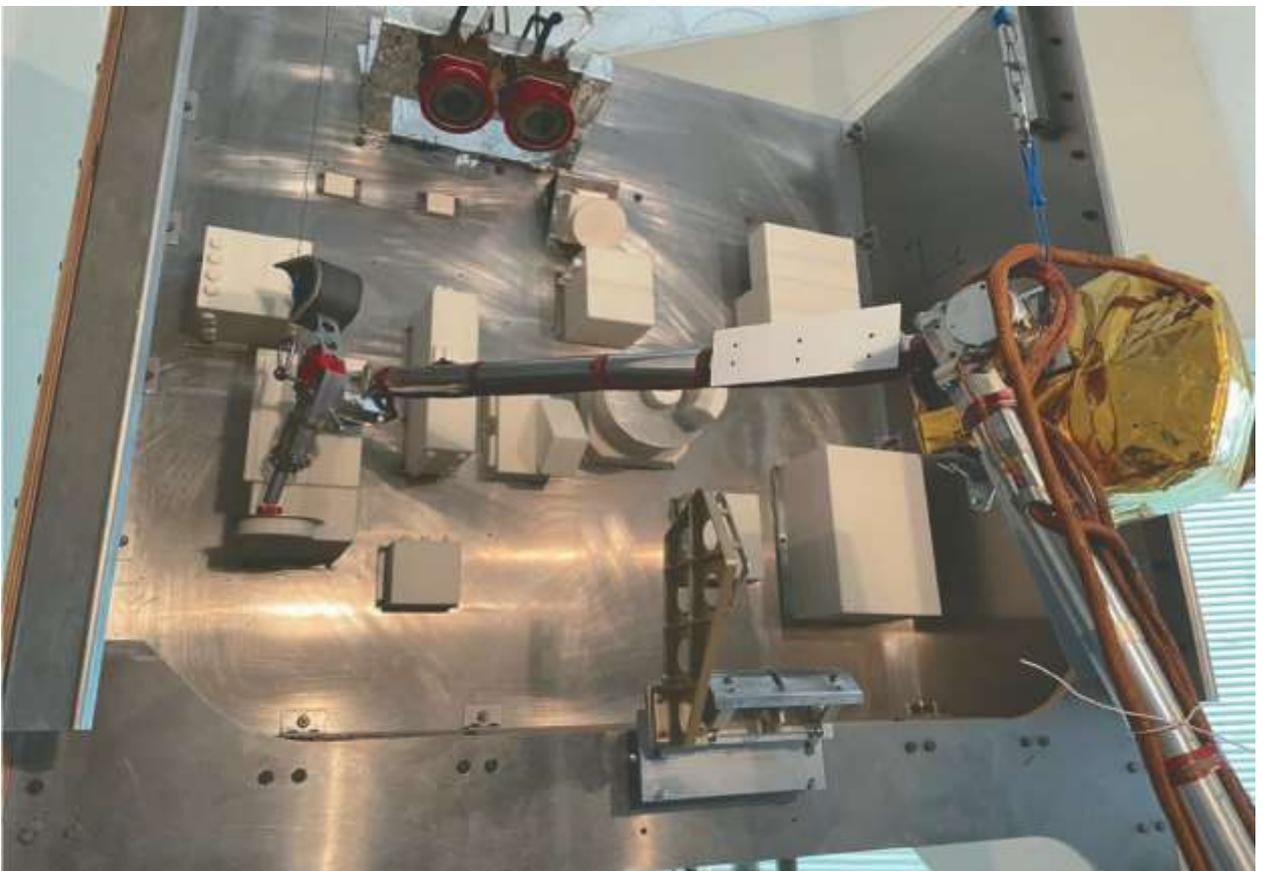


Рисунок 2.5 Доставка и высыпание ЛМК пробы грунта в приёмное окно ЛАЗМА-ЛР

Для этого были созданы и экспериментально отработаны безопасные траектории доставки ЛМК образцов грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР, а также отработан порядок внесения изменений в эти траектории из-за возможных механических и тепловых деформаций КА на поверхности Луны. Все отработки были завершены успешно.

На ЛМК установлены лунный инфракрасный спектрометр и телевизионная камера рабочего поля манипулятора прибора ЛИС-ТВ-РПМ, которые могут наводиться ЛМК на различные объекты (камни, обломки породы, грунт на дне вырытой траншеи, выкопанный лунный грунт и т. д.) на поверхности Луны. Для подобных исследований требуется достаточно точно наводить ЛИС как в рабочей зоне ЛМК, так и за её пределами. Для этого необходимо было определить расположение луча зрения ЛИС в системе координат ЛИС-ТВ-РПМ и связать эту подвижную систему координат со статичными системами координат ЛМК и СТС-Л. Для привязки систем координат ЛИС-ТВ-РПМ была проведена съёмка специального тестового объекта камерами ТВ-РПМ в пяти разных положениях манипулятора и стереокамеры СТС-Л. После обработки полученных кадров были установлены координаты выбранных точек тестового объекта в системах координат СТС-Л и ТВ-РПМ в нескольких положениях ЛМК, после чего были построены матрицы перехода из одной СК в другую для отдельных положений манипулятора. На их базе была создана программа, вычисляющая матрицы перехода для любого положения манипулятора. После этого с использованием взаимных калибровок СТС-Л и ЛМК были связаны системы координат ЛИС-ТВ-РПМ и ЛМК. Для верификации созданного программного обеспечения было проведено контрольное наведение ЛИС на источник света. Для этого источник света, поставленный в случайную точку в поле зрения стереокамер СТС-Л и ТВ-РПМ, был снят камерами, и по их снимкам независимо были определены углы, на которые необходимо повернуть моторы манипулятора так, чтобы источник попал в поле зрения ЛИС. После этого манипулятор был передвинут на указанные углы, и показано, что ЛИС успешно получил спектр источника света в поле зрения.

В 2022 году были продолжены научно-исследовательские работы в части анализа результатов испытаний ЛМК на криовакуумном стенде, где имитировалась работа ЛМК по копанью в лунных условиях (давление, криогенные температуры, аналог лунного грунта). Одной из задач была оценка потенциальной прочности лунного реголита, так как известно, что прочность грунта может существенно возрастать при криогенных температурах с добавлением водяного льда.

Проведенная работа показала, что прочность лунного грунта, замороженного до криогенных температур (-100°C) возрастает в 5 раз, если в сухой грунт добавить даже небольшое содержание водяного льда, и достигает порядка 3 МПа для грунта, содержащего

1-1.5% водяного льда по массовой доле. Это существенно меньше доступного объема пор в лунном грунте и объясняется тем, что лед образует многомолекулярные слои на поверхности лунных частиц, цементируя их.

По результатам всех наземных отработок как в нормальных условиях, так и в условиях, приближённых к лунным, была разработана методика управления ЛМК для всех основных операций на поверхности Луны.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.5, 2.1, 2.4, 3.3) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.1, 5.42).

3. Изучение элементного состава вещества Марса и его спутников, оценка содержания в их грунте воды, исследование сезонных вариаций атмосферы, выяснение условий обеспечения ресурсами марсианских пилотируемых экспедиций

Руководитель Раздела д.ф.-м.н. М.Л. Литвак

В 2022 году была продолжена работа по изучению Марса с помощью отечественных приборов ФРЕНД на борту космического орбитального аппарата ЕКА «ТГО», ХЕНД на борту космического орбитального аппарата НАСА «Марс Одиссей» и ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити».

Для последнего продолжена работа по оценке содержания распределения водного эквивалента водорода ВЭВ и эквивалентного хлора (ЭХ), который учитывает содержание всех нейтронных поглотителей в веществе марсианской поверхности с применением ранее описанных (см. отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.) метода пиксельного представления данных и метода на основе пассивных измерений с использованием результатов активных измерений прибора ДАН. Как ранее указывалось (см. отчеты по теме ОСВОЕНИЕ за 2018-2021 гг.) прибор ДАН является детектором тепловых и эпитепловых нейтронов, работающим на борту марсохода НАСА «Кьюриосити» (см. рисунок 3.1).

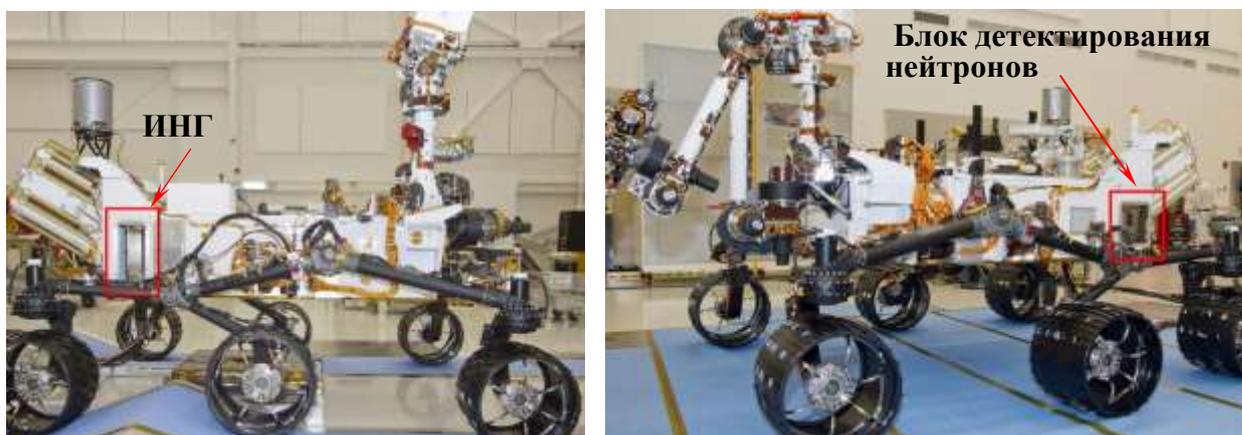


Рисунок 3.1 Марсоход «Кьюриосити» с прибором ДАН

Физическая идея прибора ДАН основана на применении методики нейтрон-активационного анализа для изучения свойств марсианского грунта на основе его облучения короткими импульсами нейтронов высоких энергий (активные измерения). Для этого прибор имеет в составе импульсный нейтронный генератор (ИНГ), который облучает поверхность короткими импульсами нейтронов с энергией 14 МэВ, и наполненные ^3He пропорциональные счетчики, замедлившихся в веществе эпитепловых и тепловых нейтронов, которые называются соответственно Counter of Epithermal Neutron (CETN) и

Counter of Total Neutron (CTN). ДАН - первый нейтронный спектрометр, доставленный на поверхность Марса. Он начал свою работу сразу после успешной посадки марсохода «Кьюриосити» в августе 2012 года и продолжает работать до настоящего времени. За период измерений ДАН с 9 августа 2012 г. по 21 декабря 2021 г. общий путь, пройденный «Кьюриосити», составляет 27 150 м; всего на этом пути было проведено 1002 активных измерения.

В 2022 году с использованием метода пиксельного представления данных прибора ДАН, полученных в пассивном режиме измерений за указанный выше период, или иначе с момента посадки по 3333 сол нахождения «Кьюриосити» на поверхности Марса, построена карта содержания воды (общей совокупностью в 10 061 пиксель; пример части карты смотри на рисунке 3.2) и составлена таблица содержания воды и хлора в приповерхностном слое марсианского грунта. Результаты активных и пассивных измерений ДАН вдоль траверса марсохода присваиваются двум независимым типам пикселей: пикселям с активными данными (ПАД) и пикселям пассивных данных (ППД). Содержание воды указывается как ВЭВ для обоих типов пикселей. Содержание ЭХ указано только для ПАД. Статистические погрешности приведены в каждом пикселе. Полностью карта размером 651,8 МБ и таблица размером 629,4 КБ доступны в сети ИНТЕРНЕТ по адресу <https://zenodo.org/record/6974535#.Y59DbX1Bypo>.

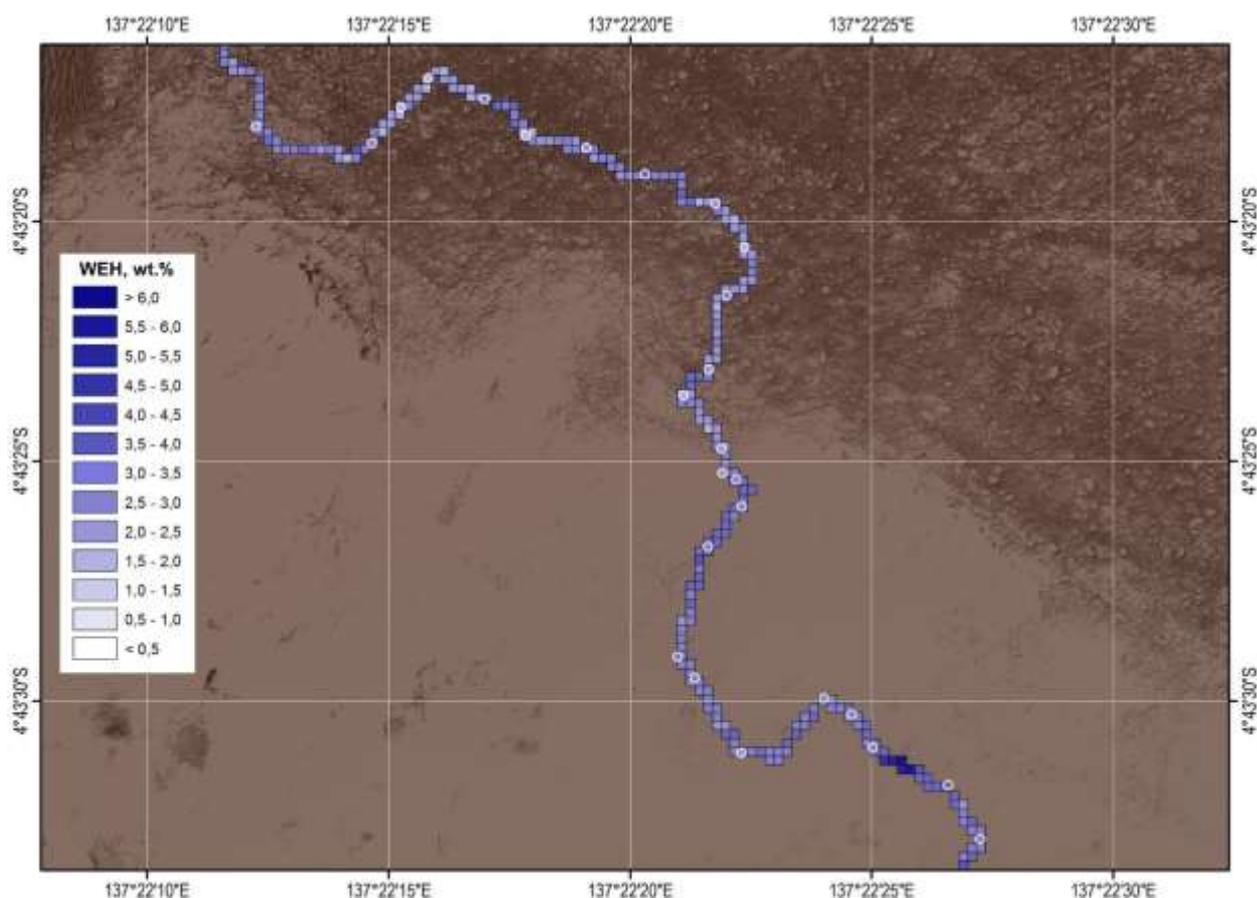


Рисунок 3.2 Оценки ВЭВ, показанные для последовательности из 243 пикселей ППД (квадраты) и 27 пикселей ПАД (круги) вдоль траверса движения марсохода «Кюросити» в период с 1781 по 1848 сол

В 2022 году с применением метода оценки содержания ВЭВ на основе пассивных измерений с использованием результатов активных измерений прибора ДАН были обработаны данные за период с 9 августа 2012 г. по 2 ноября 2018 г. За этот период марсоход НАСА «Кюросити» прошел около 20 км.

Профили нейтронного излучения поверхности в пассивном режиме прибора ДАН измеряются непрерывно с временным разрешением 20 с как на стоянках марсохода, так и во время его движения. Учитывая данные о текущих координатах марсохода, на основе временных профилей отсчетов нейтронов были построены профили пространственной переменности потока тепловых и эпитепловых нейтронов вдоль всей трассы движения марсохода за указанный период.

По данным пассивных измерений построен профиль пространственной переменности нейтронного потока поверхности с пространственным разрешением 3 м, который выражен как параметр F_{DAN} . Этот параметр представляет собой отношение темпов счёта детектора CTN к детектору эпитепловых нейтронов CETN. Величина F_{DAN} зависит

как от величины массовой доли ВЭВ в грунте Марса, которая определяет эффективность замедления нейтронов и тем самым влияет на соотношение потоков тепловых и эпитепловых нейтронов, так и от вариаций массовой доли хлора, которая определяет степень ослабления потока тепловых нейтронов вследствие их поглощения. Примеры профилей пространственной переменности параметра F_{DAN} с пространственным разрешением 3 м для различных участков трассы представлены на рисунке 3.3.

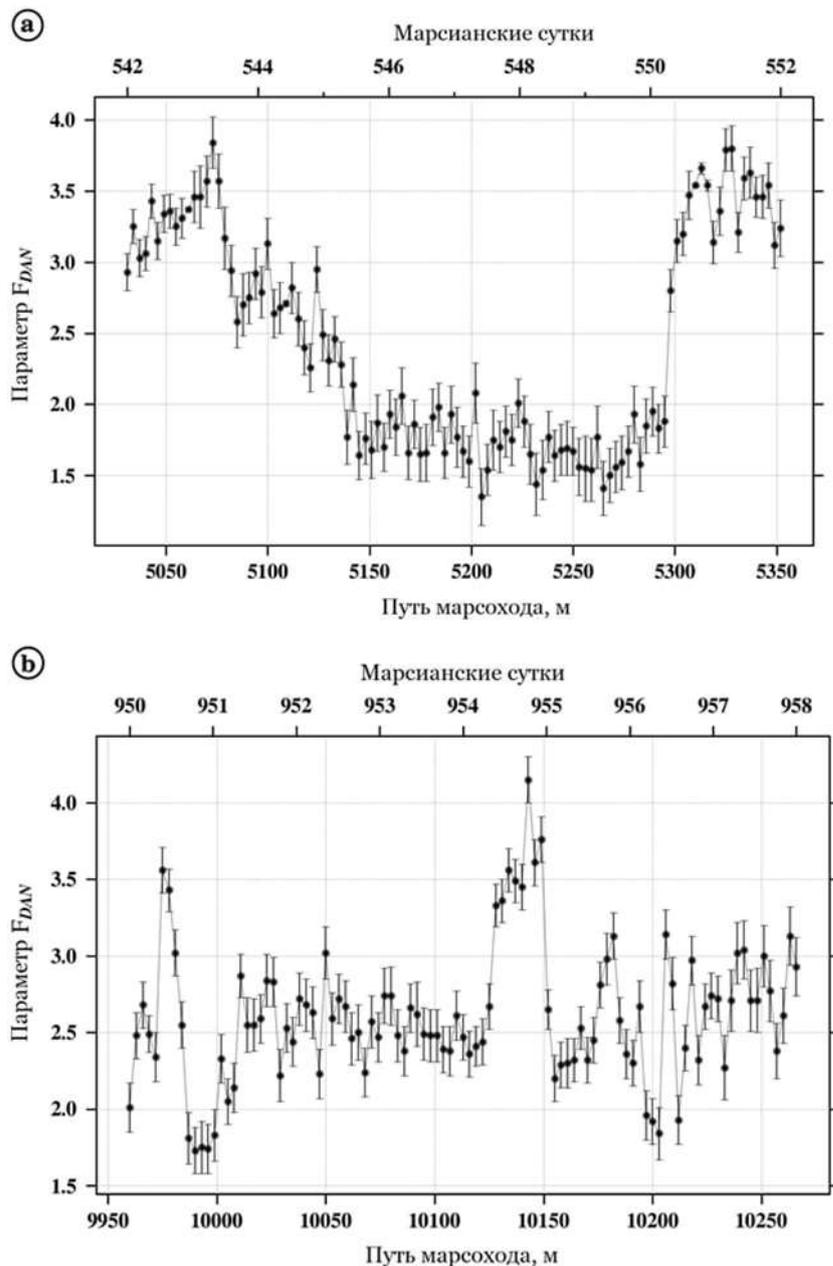


Рисунок 3.3 Примеры профилей вариаций F_{DAN} с пространственным разрешением 3 м для нескольких интервалов пути марсохода: а — 5020–5330 м (542–548 сол); б — 9960–10270 м (951–957 сол)

Результаты обработки пассивных измерений ДАН, выполненные как во время движения, так и на стоянках, представлены на рисунке 3.4, также на этом распределении приведены результаты активных измерений, выполненные в местах стоянок.

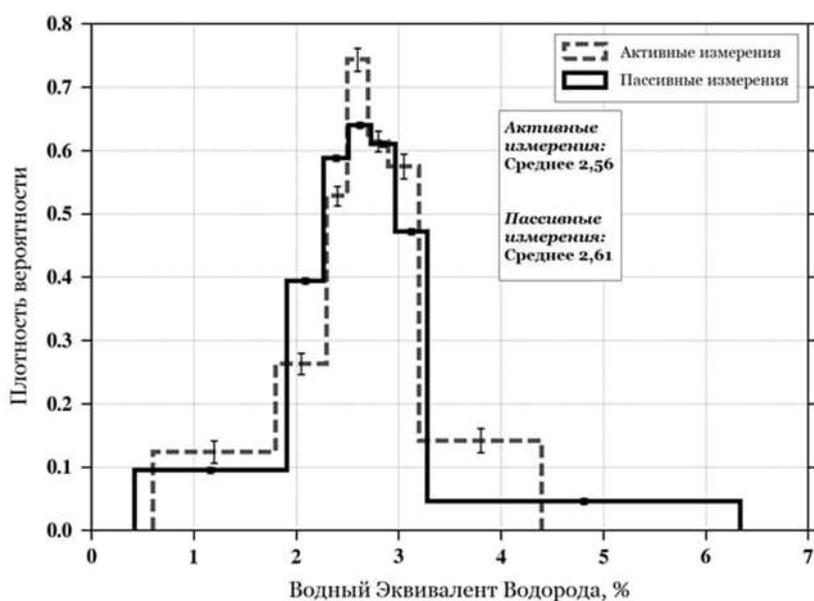


Рисунок 3.4 Распределение содержания ВЭВ на основе активных измерений в местах стоянок марсохода и пассивных измерений за период с 9 августа 2012 г. по 2 ноября 2018 г. Все области распространения нормированы на единицу

Видно, что эти распределения с хорошей степенью достоверности согласуются друг с другом; их средние значения и дисперсия совпадают с достаточно высокой точностью. Из анализа данных следует, что среднее значение оценки ВЭВ по пассивным измерениям соответствует $2,6 \pm 0,7$ %, оценка ВЭВ по результатам активных измерений соответствует $2,5 \pm 0,3$ %.

Перспективным так же представляется изучение содержания воды и хлора в грунте Марса, полученное по результатам измерений ДАН, отдельно для геологических регионов вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити». Такие исследования также проводились в 2022 году.

Траектория движения марсохода пересекает геологические регионы, которые были идентифицированы его научной командой на основе данных, полученных как «Кьюриосити», так и орбитальными космическими аппаратами. Основным способом организации наблюдаемой геологии (в первую очередь литологии) научной команды марсохода было создание стратиграфической колонки. Стратиграфическая колонка, в которой регистрируются различные литологии поверхности по высоте, разделена на неформальные группы, формации и элементы. Каждое измерение ДАН было привязано к

определённому элементу стратиграфической колонки. Ассоциация измерений ДАН с элементами стратиграфической колонки предназначена для поиска корреляции с наблюдаемыми характеристиками поверхности.

Максимальное значение ВЭВ, равное $6,1 \pm 0,7$ мас.% наблюдается в пассивных данных, в элементе Sutton Island формации Мюррей. Это намного больше, чем максимальное значение ВЭВ по активным данным, $4,83 \pm 0,27$ мас.%, которое наблюдается в районе Knockfarrill Hill, расположенном внутри геологической формации Carolyn Shoemaker. Содержание эквивалентного хлора, колеблется от почти нулевого до максимального значения $2,56 \pm 0,21$ мас.%, наблюдаемого в группе Брэдбери. Таким образом, данные измерений ДАН варьируются в зависимости от локальных геологических характеристик поверхности (см. рисунки 3.5, 3.6).

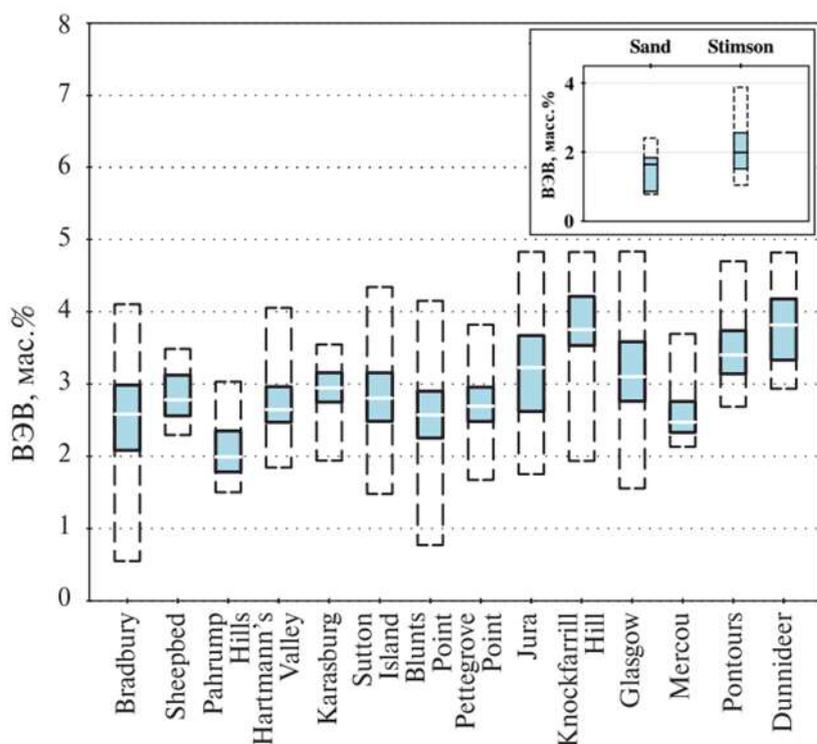


Рисунок 3.5 Распределение ВЭВ по данным активных измерений ДАН в геологических элементах поверхности, соответствующих стратиграфической колонке. Боксы, заполненные голубым цветом, соответствуют данным от первого до третьего квартиля, толстая линия внутри них — медиана. Незаполненные боксы соответствуют всему диапазону данных от минимального до максимальных значений

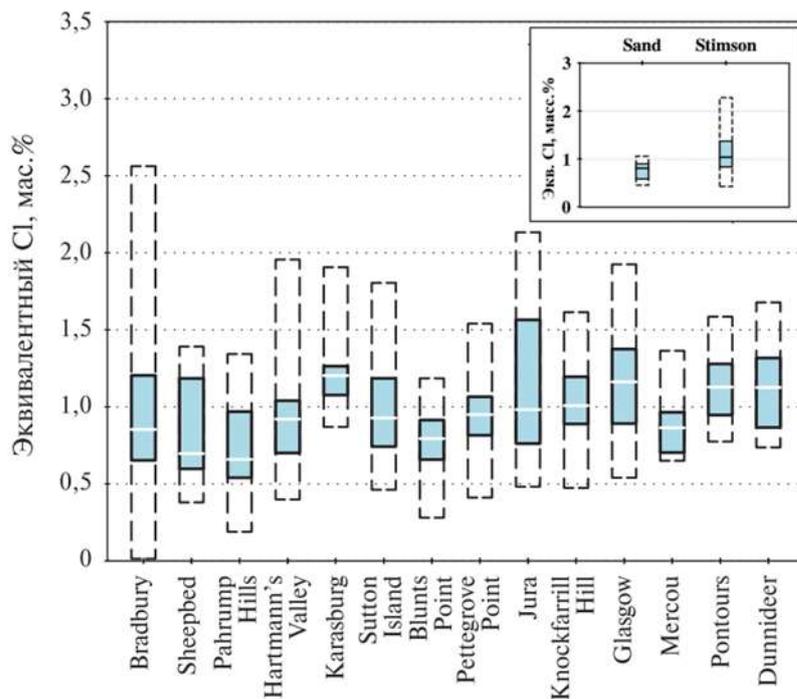


Рисунок 3.6 Распределение эквивалентного хлора по данным активных измерений ДАН в геологических элементах поверхности, соответствующих стратиграфической колонке. Боксы, заполненные голубым цветом, соответствуют данным от первого до третьего квартиля, толстая линия внутри них — медиана. Незаполненные боксы соответствуют всему диапазону данных от минимального до максимального значений

Предполагается, что измеренные вариации ВЭВ и ЭХ связаны с различными процессами отложения и диагенеза в отдельных связанных геологических элементах стратиграфической колонки. Данное предположение подлежит проверке в ходе последующих исследований, и дальнейшего накопления и обработки экспериментальных данных.

Что касается приборов, работающих не на поверхности, а на орбите Марса, то в 2022 году научной общественности были представлены результаты численного расчёта, позволяющие учесть несовершенство поглощающих свойств нейтронного коллиматора и определить вклад в полезный сигнал от нейтронов, прошедших через стенку коллиматора.

Пространственное разрешение нейтронного спектрометра на орбите Марса определяется не только параметрами детекторов, наличием или отсутствием дополнительных модулей для улучшения разрешения, высотой орбиты КА, но и наличием у Марса атмосферы, которая рассеивает часть нейтронов, вылетающих с марсианской поверхности. Одним из способов повышения пространственного разрешения орбитальных

детекторов нейтронов является метод пассивной коллимации с использованием материалов, поглощающих нейтроны.

В целом, нейтронное картирование марсианской поверхности с орбиты является эффективным экспериментальным методом изучения глобального распределения грунтовых вод в приповерхностном слое грунта. Однако пространственное разрешение такого картирования должно быть повышено, чтобы связать данные нейтронного картирования с выделенными локальными особенностями рельефа, имеющими линейный масштаб в сотни километров. Это необходимо для установления геофизической связи между процессами формирования поверхности Марса и гидрологической эволюцией планеты.

Расчеты были сделаны применительно к российскому прибору ФРЕНД, работающему на борту орбитального космического аппарата российско-европейского проекта «ЭкзоМарс» «ТГО».

Нейтронный телескоп ФРЕНД предназначен для измерения потока надтепловых нейтронов с поверхности Марса. Измеренные вариации потока нейтронов можно использовать для определения содержания водорода в почве, обычно интерпретируемого как вода/водяной лед. Прибор содержит четыре пропорциональных счетчика эпитепловых нейтронов ^3He (модуль DSEN) и сцинтилляционный детектор быстрых нейтронов, которые окружены коллимационным модулем. Состав стенок коллиматора призван обеспечить наибольшее поглощение нейтронов, приходящих с тыльных направлений вокруг оси прибора. Положения счетчиков и детектора, а также геометрия стенок коллиматора определяют размер поля зрения телескопа на поверхности Марса с заданной высоты орбиты КА.

Модуль детектирования DSEN прибора ФРЕНД был специально разработан для измерения вариаций потока надтепловых нейтронов с поверхности Марса с максимально возможным разрешением: его поле зрения имеет угол раскрытия 28° по отношению к оси прибора, что соответствует масштабу разрешения 200 км на поверхности при высоте орбиты 400 км.

Можно выделить три основных проблемы, которые необходимо решить для обеспечения высокого качества таких измерений.

Во-первых, это корректный переход от излучения надтепловых нейтронов, возникающих при бомбардировке ГКЛ, к концентрации воды в приповерхностном слое марсианского грунта. Основная трудность заключается в том, что DSEN измеряет нейтроны на высоте орбиты ТГО, и поэтому необходимо установить причинно-следственную связь между двумя физическими величинами: содержанием воды в недрах и потоком нейтронов

на орбите. Этот процесс излучения не зависит от параметров системы регистрации нейтронов, но эти знания нужны для анализа и интерпретации скоростей счета, измеренных нейтронными детекторами.

Во-вторых, детектирование нейтронов представляет собой процесс Пуассона, связанный со случайными флуктуациями накопленных отсчетов в пикселях карты эмиссии нейтронов. Действительно, для измерения реальных поверхностных вариаций эмиссии нейтронов как разрешенного сигнала необходимо уметь отличать истинные вариации отсчетов в разных пикселях от их статистических флуктуаций, известных как случайный фон.

В-третьих, необходимо определить реальное количество воды в локальных водонасыщенных районах, обнаруженных на поверхности Марса. Ограниченная масса DSEN не позволила построить прибор с идеальной коллимацией нейтронов, при которой не детектировались бы частицы, пришедшие извне поля зрения. Стенка коллиматора имеет остаточную прозрачность для нейтронов, поступающих из-за пределов поля зрения. Подсчеты этих нейтронов создают неколлимированный фон для коллимированного сигнала, который соответствует отсчетам нейтронов, попадающих внутрь поля зрения. Соотношение между сигналом и фоном нельзя рассматривать как собственный параметр прибора, поскольку оно зависит от углового и энергетического распределения нейтронного потока на высоте орбиты. Однако прибор можно охарактеризовать индивидуальной функцией его чувствительности, которая описывает вероятность регистрации нейтрона с определенной энергией и определенным направлением прихода в прибор. Необходимо правильно оценивать процесс неколлимированного темп счета в детекторе нейтронов в DSEN, чтобы исключить фоновую составляющую из общего количества зарегистрированных отсчетов.

Примененный метод численного моделирования приведенных выше процессов позволяет решить указанные проблемы, причем для решения третьей задачи была предложена специальная итерационная процедура восстановления данных для определения коллимированного сигнала, связанного с истинным значением ВЭВ в обнаруженном локальном водонасыщенном районе. Численное моделирование подтверждает, что такая процедура работает хорошо, и неидеальные коллимационные возможности DSEN могут быть должным образом учтены в исследованиях с применением полученных прибором ФРЕНД данных по методу, использующему разработанную процедуру. Так для иллюстрации применения описанного выше метода для оценки содержания воды в марсианском грунте была взята карта скорости счета надтепловых нейтронов, накопленная прибором ФРЕНД с мая 2018 г. по октябрь 2021 г., что составляет около 1290 сол. Исходная

карта и карта, полученная в результате итерационного процесса восстановления, обрабатывались по специально разработанному алгоритму поиска значимых областей подавления потока надтепловых нейтронов. Значимое подавление потока может указывать на то, что грунт соответствующего региона может быть более увлажнен по сравнению с окружающей эталонной территорией и, значит, регион может быть идентифицирован, как локальный водонасыщенный район (WRA). Было обнаружено несколько WRA. Три из них показаны в таблице 3.1 для иллюстрации итеративного метода.

Таблица 3.1 Свойства эталонных областей и выбранных WRA

Name of area	Number of pixels	Area, km ²	Atmosphere column density, kg/m ²	No iterations			With iterations		
				Suppression ξ	WEH	Significance of deviation from reference area	Suppression ξ	WEH	Significance of deviation from reference area
<i>Medusae Fossae</i>									
Reference	120	373404	170.83	0.58 ± 0.03	9.00 ^{+0.93} _{-0.81}		0.49 ± 0.04	8.22 ^{+1.22} _{-0.98}	
Tested	22	67881	172.31	0.34 ± 0.06	24.74 ^{+11.66} _{-5.84}	3.38	0.13 ± 0.10	53.70 ^{+46.30} _{-29.44}	3.26
<i>Zephyria Planum</i>									
Reference	144	412127	165.13	0.67 ± 0.03	6.75 ^{+0.57} _{-0.51}		0.59 ± 0.04	6.24 ^{+0.76} _{-0.61}	
Tested	34	97077	162.32	0.35 ± 0.05	23.55 ^{+8.49} _{-5.52}	5.33	0.13 ± 0.10	53.70 ^{+46.30} _{-26.48}	4.90
<i>Valles Marineris</i>									
Reference	150	452348	129.69	1.02 ± 0.03	2.67 ^{+0.17} _{-0.16}		1.04 ± 0.04	2.51 ^{+0.21} _{-0.19}	
Tested	21	66460	190.36	0.53 ± 0.07	10.75 ^{+3.33} _{-2.31}	6.61	0.31 ± 0.11	15.67 ^{+13.51} _{-5.55}	6.30

Для каждого приведенного в таблице 3.1 WRA показаны свойства эталонной области и района WRA. Для каждого из них количество пикселей, общая площадь, средняя плотность столба атмосферы, а также подавление ξ потока надтепловых нейтронов, ВЭВ и статистическая значимость разницы оценок ВЭВ для WRA и для эталонной области, рассчитанные по исходной карте (без применения итерационного процесса) и карте, полученной в результате итерационного процесса. Чтобы оценить подавление ξ как для WRA, так и для эталонной области, использовалась область Solis Planum, как область с известной небольшой гидратацией грунта.

Таким образом, подавление ξ определяется как отношение скорости счета надтепловых нейтронов, измеренной FRENД над районом WRA или эталонной области, к скорости счета надтепловых нейтронов, измеренному над сухой областью Solis Planum с низким ВЭВ = 2,78 мас.%, полученным из карты ВЭВ, предоставленной комплексом научной аппаратуры GRS, содержащего нейтронные и гамма-спектрометр и работающего на борту КА «Марс Одиссей». Как видно из таблицы 3.1, применение итерационного процесса снижает наблюдаемые численные значения среднего подавления ξ , что соответствует увеличению среднего ВЭВ в WRA.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.7, 1.8, 2.3, 2.5, 3.1, 3.2) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.39, 5.40, 5.41).

4 Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы

Руководитель Раздела к.ф.-м.н. А.С. Козырев

В 2022 году в ходе перелета к Меркурию продолжилась работа прибора МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) миссии ЕКА «БепиКоломбо». Эта миссия включает два аппарата: европейский МРО (Mercury Planetary Orbiter, основная цель — изучение самого Меркурия) и японский Mio, нацеленный на исследования магнитосферы планеты. Во время перелета они объединены в один перелетный комплекс МТМ. Этот комплекс был запущен 20 октября 2018 года и должен достичь Меркурия в конце 2025 года.

МГНС на борту МРО является многофункциональной научной аппаратурой, включающей в себя гамма-спектрометр и нейтронный детектор. Назначение МГНС состоит в измерениях потока нейтронов в широком энергетическом диапазоне (от тепловых до 10 МэВ) и гамма-лучей с высоким энергетическим разрешением (около 4,5% на энергии 662 кэВ) в диапазоне энергий от 300 кэВ до 10 МэВ во время межпланетного перелета и на орбите вокруг Меркурия. В летном образце прибора использован инновационный кристалл CeBr_3 , обладающий максимально достижимым на сегодня среди сцинтилляционных кристаллов спектральным разрешением и эффективностью регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 250 кэВ – 10 МэВ.

За время полета в 2022 году «БепиКоломбо» совершил второй гравитационный маневр у Меркурия 23 июня 2022 года. Во время пролета над Меркурием работала часть научной аппаратуры «БепиКоломбо», в т.ч. и НА МГНС.

Прибор МГНС во время второго пролета над Меркурием зарегистрировал сильные потоки нейтронного и гамма-излучения с поверхности планеты, сопоставимые с данными, полученными во время первого пролета 1–2 октября 2021 г. Поскольку второй пролет проходил над другим районом Меркурия, планируется провести сравнительный анализ данных для двух пролетов, чтобы оценить величину возможной пространственной переменности нейтронного и гамма-излучения от разных участков поверхности. При этом будет учтено, что поток галактических космических лучей, который является первопричиной вторичного нейтронного и гамма-излучения Меркурия, мог измениться за время между первым и вторым пролетами. Сравнительные графики данных, полученных прибором МГНС во время первого и второго пролетов у Меркурия представлены в рисунках 4.1-4.3.

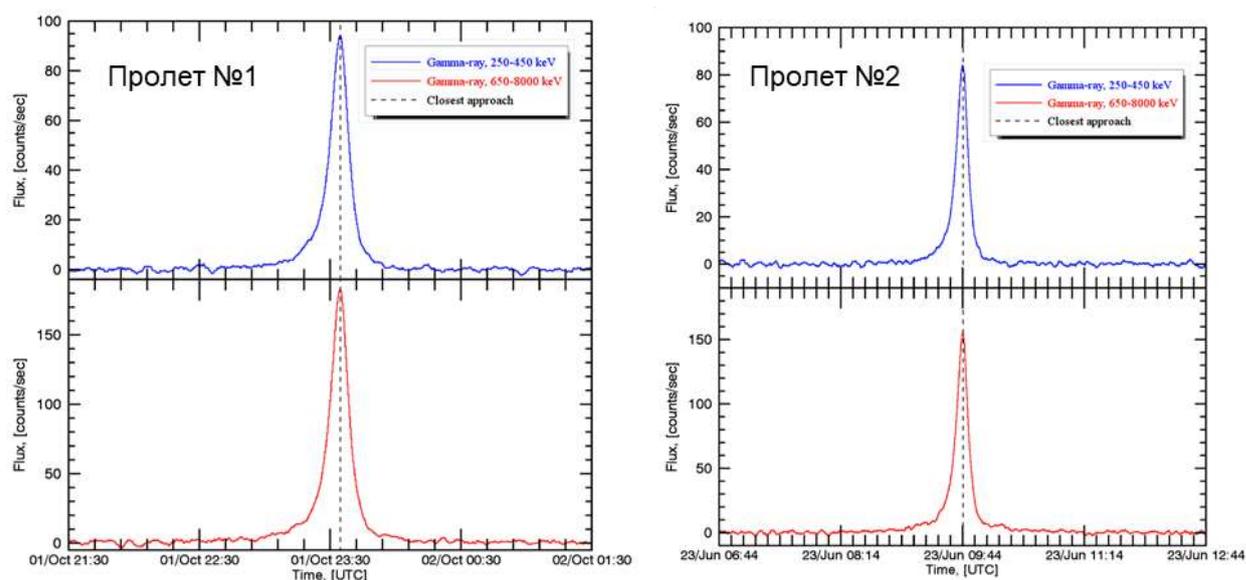


Рисунок 4.1 Потoki мягких (синий профиль) и жестких (красный профиль) гамма-лучей от поверхности Меркурия, измеренные прибором МГНС во время первого (левый график) и второго (правый график) пролетов аппарата «БепиКоломбо» над планетой

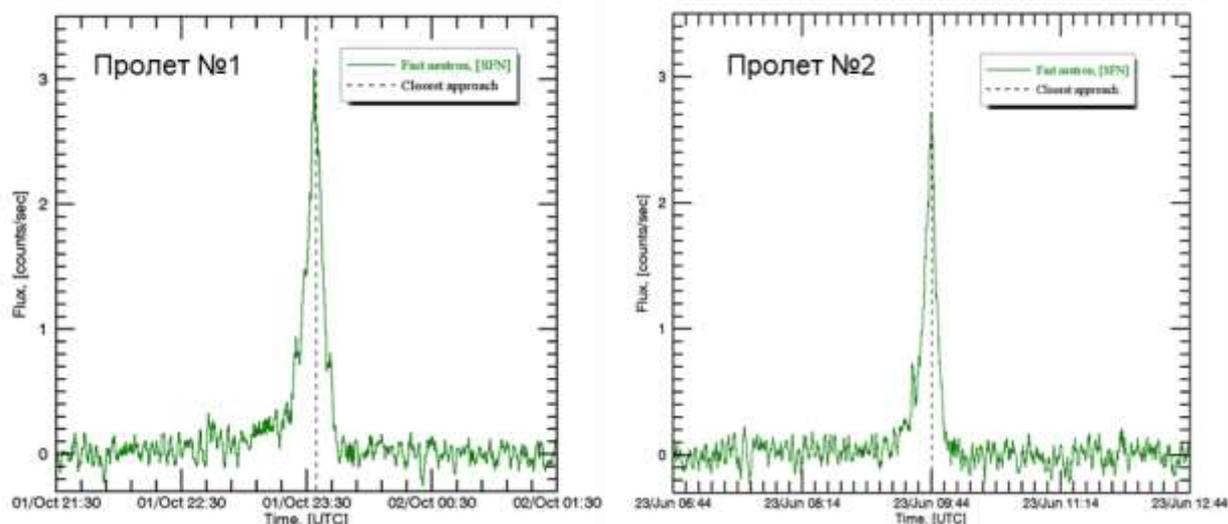


Рисунок 4.2 Потoki энергичных нейтронов от поверхности Меркурия, измеренные прибором МГНС во время первого (левый график) и второго (правый график) пролетов аппарата «БепиКоломбо» над планетой

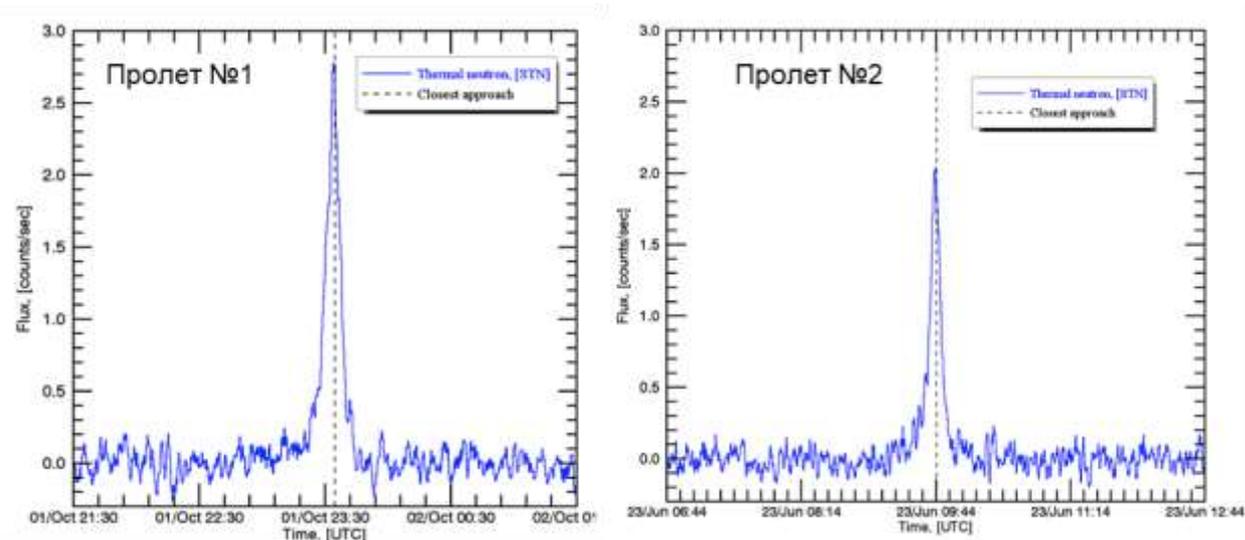


Рисунок 4.3 Потоки тепловых нейтронов от поверхности Меркурия, измеренные прибором МГНС во время первого (левый график) и второго (правый график) пролетов аппарата «БепиКоломбо» над планетой

Полученные результаты подлежат научной, в том числе и сравнительной, интерпретации в 2023 году, в том числе и с применением данных, полученных при пролетах Венеры.

Результаты работы сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.37, 5.38).

5 Разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению

Руководитель Раздела к.ф.-м.н. М.И. Мокроусов

В 2022 году были продолжены ранее начатые работы в области разработки новых образцов ядерно-космических приборов и новых детекторных сборок для перспективных космических миссий.

Описаны методы активного нейтронного и γ -каротажа, основные цели и задачи экспериментов с приборами серии АДРОН для изучения поверхности Луны и Марса, состав аппаратуры, а также описание конструкции и электроники указанных приборов.

Основными научными задачами космических экспериментов с применением прибора АДРОН является определение массового содержания воды в грунте небесных тел и входящих в него основных породообразующих элементов с борта космических аппаратов КА на поверхности небесного тела, а также оценка их распределения по глубине в приповерхностном слое с толщиной ~ 1 м. Для решения этих задач прибор должен быть установлен как можно ближе к поверхности планеты и по возможности удален от основных массивных элементов конструкции КА для снижения величины фонового излучения и увеличения точности проводимых измерений. Так, прибор АДРОН-ЛР (см. отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.) установлен на КА «Луна-25» на дополнительной научной палубе в нижней части аппарата на высоте около 30 см над лунной поверхностью, а блоки ИНГ и ДЭ прибора АДРОН-ЭМ для посадочной миссии «ЭкзоМарс-2022» расположены в нижней части посадочной платформы на высоте примерно 70 см над поверхностью Марса.

Конструктивно приборы серии АДРОН состоят из двух блоков: детекторного блока и блока импульсного нейтронного генератора. На рисунках 5.1 –5.3 приведен внешний вид детекторных блоков приборов АДРОН-ЛР, АДРОН-ЭМ и блока нейтронного генератора ИНГ-10 соответственно, где отмечены основные функциональные блоки: 1 — детекторы нейтронов тепловых и эпитепловых энергий; 2 — детектор γ -лучей на основе сцинтилляционного кристалла CeBr_3 или LaBr_3 ; 3 — быстродействующий γ -спектрометр с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) и платой делителя напряжения; 4 — плата вторичного источника питания; 5 — блок высокого напряжения; 6 — основная цифровая плата; 7 — блок нейтронного генератора.

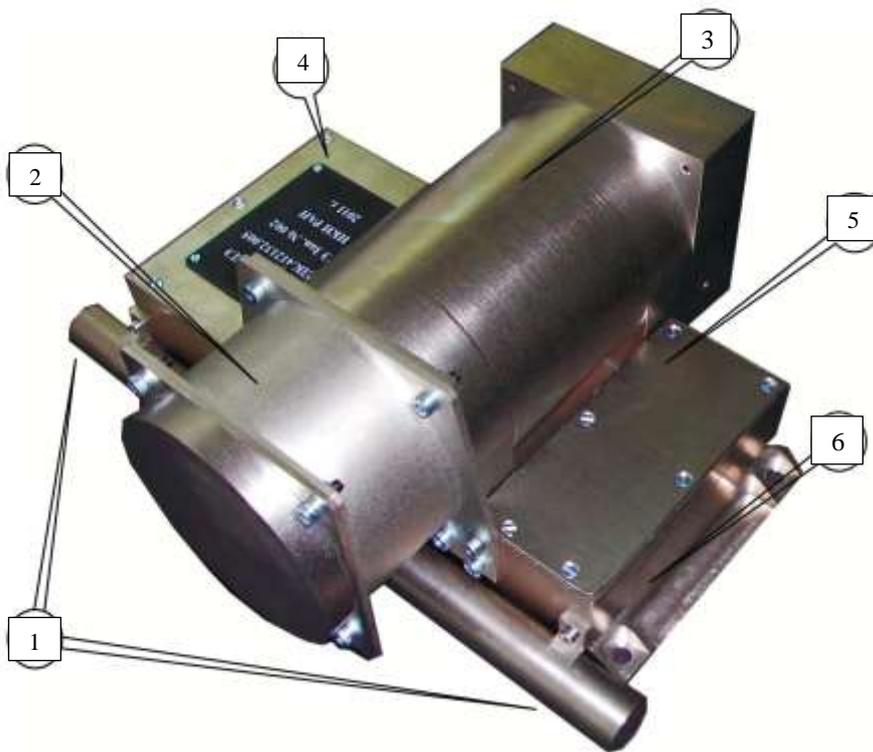


Рисунок 5.1 Внешний вид детекторного блока прибора АДРОН-ЛР и его функциональные блоки

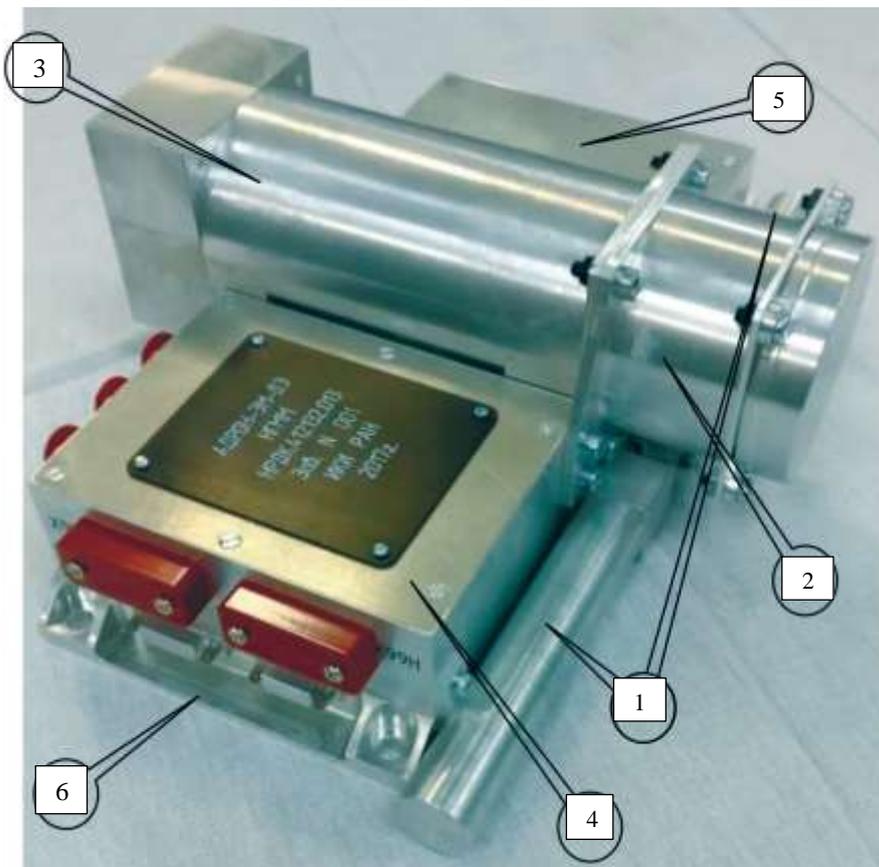


Рисунок 5.2 Внешний вид детекторного блока прибора АДРОН-ЭМ и его функциональные блоки

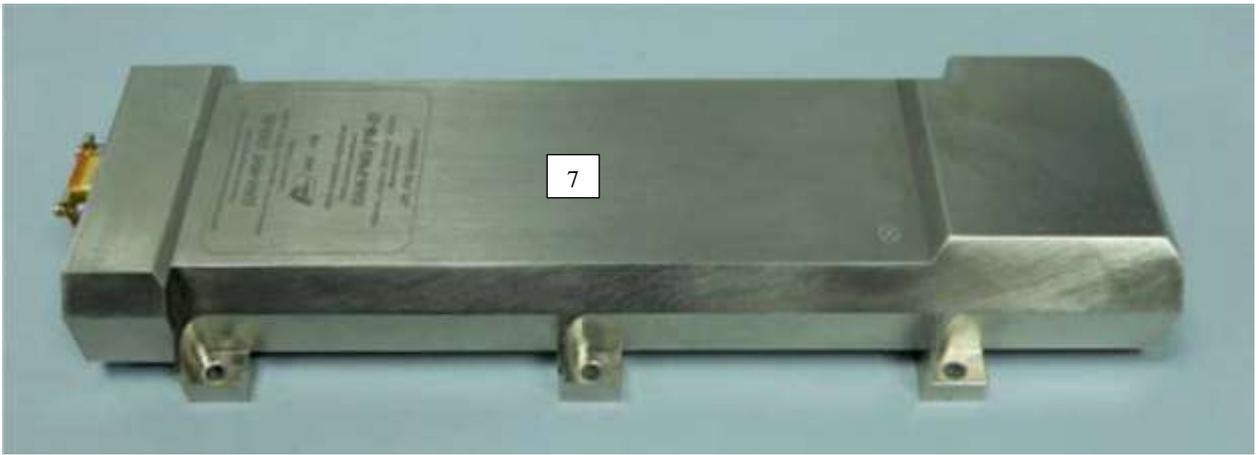


Рисунок 5.3 Блок нейтронного генератора ИНГ-10

Основные характеристики приборов АДРОН приведены в табл. 5.1. Как можно заметить, механические конструкции двух приборов очень похожи между собой, различия в электронной конструкции более значимы. Основные различия в механической конструкции в основном касаются размера γ -детектора. Так, для удовлетворения требованиям технического задания (ТЗ) для прибора АДРОН-ЭМ в части массовых ограничений пришлось уменьшить кристалл γ -детектора с размера 3×2 дюйма для АДРОН-ЛР до 2×2 дюйма для АДРОН-ЭМ.

Таблица 5.1 Основные характеристики приборов АДРОН

Параметр	АДРОН-ЛР	АДРОН-ЛР
Диапазоны измеряемых энергий, МэВ (гамма)	0,15–10 (4095 каналов)	0,15–10 (4095 каналов)
Энергетическое разрешение, % (гамма)	4,2 (662 кэВ)	4,2 (662 кэВ)
Габаритные размеры, мм		
АДРОН-ДЭ	270×215×110	269×200×86
АДРОН-ИНГ	340×125×45	340×125×45
АДРОН-ДМ	—	174×114×46
Масса, кг		
АДРОН-ДЭ	< 3,8	< 2,5
АДРОН-ИНГ	< 2,7	< 2,7
АДРОН-ДМ	—	< 0,55
Потребляемая мощность, Вт		
АДРОН-ДЭ	7	7
АДРОН-ИНГ	14	14
АДРОН-ДМ	—	—

Параметр	АДРОН-ЛР	АДРОН-ЛР
Напряжение питания, В	8–50	8–50
Температурный диапазон, С °		
Рабочий	–40–+50	–45–+45
Хранение	–40–+50	–55–+60
Командно-телеметрический интерфейс	RS-422	RS-422
Радиационная стойкость, крад	> 20	> 20
Вероятность безотказной работы за 1 год	> 0,95	> 0,95

При разработке электроники приборов серии АДРОН активно использовались все наработки, созданные для предыдущих приборов пассивного и активного нейтронного каротажа.

Блок-схемы электроники приборов АДРОН-ЛР и АДРОН-ЭМ имеют три основных различия:

— в связи с переходом на отечественную электронную базу основным ядром прибора АДРОН-ЭМ является не программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), а микроконтроллер, который также несет на себе основную функциональную нагрузку;

— в связи с наличием дополнительного дозиметрического блока АДРОН-ЭМ-ДЭ этот же микроконтроллер должен обеспечивать командование этим блоком и промежуточное хранение телеметрической информации;

— из-за различия в тепловых условиях прибор АДРОН-ЭМ имеет собственную автономную систему подогрева критических узлов прибора. Однако остальные научные и технические параметры у обоих приборов одинаковы:

— нейтронный генератор излучает импульсы нейтронов с энергиями 14 МэВ, с частотой 10 Гц и интенсивностью 10^7 нейтронов в импульсе;

— два детектора нейтронов на базе пропорциональных счетчиков с ^3He имеют энергетические диапазоны от 0,025 до 500 эВ и от 0,4 до 500 эВ для детектора тепловых и эпитепловых нейтронов соответственно, тракт обработки аналоговых сигналов обеспечивает временное разрешение менее 3 мкс;

— γ -детектор на основе сцинтиллятора CeBr_3 обеспечивает энергетический диапазон 0,2–10 МэВ с разрешением не хуже 4,5% (на линии ^{137}Cs) и временное разрешение менее 4 мкс;

— цифровой блок обеспечивает сбор, обработку и хранение данных с детекторов:

режим обработки (пассивный, активный), а также временные характеристики шкалы развертки в активном режиме задаются командами;

— цифровой блок обеспечивает управление пульсированием нейтронного генератора с временными параметрами, управляемыми по командам с Земли;

— цифровой блок обеспечивает временную привязку данных к коду бортового времени с точностью не хуже 1 мс;

— цифровой блок обеспечивает обмен командной и телеметрической информацией с бортовыми управляющими системами аппарата.

Приборы собраны с применением электрорадиоизделий (ЭРИ), обеспечивающих высокую стойкость к специальным внешним воздействующим факторам (СВВФ).

В качестве блока нейтронного генератора для приборов АДРОН используется нейтронный генератор ИНГ-10, исходно разработанный для прибора ДАН миссии «Кьюриосити». Опыт его применения показал высочайшую надежность и безотказность функционирования, при этом он многократно перекрыл назначенный ресурс работы.

Для выбора параметров нейтронных детекторов использовался опыт создания прибора ДАН: для увеличения статистики отсчетов в нем применялись гелиевые счетчики большого диаметра (50 мм) и давлением около 3 атм. Однако опыт работы в паре с нейтронным генератором показал сильное послеимпульсное насыщение таких детекторов — в течение нескольких микросекунд после начала нейтронного импульса у таких счетчиков наблюдается потеря эффективности регистрации. Это время определяется временем дрейфа электронов на катод счетчика (т. е. геометрическими размерами и формой счетчика), давлением рабочего газа, а также коэффициентом усиления детектора. По этой причине в приборе ДАН приходилось работать на минимально возможном коэффициенте усиления счетчиков и, как следствие, со слабым полезным сигналом с детектора. Чтобы избежать этого эффекта, в приборах АДРОН были применены гелиевые счетчики другой геометрии и с другим давлением рабочего газа.

Нейтронная детекторная часть приборов АДРОН состоит из двух пропорциональных гелиевых счетчиков фирмы LND 25169 с давлением газа 20 атм и различными внешними оболочками. Применение детекторов малого диаметра (12,5 мм) с высоким давлением рабочего газа (20 атм) позволило сильно ослабить эффект послеимпульсной потери эффективности регистрации при сохранении эффективности детектирования. Детектор эпитепловых нейтронов (CETN — counter of epithermal neutrons) окружен оболочкой из кадмия толщиной 1 мм, благодаря чему он регистрирует только эпитепловые нейтроны с энергиями от 0,4 эВ (порог кадмиевого поглощения) до 500 эВ. Детектор тепловых нейтронов (CTN — counter of thermal neutrons) имеет составную

оболочку из сегментов из кадмия и свинца: свинцовый сегмент составляет угол 180° и конструктивно направлен в сторону изучаемой поверхности грунта (рис. 7). Этот сегмент обеспечивает детектирование нейтронов с энергиями от 0,025 до 500 эВ со стороны поверхности. Интегральная разница отсчетов детекторов CTN и CETN равна потоку тепловых нейтронов из телесного угла, соответствующего свинцовому сегменту детектора CTN. Свинец в сегменте детектирования CTN используется для поглощения возможного потока заряженных частиц в детектор, отсчеты от которых могли бы внести значительный фон в полезный нейтронный сигнал.

Обработка электронных импульсов регистрации происходит посредством поступления сигнала с гелиевого счетчика через разделительный высоковольтный конденсатор поступает на зарядочувствительный усилитель Amptek A225 с постоянной времени формирования 2,6 мкс. Далее сигнал поступает на усилитель-формирователь и дискриминатор низкого уровня Amptek A206. В схеме предусмотрена подача двух различных уровней дискриминации полезного сигнала от шумов: низкий уровень используется во время нормальной работы, повышенный применяется для подавления повышенных шумов в аналоговом тракте детектора в случае неблагоприятной электромагнитной обстановки.

Оцифрованные спектры отсчетов регистрируются в 16 или 32 спектральных каналах (для АДРОН-ЛР и АДРОН-ЭМ соответственно). Известно, что форма спектров отсчетов гелиевых счетчиков не соответствует спектру энергий зарегистрированных нейтронов, а отражает ядерную реакцию взаимодействия нейтрона с ядром ^3He :



Этот спектр отражает энергию, оставленную внутри рабочего объема нейтронного счетчика двумя результирующими частицами (тритонем и протоном) в реакции (2).

Оцифровка и запись формы спектра нейтронных счетчиков крайне необходима и во время штатной работы прибора и позволяет убедиться в отсутствии шумов в аналоговом тракте, отсутствии регистрации заряженных частиц в нейтронном детекторе и пр.

В части спектрометрических измерений γ -излучения для приборов АДРОН был использован опыт создания ртутианского гамма- и нейтронного спектрометра (МГНС) на борту Европейского космического аппарата «БепиКоломбо», который в настоящее время находится на перелетной траектории к Меркурию (см. раздел 4 настоящего Отчета).

В γ -детекторе применяется перспективный сцинтиллятор CeBr_3 , который обладает несколько худшим разрешением, чем его аналог из LaBr_3 (4,5% против 3,2% на линии ^{137}Cs), однако он не имеет собственной радиоактивности в районе энергии 1,4 МэВ. Этот

энергетический диапазон включает линию от 40К, измерение которой важно при проведении планетных исследований.

В качестве устройства съема сигнала используется традиционный вакуумный ФЭУ: для прибора АДРОН-ЛР с трехдюймовым кристаллом — это Hamamatsu R1307-13, для прибора АДРОН-ЭМ с двухдюймовым кристаллом — это ET Enterprises 9272B.

Для работы всех трех детекторов нейтронов и γ -лучей необходимо высокое напряжение: 600–700 В для нейтронных счетчиков и около 1,4 кВ для ФЭУ. Поскольку оценка содержания водорода в исследуемом грунте получается путем вычитания измерений пропорциональных счетчиков нейтронов, нецелесообразно использование отдельных источников высокого напряжения для каждого счетчика отдельно: при отказе любого из них результат теряется. Исходя из этого в конструкции приборов предусмотрено применение только двух независимых источников высокого напряжения — для двух детекторов нейтронов и для γ -спектрометра. Это позволило улучшить габаритно-массовые параметры и снизить общее энергопотребление прибора.

Основными отличиями между приборами являются следующие:

1. Использование различных по своей архитектуре центральных вычислительных узлов. В связи с более ранними сроками разработки прибора АДРОН-ЛР (2010–2012 гг.) ядром такого блока прибора является радиационно-стойкая ПЛИС фирмы Актел RT3PE3000L объемом 3 млн эквивалентных логических вентилей. Для программирования структуры данной микросхемы использовался язык VHDL, и в финальной реализации микросхема представляет собой достаточно сложную машину состояний. Можно отметить, что исходный код данного проекта составляет более 8,5 тыс. строк кода. Прибор АДРОН-ЭМ разрабатывался гораздо позже (2016–2017 гг.), уже в условиях необходимого импортозамещения. Было принято решение заменить ПЛИС на отечественный радиационно-стойкий микроконтроллер фирмы «Миландр» 1986BE8T. Микроконтроллер имеет гибкий алгоритм функционирования, определяемый программным обеспечением, однако является однозадачным, что для этого микроконтроллера компенсируется высокой производительностью и большим количеством аппаратных периферийных блоков. Он содержит встроенные блоки АЦП, ЦАП, интерфейсов UART, SPI и пр.
2. Наличие у прибора АДРОН-ЭМ дополнительного дозиметрического блока АДРОН-ДМ разработки Института космических исследований и технологий Болгарской академии наук (ИКИТ БАН), что повлекло за собой, во-первых, изменение алгоритма работы программного обеспечения и системы

командования прибором и, во-вторых, увеличение оперативной памяти для хранения результатов измерений дозиметра до их передачи в бортовую массовую память космического аппарата.

3. Наличие у прибора АДРОН-ЭМ собственной автономной системы обогрева критических узлов прибора, которая работает в полностью автоматическом режиме. Ее включение/выключение осуществляется с помощью термостатического элемента на базе биметалла. Эта система для повышения живучести и надежности прибора не связана с его цифровой электроникой.

Приборы серии АДРОН имеют три режима работы: дежурный, пассивный и активный.

В дежурном режиме отсутствует какая-либо измерительная активность, и прибор передает на борт только информацию о значениях его служебных параметров (температуры в различных частях прибора, напряжения питания и пр.).

В пассивном режиме прибор осуществляет измерения детекторами нейтронов и γ -лучей с накоплением спектров отсчетов без развертки по времени. При работе в активном режиме прибор ведет накопление спектров нейтронов и γ -лучей для интервалов временной шкалы, начало которой синхронизировано с началом каждого нейтронного импульса. Во время измерений для всех детекторов используется единая временная шкала, которая содержит 58 временных интервалов. Первый из них самый короткий и накапливает энергетический спектр сразу после импульса ИНГ (5 мкс по умолчанию), а 58-й соответствует практически фоновым измерениям. Он продолжается от завершения 57-го временного интервала и до начала следующего импульса ИНГ

В активном режиме с частотой пульсирования 10 Гц нейтронного генератора потребление приборов АДРОН составляет 21 Вт для АДРОН-ЛР и 24,5 Вт для АДРОН-ЭМ. Постоянная работа приборов на борту КА при таком энергопотреблении может оказаться невозможной. Как альтернатива активному режиму возможна работа приборов в режиме пассивных измерений, в котором потребление прибора значительно снижается до 7 Вт для АДРОН-ЛР и 10,5 Вт для АДРОН-ЭМ.

Для записи спектров нейтронных счетчиков используется 32 энергетических канала двухбайтовой длины, для спектров γ -детектора — 4095 каналов также двухбайтовой длины. Отсюда следует, что в каждом канале может быть записано до 65536 отсчетов за кадр измерений. Объем накопленной научной информации в одном кадре активного режима (с разверткой в 58 временных интервалов) составляет 7 424 байта для двух нейтронных счетчиков и 475 136 байт для γ -детектора.

Прибор АДРОН-ЛР успешно прошел весь цикл конструкторско-доводочных, приемосдаточных и стыковочных испытаний и установлен на борт космического аппарата «Луна-25». Его запуск на Луну запланирован на 2023 г. Создан прибор АДРОН-ЭМ для миссии «ЭкзоМарс-2022». Ведется активная работа по созданию прибора «АДРОН-ЛР» для проекта «Луна-27».

В более удаленной перспективе прибор серии АДРОН планируется установить на борт автоматической посадочной станции для исследования Венеры. В отличие от Луны и Марса, поверхность Венеры не бомбардируется галактическими космическими лучами, которые не проникают через толстую атмосферу планеты. Собственное γ -излучение Венеры возникает только вследствие распада естественных радиоактивных изотопов калия, тория и урана. Поэтому для изучения элементного состава вещества и возможного присутствия в нем молекул воды необходимо применить активный метод нейтронного каротажа. Прибор из серии АДРОН с нейтронным генератором максимально подойдет для проведения такого исследования.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 2.6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2022 году по теме ОСВОЕНИЕ. Исследование Луны, планет и объектов Солнечной системы методами ядерной физики для изучения физической природы этих небесных тел для выяснения условий их освоения

В 2022 году было продолжено изучение небесных тел Солнечной системы, в том числе и с учетом перспектив их народно-хозяйственного освоения.

Продолжена работа по выбору перспективных мест посадки в южной полярной области Луны для космических аппаратов лунных посадочных миссий. На основе ранее разработанной системы инженерных и научных критериев предложен ряд районов посадки для космического аппарата «Луна-27». Также осуществлен научный анализ результатов испытаний лунного манипуляторного комплекса, разработанного для космического аппарата «Луна-25», в частности, оценка потенциальной прочности лунного реголита. Показано, что прочность лунного грунта даже с крайне небольшим содержанием водяного льда, замороженного до криогенных температур, значительно возрастает и растет по мере увеличения содержания в грунте массовой доли водяного льда. Так же показано, что достигнутая точность наведения комплекса способна обеспечить выполнение научных задач миссии.

В части исследований Марса продолжено практическое применение новых методов оценки содержания водного эквивалента водорода в подповерхностном слое Марса по данным пассивных измерений прибора ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити» и метода пиксельного представления данных измерений прибора ДАН. Составлена первая часть каталога с данными о концентрации воды и хлора вдоль трассы марсохода «Кьюриосити».

Также продолжены работы по исследованию радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий, в том числе и с борта космического аппарата «БепиКоломбо» на орбите перелета к Меркурию с помощью научной аппаратуры МГНС. На примере гамма-всплеска GRB200219C показано, что применение данных МГНС-ХЕНД в международном эксперименте IPN позволяют значительно улучшить локализацию гамма-всплесков.

Велась разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики, обобщался накопленный опыт создания таких приборов для использования в будущих межпланетных миссиях. Описаны методы активного нейтронного и γ -каротажа, основные цели и задачи экспериментов с приборами серии

АДРОН для изучения поверхности Луны и Марса, состав аппаратуры, а также описание конструкции и электроники указанных приборов. Предложено применение приборов этой серии для будущих исследований Венеры.

В рамках исследований по теме ОСВОЕНИЕ подготовлено 19 статей, из которых 18 опубликованы и 1 принята к публикации (см. список источников).

Из вышеуказанных публикаций 6 подготовлены в периодических изданиях, имеющих кварталы Q1, 3 – Q2, 4 – Q3, 3 – Q4, и 7 публикаций осуществлено в сборниках материалов.

В рамках международной программы по изучению космических гамма-всплесков IPN разослано 35 циркуляров о новых гамма-всплесках, зарегистрированных российскими приборами ХЕНД на орбите вокруг Марса и МГНС на межпланетной орбите.

О полученных результатах было сделано 7 докладов на научных конференциях и разослано 35 циркуляров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список подготовленных в 2022 г. работ:

Всего подготовлено научных публикаций в 2022 г: 67 (из них опубликовано 66, принята к печати 1)

Статьи в зарубежных изданиях: 15 (из них 5 выполнены при поддержке РФФ или РФФИ);

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 7 (из них 1 при поддержке РФФ и 1 при частичной поддержке РФФИ);

Публикации в сборниках и материалах конференций: 3;

Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 8 (из них 2 при поддержке РФФ или РФФИ);

Доклады и циркуляры: 42

1 Статьи в зарубежных изданиях

- 1.1 Czarnecki, S., Hardgrove, C., Arvidson, R., Hughes, M., Schmidt, M., Henley, T., Sierra, L., Jun, I., Litvak, M., Mitrofanov, I. Hydration of a clay-rich unit on Mars, comparison of orbital data to rover data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, <https://doi.org/10.1029/2021JE007104> (принята к публикации) Impact factor: 1,61, Q1
- 1.2 Travis, G., Craig, H., Cherie, A., Rampe, E., Rapin, W., Nowicki, S., Czarnecki, S., Thompson, L., Nikiforov, S., Litvak, M., Mitrofanov, I., Lisov, D., Frydenvang, J., Yen, A., Wiens, R., Treiman, A., Mcadam, A. On an Extensive Late Hydrologic Event in Gale Crater as Indicated by Water-Rich Fracture Halos. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127. <https://doi.org/10.1029/2020JE006600> Impact factor: 1,61, Q1
- 1.3 Djachkova M. V., Mitrofanov I. G., Nikiforov S. Y., Lisov D. I., Litvak M. L., Sanin A. B. Testing Correspondence between Areas with Hydrated Minerals, as Observed by CRISM/MRO, and Spots of Enhanced Subsurface Water Content, as Found by DAN along the Traverse of Curiosity, *Advances in Astronomy*, vol. 2022, Article ID 6672456, 10 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6672456> Impact factor: 0,23, Q3
- 1.4 Kozyrev A.S., Benkhoff J., Litvak M.L., Golovin D.V., Quarati F., Sanin A.B., Localization of cosmic gamma-ray bursts in interplanetary space with MGNS/BepiColombo and HEND/Mars Odyssey experiments, *Planetary and Space Science*, Volume 224, 2022, 105594, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2022.105594> Impact factor: 0,65, Q2

- 1.5 Litvak M., Kozlova T., Ilyin A., Kiselev A., Kozyrev A., Mitrofanov I., Tretyakov V., Yakovlev V., Luna – 25 robotic arm: Results of experiment with analog of lunar regolith in lunar like conditions, *Acta Astronautica*, Volume 200, 2022, Pages 282-290, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.08.003>, Impact factor: 1, Q1
- 1.6 Loznikov V.M. Search for variability in the spectra cosmic ray protons, *Astroparticle Physics*, Volume 143, 2022, 102757, <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2022.102757> Impact factor: 0,74, Q2
- 1.7 Mitrofanov, I. G., Nikiforov, S. Y., Djachkova, M. V., Lisov, D. I., Litvak, M. L., Sanin, A. B., & Vasavada, A. R. Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover: 1. DAN measurement profiles along the traverse. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127, e2022JE007327. <https://doi.org/10.1029/2022JE007327> Impact factor: 1,61, Q1
- 1.8 Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Malakhov A.V., Litvak M.L., Golovin D.V., Numerical modeling of mapping of Martian epithermal neutron emission: Applications to FRENDO investigation onboard ESA's Trace Gas Orbiter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 1039, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166997>, Impact factor: 0,62, Q2
- 1.9 Palmerio, E., Lee, C. O., Mays, M. L., Luhmann, J. G., Lario, D., Sánchez-Cano, B., Richardson I.G., Vainio R., Stevens M.L., Cohen C.M.S., Steinvall K., Möstl C., Weiss A.J., Nieves-Chinchilla T., Li Y., Larson, D.E., Heyner D., Bale S.D., Galvin A.B., Holmström M., Khotyaintsev Y.V., Maksimovic M., Mitrofanov I.G. CMEs and SEPs during November–December 2020: A challenge for real-time space weather forecasting. *Space Weather*, 20, 2022, <https://doi.org/10.1029/2021SW002993> Impact factor: 1,44, Q1
- 1.10 Svinkin, D. S.; Hurley, K.; Ridnaia, A. V.; Lysenko, A. L.; Frederiks, D. D.; Golenetskii, S. V.; Tsvetkova, A. E.; Ulanov, M. V.; Kokomov, A.; Cline, T. L.; Mitrofanov, I.; Golovin, D.; Kozyrev, A.; Litvak, M.; Sanin, A.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; Burns, E.; von Kienlin, A., et al. The Second Catalog of Interplanetary Network Localizations of Konus Short-duration Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 259, Issue 2, April 2022, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/ac4607>, Impact factor: 3,08, Q1

2 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

- 2.1 Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И. О выборе района посадки космического аппарата Луна-27. *Астрономический вестник*, 2022, Т. 56, № 3, стр. 158-168, <https://doi.org/10.31857/S0320930X22030021> (переводная версия: Djachkova, M.V., Mitrofanov, I.G., Sanin, A.B., Litvak, M. L., Tret'yakov, V. I. Selecting a Landing Site for the Luna 27 Spacecraft. *Solar System Research*, 56, 145–154 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0038094622030029>), Impact factor: 0,28, Q3
- 2.2 Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Головин Д.В., Пеков А., Мокроусов М.И. Санин А.Б., Третьяков В.И., Дачев Ц.П., Семкова Й.В. Долгопериодические вариации нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон». *Космические исследования*, 2022, Т. 60, № 3, стр. 206-217, <https://doi.org/10.31857/S0023420622030062> (переводная версия: Litvak, M.L., Mitrofanov, I.G., Golovin, D.V., Pekov, A., Mokrousov, M. I., Sanin, A. B., Tret'yakov, V. I., Dachev, Ts. P., Semkova Y.V. Long-Period Variations of the Neutron Component of the Radiation Background in the Area of the International Space Station according to the Data of the BTN-Neutron Space Experiment. *Cosmic Res* 60, 174–184 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0010952522030054>) (частично при поддержке РФФИ), Impact factor: 0,22, Q4;
- 2.3 Малахов А.В., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Санин А.Б., Головин Д.В., Дьячкова М.В., Никифоров С.Ю., Аникин А.А., Лисов Д.И., Лукьянов Н.В., Мокроусов М.И., Швецов В.Н., Тимошенко Г.Н. Физические калибровки нейтронного телескопа ФРЕНД, установленного на борту марсианского спутника TGO. *Космические исследования*. 2022. Т. 60. № 1. С. 26-42, <https://doi.org/10.31857/S0023420622010095>, (переводная версия: Malakhov, A.V., Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L. et al. Physical Calibrations of the FRENД Instrument Installed Onboard TGO Martian Orbiter. *Cosmic Res* 60, 23–37, 2022, <https://doi.org/10.1134/S0010952522010099>), Impact factor: 0,22, Q4
- 2.4 Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г., Аникин А.А., Головин Д.В., Карпушкина Н.Е., Козырев А.С., Литвак М.Л., Малахов А.В., Пеков А., Санин А.Б., Третьяков В.И. Второй этап космического эксперимента «БТН Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции: аппаратура БТН-М2. *Космические исследования*. 2022. Т. 60. № 5. С. 426-436, <https://doi.org/10.31857/S0023420622050041> , (переводная версия: Mokrousov, M.I.,

- Mitrofanov, I.G., Anikin, A.A., Golovin, D. V., Karpushkina, N. E., Kozyrev, A. S., Litvak, M. L., Malakhov, A. V., Pekov A. N., Sanin A. B. & Tretyakov V. I. The Second Stage of BTN Neutron Space Experiment onboard the Russian Section of the International Space Station: the BTN-M2 Instrument, *Cosmic Res* 60, p. 387–396, (2022). <https://doi.org/10.1134/S0010952522050045>), Impact factor: 0,22, Q4
- 2.5 Тимошенко Г.Н., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Швецов В.Н. Сотрудничеству ИКИ-ОИЯИ 25 лет. Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. Т. 19. № 5 (244). С. 465-483 http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2022_5/44_Timoshenko_1.pdf, (переводная версия: Timoshenko, G.N., Litvak, M.L., Mitrofanov, I.G., Shvetsov, V.N. Twenty-Five Years of Cooperation between the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences and the Joint Institute for Nuclear Research. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 19, 616–629 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122050417>), Impact factor: 0,24, Q3
- 2.6 Мокроусов М.И., Головин Д.В., Митрофанов И.Г., Аникин А.А., Карпушкина Н.Е., Козырев А.С., Литвак М.Л., Малахов А.В., Никифоров С.Ю., Пеков А.Н., Санин А.Б., Третьяков В.И. АДРОН: активный спектрометр нейтронного и гамма-излучения Луны. Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. Т. 19, № 6(245). С. 553–576 (переводная версия: Mokrousov M.I., Golovin D.V., Mitrofanov I. G., Anikin A.A., Karpushkina, N.E., Kozyrev A. S., Litvak M. L., Malakhov A.V., Nikiforov S.Y., Pekov A.N., Sanin A. B., and Tretyakov V. I. ADRON: Active Spectrometer of Neutron and Gamma Radiation of the Moon and Mars *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 710–729), Impact factor: 0,24, Q3.
- 3 Публикации в сборниках и материалах конференций
- 3.1 Дьячкова М.В., Никифоров С.Ю., Митрофанов И.Г., Лисов Д.И., Литвак М.Л., Санин А.Б. Вариации содержания воды и хлора в грунте Марса вдоль трассы марсохода «Кьюриосити» по данным измерений прибора ДАН. XIX Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2022 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2022, С. 37-42, DOI: 10.21046/KMU-2022-37-42, <https://kmu.cosmos.ru/docs/2022/KMU-2022-Proceedings-v4.pdf>
- 3.2 Никифоров С.Ю., Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Лисов Д.И., Санин А.Б. Результаты обработки данных пассивных измерений прибора ДАН на борту марсохода «Кьюриосити». XIX Конференция молодых учёных

«Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2022 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2022, С. 92-97, DOI: 10.21046/KMU-2022-92-97, <https://kmu.cosmos.ru/docs/2022/KMU-2022-Proceedings-v4.pdf>

3.3 Яковлев В.А., Литвак М.Л., Козлова Т.О., Эльяшев Я.Д., Дзюбан И.А., Никитин А.В. Проведение наземных экспериментов по наведению лунного манипуляторного комплекса на различные объекты в его рабочей зоне. XIX Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2022 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2022, С. 200-207, DOI: 10.21046/KMU-2022-200-207, <https://kmu.cosmos.ru/docs/2022/KMU-2022-Proceedings-v4.pdf>

4 Статьи, выполненные при поддержке РНФ и РФФИ

4.1 Malakhov, A., Mitrofanov, I., Golovin, D., Litvak, M., Sanin, A., Djachkova, M., Lukyanov, N. High Resolution Map of Water in the Martian Regolith Observed by FRENDE Neutron Telescope Onboard ExoMars TGO. Journal of Geophysical Research: Planets. 2022, 127. <https://doi.org/10.1029/2022JE007258>, Impact factor: 1,61, Q1

4.2 Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Anikin A.A., Mokrousov M.I., Golovin D.V., Nikiforov S.Y., Timoshenko G.N., Shvetsov V.N. Laboratory demonstration of space gamma-ray spectroscopy experiment with tags of Galactic cosmic rays for testing different types of Martian regolith, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1028, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166364> , Impact factor: 0,62, Q2

4.3 Mitrofanov, I. G.; Sanin, A. B.; Litvak, M. L.; Golovin, D. V.; Nikiforov, S. Y. The concept of gamma-ray remote sensing of Martian surface composition onboard a Mars Rover, Acta Astronautica, Volume 199, p. 134-141, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.019> , Impact factor: 1, Q1

4.4 Mitrofanov I., Malakhov A., Djachkova M., Golovin D., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Svedhem H., Zelenyi L., The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars, Icarus, Volume 374, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114805> , Impact factor: 1,36, Q1

- 4.5 Mitrofanov, I.G., Sanin, A.B., Golovin, D.V., Nikiforov, S. Y., Litvak, M. L. & Bakhtin B. N. On the Study of Spatial Variability of the Composition of the Substance of Mars in Experiments on Gamma-Ray Spectroscopy on Board the Mobile Vehicle using the Method of “Tagged Charged Particles”. *Solar System Research*, 56, 291–298 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0038094622050057>, Impact factor: 0,28, Q3
- 4.6 Semkova J., Benghin V., Guo J., Zhang J., Da Pieve F., Krastev K., Matviichuk Y., Tomov B., Shurshakov V., Drobyshhev S., Mitrofanov I., Golovin D., Litvak M., Comparison of the flux measured by Liulin-MO dosimeter in ExoMars TGO science orbit with the calculations, *Life Sciences in Space Research*, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.08.007> , Impact factor: 0,39, Q2
- 5 Доклады, тезисы, циркуляры
- 5.1 . Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B. The water abundance at Artemis landing sites The Thirteenth Moscow Solar System Symposium, 13M-S³ ,Space Research Institute Moscow, Russia, October 10-14, 2022, https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
- 5.2 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 221209A (long), GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33059, December 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33059.gcn3>
- 5.3 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 221121A (long), GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32971, December 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32971.gcn3>
- 5.4 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. Improved IPN localization for GRB 221009A (BepiColombo-MGNS light curve). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32805, October 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32805.gcn3>
- 5.5 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 221017A (long). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32787, October 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32787.gcn3>
- 5.6 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220927A (long). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32597, September 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32597.gcn3>
- 5.7 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220624A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32265, June 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32265.gcn3>

- 5.8 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220617A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32220, June 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32220.gcn3>
- 5.9 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220613A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32205, June 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32205.gcn3>
- 5.10 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220606C. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32202, June 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32202.gcn3>
- 5.11 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220609B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32190, June 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32190.gcn3>
- 5.12 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220601A (long). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32163, June 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32163.gcn3>
- 5.13 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220525A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32118, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32118.gcn3>
- 5.14 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220524B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32117, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32117.gcn3>
- 5.15 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220524A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32115, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32115.gcn3>
- 5.16 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220522B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32108, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32108.gcn3>
- 5.17 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220521B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32104, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32104.gcn3>
- 5.18 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220519A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32072, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32072.gcn3>

- 5.19 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220423A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31996, May 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31996.gcn3>
- 5.20 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220426A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31958, April 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31958.gcn3>
- 5.21 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220411A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31920, April 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31920.gcn3>
- 5.22 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of short/soft GRB 220406A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31895, April 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31895.gcn3>
- 5.23 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220408B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31878, April 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31878.gcn3>
- 5.24 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220403C. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31877, April 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31877.gcn3>
- 5.25 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220320A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31783, March 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31783.gcn3>
- 5.26 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220310A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31756, March 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31756.gcn3>
- 5.27 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220305B, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31713, March 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31713.gcn>
- 5.28 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220222A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31649, February 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31649.gcn3>
- 5.29 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. GCN Circ.draft on GRB 220222A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31645, February 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31645.gcn3>

- 5.30 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220219A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31621, February 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31621.gcn3>
- 5.31 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220209A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31598, February 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31598.gcn3>
- 5.32 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. Improved IPN error box for GRB 220910A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 32559, #1 (2022/September-0), <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/32559.gcn3>
- 5.33 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220128A (long). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31536, January 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31536.gcn3>
- 5.34 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 220124A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31525, January 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31525.gcn3>
- 5.35 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of a bright burst from SGR 1935+2154. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31512, January 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31512.gcn3>
- 5.36 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 211226A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31510, January 2022, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31510.gcn3>
- 5.37 Kozyrev A.S., Benkhoff J., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Sanin A.B. A comparative analysis of neutron flux data measured by MGNS/BepiColombo experiment for Venus and Mercury flybys. The Thirteenth Moscow Solar System Symposium, 13M-S³, Space Research Institute Moscow, Russia, October 10-14, 2022, https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
- 5.38 Litvak M.L., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Benkhof J. Experiment MGNS onboard ESA BepiColombo mission. The Thirteenth Moscow Solar System Symposium, 13M-S³, Space Research Institute Moscow, Russia, October 10-14, 2022, https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
- 5.39 Malakhov, A.V.; Mitrofanov, I.G.; Sanin, A.B.; Litvak, M.L.; Golovin, D.V.; Djachkova, M.V.; Lukyanov, N.V.; Nikiforov, S.Yu.; Anikin, A.A.; Lisov, D. I. Mapping Global Water Distribution in the Upper Martian Subsurface by FRENDO Neutron Telescope Onboard ExoMars TGO. 53rd Lunar and Planetary Science Conference, held 7-11 March, 2022 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No.

<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/2602.pdf>

- 5.40 Malakhov, A.; Mitrofanov, I.; Litvak, M.; Sanin, A.; Golovin, D.; Djachkova, M.; Lisov, D.; Nikiforov, S.; Lukyanov, N.; Anikin, A. Global Maps of Water in the Martian Shallow Subsurface as Seen by the FRENDE Neutron Telescope Onboard ExoMars TGO. 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 2022. Abstract B4.2-0025-22, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022cosp...44..382M/abstract>
- 5.41 Malakhov A.V., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Golovin D.V., Djachkova M.V., Lukyanov N.V. Global map of water abundance in the upper regolith layer of the equatorial region on Mars. The Thirteenth Moscow Solar System Symposium, 13M-S³, Space Research Institute Moscow, Russia, October 10-14, 2022, https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
- 5.42 Mitrofanov T I., Zelenyi L., Tret'yakov V. The "Korvet" Program: Integrated Human and Robotic Missions to Moon. The Thirteenth Moscow Solar System Symposium, 13M-S³, Space Research Institute Moscow, Russia, October 10-14, 2022, https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf