# 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 Рег. № НИОТКР АААА-А18-118012290370-6

> УТВЕРЖДАЮ Директор ИКИ РАН, ОПЕНТИСКИАР ОСТИТИСКИ РАН, ОПЕНТИСКИ РАН, ОСТИТИСКИ РАЛИ, ОСТИТИ РАЛИ, ОСТИТИ РАЛИ, ОСТИТИЛИ РАЛИ, ОСТИТИЛИ РАЛИ, ОСТИТИЛИ РАЛИ РАЛИ, ОСТИТИЛИ РАЛИ РОВИ РОВИЛИ РОВИЛИ РОВИЛИ

## 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 2)

по теме

ОСВОЕНИЕ

0024-2021-0009

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

Г. Митрофанов

Москва 2021

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

(И.Г. Митрофанов)

подпись, дата

(введение, заключение, раздел 1)

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

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

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

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

научный сотрудник отдела 63 ИКИ РАН,

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

20.17.2021 (М.Л. Литвак) подпись, дата

(разделы 2, 3)

20.122021 an

подпись, дата

20,12.2021

подпись, дата

(А.С. Козырев) (разделы 1, 4)

(А.Б. Санин)

(раздел 2)

20.12.2021 (М.И. Мокроусов)

подпись, дата

(раздел 5)

20.12.2021 подпись, дата

(С.Ю. Никифоров) (раздел 3)

20,12,2021

подпись, дата

(Д.В. Головин) (раздел 5)

младший научный сотрудник отдела 63 ИКИ РАН

ведущий специалист отдела 63 ИКИ РАН

Нормоконтроль

20.12.2021

## (М.В. Дьячкова) (раздел 2)

подпись, дата

and 20.12.2021

подпись, дата

(введение, заключение, разделы 1, 2, 3, 4, 5)

(Д.В. Калашников)

(В.Г. Прохоров) потрась, дата 21.12.2021

## $P \to \Phi \to P \to T$

## Отчет - 59 стр., 24 рис., 1 табл., 55 источн.

ЯДЕРНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ, ЛУНА, МАРС, ВЕНЕРА, МЕРКУРИЙ, ПРИБОР ХЕНД, ЛУНА-25, ПРИБОР ДАН, ГАММА-ВСПЛЕСКИ, РЕГОЛИТ, ГЕОЛОГИЯ МАРСА, НЕЙТРОН, РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА, ГАММА – И НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР, ВТОРИЧНЫЕ НЕЙТРОНЫ, ВОДА, ПРИБОР МГНС, ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ЛУННЫЙ МАНИПУЛЯТОРНЫЙ КОМПЛЕКС, ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ, РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ, СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение
Важнейшие и наиболее значимые результаты за 2021 год
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 событий16
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
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
4 Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и
других небесных тел солнечной системы40
5 Разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной
ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению42
Заключение
Список использованных источников

#### ВВЕДЕНИЕ

Институт космических исследований Российской академии наук проводит научноисследовательские и опытно-конструкторские работы по теме 0028-2019-0003 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; 1.3.3.5. Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов, а также другие источники элементарных частиц, атомных ядер, синхротронного и рентгеновского излучения; 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 2021 году проводились работы по изучению космического гамма- и нейтронного излучения; оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел солнечной системы; исследованию радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий; изучению полярных районов Луны (полярный реголит, полярная экзосфера), оценка содержания в лунном веществе воды и природных ресурсов, условий обеспечения ресурсами лунных пилотируемых экспедиций, перспектив освоения Луны; изучению элементного состава вещества Марса и его спутников, оценке содержания в их грунте воды, исследованиям сезонных вариаций атмосферы, выяснению условий обеспечения ресурсами марсианских пилотируемых экспедиций; изучению элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы; разработке 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 2021 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.

# Важнейшие результаты за 2021 год. Выбор основного и резервного районов посадки космического аппарата «Луна-25»: благоприятный рельеф, продолжительность периода освещенности, повышенное содержание водорода

Митрофанов И.Г.<sup>1</sup>, Виллиямс Ж.-П.<sup>2</sup>, Глейсер П.<sup>3</sup>, Дьячкова М.В.<sup>1</sup>, Литвак М.Л.<sup>1</sup>, Оберст Й.<sup>4</sup>, Санин А.Б.<sup>1</sup> и Третьяков В.И.<sup>1</sup>

Показано, что полярные районы повышенной концентрации водорода в лунном реголите, обнаруженные российским нейтронным телескопом ЛЕНД на борту лунного спутника НАСА ЛРО (рисунок 1), не обязательно совпадают с областями постоянно низких температур реголита. на дне постоянно затененных полярных кратеров [1]. Такие районы Солнцем лунной вечной мерзлоты могут регулярно освещаться В течение продолжительных периодов лунных суток. Этот вывод имеет принципиальное значение для выбора районов посадки российского автоматического космического аппарата «Луна-25», энергетика которого обеспечивается солнечными батареями. Намеченные [2] основной и резервный районы посадки этого аппарата имеют координаты 69.55° ю.ш., 43.54° в.д. и 68.77° ю.ш., 21.21° в.д., соответственно (рисунок 2).



**Рисунок 1.** Карта переменности нейтронного сигнала *ξ*, измеренного прибором ЛЕНД на Южном полюсе Луны. Прямоугольниками выделены области, для которых проводилось моделирование [1]. Синий цвет соответствует повышенной концентрации воды

Согласно данным нейтронного картографирования Луны телескопом ЛЕНД, в реголите намеченных приполярных районов может содержаться не менее 0.5% водного льда, что делает их многообещающими для намеченных научных исследований полярного

реголита непосредственно на борту первого российского лунного исследовательского аппарата.



**Рисунок 2.** Основной (1) и запасной (2) районы посадки космического аппарата Луна-25. Цвета соответствуют высоте места, горизонтали проведены через 25 метров

Результат опубликован: [1] Glaser P., Sanin A. et al., Temperatures near the lunar poles and their correlation with hydrogen predicted by LEND. Journal of Geophysical Research: Planets, September 2021, Volume126, Issue 9; [2] Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И., Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25, Астрономический вестник, 2021, том 55, № 6, с. 522–541.

Результат получен в рамках: Тема ОСВОЕНИЕ, № 0028-2019-0003, рег. № АААА-A18-118012290370-6

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>University of California Los Angles, USA

<sup>3</sup>Technische Universität Berlin, BRD

<sup>4</sup>Technische Universität Berlin, Institute of Geodesy and Geoinformation Science, BRD

# Наиболее значимые результаты исследований, выполненных в рамках государственного задания в 2021 году. Результаты работы прибора МГНС миссии «БепиКоломбо» на этапе перелета к Меркурию. Включение прибора МГНС в международную программу IPN (InterPlanetary Network) по локализации космических гамма-всплесков

Митрофанов И. Г.<sup>1</sup>, Козырев А.С.<sup>1</sup>, Лисов Д.И.<sup>1</sup>, Литвак М. Л.<sup>1</sup>, Малахов А. В.<sup>1</sup>, Мокроусов М. И.<sup>1</sup>, Benkhoff J.<sup>2</sup>, Owens A.<sup>2</sup>, Schulz R.<sup>2</sup>, Quarati F.<sup>3,4</sup>

В 2021 году космический аппарат ЕКА «БепиКоломбо» совершил пролеты у Венеры 10 августа и у Меркурия 1–2 октября. Во время этих пролетов российский прибор МГНС, установленный на борту указанного аппарата, зарегистрировал потоки собственного излучения нейтронов и гамма-лучей, которые возникают в результате взаимодействия галактических космических лучей с верхними слоями атмосферы Венеры и поверхности Меркурия (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Профили потока быстрых нейтронов от Венеры (а) и от Меркурия (б) по данным измерений прибора МГНС во время пролетов космического комплекса «БепиКоломбо» в окрестности этих планет. Пунктир означает момент наибольшего сближения с планетой

Анализ полученных данных показал (см. рисунок 2) значительное отличие энергетических спектров потоков нейтронов от этих двух планет, вызванное различием состава вещества в указанных слоях.



**Рисунок 2.** Сопоставление потоков нейтронного излучения Марса и Венеры по данным прибора МГНС во время пролетов космического комплекса «БепиКоломбо»

С 21 октября 2021 года прибор МГНС стал частью международной программы IPN (InterPlanetary Network) по локализации источников космических гамма-всплесков. В этой программе в настоящее время участвуют шесть приборов на бортах различных космических аппаратов. Только два из них находятся на межпланетном расстоянии от Земли: это МГНС на орбите перелета к Меркурию и ХЕНД на борту марсианского спутника NASA «Марс Одиссей». Благодаря межпланетному расположению данные этих приборов позволяют выполнить локализацию источников всплесков с максимально высоким пространственным разрешением порядка нескольких минут дуги.

За короткий срок участия прибора МГНС в программе IPN было опубликовано пять циркуляров, четыре из которых представили данные по локализации космических гаммавсплесков: GRB 210927B, GRB 211019A, GRB 211022A и GRB 211120A (см. рисунок 3).



**Рисунок 3.** Пример локализации источника космического гамма-всплеска GRB 211019A с участием данных приборов МГНС/БепиКоломбо и ХЕНД/Марс Одиссей

Результаты опубликованы в статье: Mitrofanov, I.G., Kozyrev, A.S., et al. The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) Onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission: Design Updates and First Measurements in Space, Space Science Reviews, Volume 217, issue 8, December 2021.

Выпущенные циркуляры:

https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/30949.gcn3 - BepiColombo MGNS joins the IPN https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/30956.gcn3 - IPN Triangulation of GRB 210927B https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/30993.gcn3 - IPN Triangulation of GRB 211019A https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/31024.gcn3 - IPN triangulation of GRB 211022A https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/31129.gcn3 - IPN triangulation of GRB 211022A https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/31129.gcn3 - IPN triangulation of GRB 211020 Результат получен в рамках: Тема ОСВОЕНИЕ, № 0028-2019-0003, рег. № АААА-

A18-118012290370-6

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия <sup>2</sup>European Space Agency, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands <sup>3</sup>LumMat/RST/AP, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands <sup>4</sup>Gonitec BV, Den Haag, The Netherlands

# Наиболее значимые результаты, готовые к практическому использованию в 2021 году. Завершение поставки и установка на борт комплекса научной аппаратуры космического аппарата «Луна-25»

Коллектив ИКИ РАН

В апреле 2021 года была полностью завершена поставка комплекса научной аппаратуры космического аппарата «Луна-25» (см. рисунок) проекта «Луна-Глоб». В настоящий момент все научные приборы установлены на борт космического аппарата «Луна-25». В состав научной аппаратуры этого космического аппарата входят 9 научных приборов. Это созданные ИКИ РАН в сотрудничестве с другими организациями приборы АДРОН-ЛР, АРИЕС-Л, БУНИ, ЛАЗМА-ЛР, ЛИС-ТВ-РПМ, ЛМК, ПмЛ, СТС-Л и прибор европейского космического агентства Пилот-Д.



**Рисунок.** Космический аппарат «Луна-25» с указанием мест размещения научных приборов

Приборы АДРОН-ЛР, ЛАЗМА-ЛР, ЛИС-ТВ-РПМ должны обеспечить исследования состава (минералогического, химического, элементного, изотопного) реголита лунной поверхности, прибор ЛМК - его физических свойств, приборы ПмЛ и АРИЕС-Л - изучение ионной и нейтральной экзосферы Луны и эффектов взаимодействия поверхности Луны с межпланетной средой. Научная аппаратура СТС-Л предназначена для проведения ТВ-съемки поверхности во время посадки, панорамной съемки поверхности, обстановки и предметов вокруг космического аппарата, стереосъемки и построения 3-D модели участка поверхности для обеспечения работы ЛМК. Прибор БУНИ осуществляет сбор и хранение научной и служебной информации от приборов; прием команд и кода бортового времени от бортового комплекса управления КА; выдачу команд в приборы; контроль

работоспособности приборов. Прибор Пилот-Д является прототипом создаваемой ЕКА системы высокоточной околопланетной навигации и уклонения от опасностей при посадке и устанавливается на борт КА «Луна-25» в качестве демонстратора для отработки технологии такой системы.

Запуск космического аппарата «Луна-25» запланирован на июль 2022 года. Этот проект реализуется по заказу Российской академии наук в рамках Федеральной космической программы 2016–2025 гг. и финансируется Государственной корпорацией «Роскосмос». Космический проект «Луна-25» открывает долгосрочную российскую лунную программу, которая предусматривает миссии по изучению Луны с орбиты и поверхности, забор и возврат лунного грунта на Землю, а также, в перспективе, — строительство посещаемой лунной базы и полномасштабное освоение нашего спутника.

Результаты опубликованы: Астрономический вестник, 2021, Т. 55, № 6.

Результаты получены в рамках: контракт № 47702388027160001160/80/1531-3-2016 от 31.05.2017 (СЧ ОКР «Луна-Глоб-НА-ПсМ») между ИКИ РАН и АО «НПО Лавочкина»; тема ОСВОЕНИЕ, № 0028-2019-0003, рег. № АААА-А18-118012290370-6.

## Наиболее значимые результаты, готовые к практическому использованию в 2021 году. Мониторинг радиационной обстановки при полете космических аппаратов к Марсу

Митрофанов И.Г.<sup>1</sup>, Литвак М.Л.<sup>1</sup>, Малахов А.В.<sup>1</sup>, Санин А.Б.<sup>1</sup>, Мокроусов М.И.<sup>1</sup>, Козырев А.С.<sup>1</sup>, Головин Д.В.<sup>1</sup>, Бахтин Б.<sup>1,2</sup>, Никифоров С. Ю.<sup>1</sup>, Лисов Д.И.<sup>1</sup>, Аникин А.А.<sup>1</sup>, Zeitlin С.<sup>3</sup>, Semkova J.<sup>4</sup>, Koleva R.<sup>4</sup>, Бенгин В.В.<sup>5</sup>, Dachev, T.<sup>4</sup>, Matviichuk Y.<sup>4</sup>, Tomov B.<sup>4</sup>, Krastev

K.<sup>4</sup>, Maltchev S.<sup>4</sup>, Dimitrov P.<sup>4</sup>, Bankov N.<sup>4</sup>, Шуршаков В.И.<sup>5</sup>, Дробышев С.Г.<sup>5</sup>

Анализ данных, полученных российским детектором высокоэнергетических нейтронов ХЕНД, установленным на борту КА НАСА «Марс Одиссей», и болгарским дозиметрический прибором Люлин-МО, входящим в состав российского телескопа нейтронов высокого разрешения ФРЕНД КА ТGO российско-европейского проекта «ЭкзоМарс» показывает, что: 1) экстраполяция данных, полученных во время перелета КА «Марс Одиссей» к Марсу, осуществленного с мая по сентябрь 2001 года в течение периода максимума 23-го солнечного цикла (см. рисунок 1) на солнечный минимум показывает, что мощность эквивалента дозы нейтронов во время полета к Марсу в этот период может достигать 52 мкЗв в день;



**Рисунок 1.** Изменение темпа счета нейтронов в измерениях приборе ХЕНД во время перелета к Марсу. Периоды с различными статистическими вариациями соответствуют различным временам накопления одного кадра получения данных (20 и 60 с)

2) по данным, полученным с мая 2018 г. по декабрь 2019 г. наблюдается зависимость распределения потока ГКЛ от марсианской широты и долготы, что указывает на различие значений эквивалентных доз в различных районах Марса; наблюдается хорошее согласие между измеренными временными профилями скоростей счета ГКЛ блоком Люлин-МО, детекторами нейтронов прибора ФРЕНД и детектором нейтронов высоких энергий ХЕНД на борту КА НАСА «Марс Одиссей» (см. рисунок 2); наблюдается ухудшение радиационной обстановки в межпланетном пространстве в течение этого периода

наблюдений. Оценки показывают, что относительно значений, измеренных во время перелета TGO к Марсу (апрель-сентябрь 2016 г.), поток частиц в свободном межпланетном пространстве в декабре 2019 г увеличился как минимум на 16%, а мощность дозы - на 23%.



**Рисунок 2.** Вариации профилей ГКЛ, измеренных приборами Люлин-МО, ХЕНД и ФРЕНД за период с мая 2018 по декабрь 2019 года

Мощность дозы ГКЛ в свободном пространстве в течение минимума 24-го солнечного цикла, основанная на данных Люлин-МО, значительно выше, чем мощность дозы, измеренная прибором CRaTER на борту КА НАСА LRO в течение минимума 23-го солнечного цикла.

Полученные данные важны для планирования будущих пилотируемых экспедиций к Марсу, в том числе и с точки зрения обеспечения радиационной безопасности космонавтов.

Результаты опубликованы: Litvak M.L., Mitrofanov I.G., et al. Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars, Life Sciences in Space Research, 2021, Volume 29;

Semkova J, Koleva R., et al., Results from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018–December 2019, Icarus, 2021, Volume 361.

Результаты получены в рамках: Тема ОСВОЕНИЕ, № 0028-2019-0003, рег. № АААА-А18-118012290370-6, грант РФФИ 19-52-18009, грант РНФ 19-72-10144

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Leidos, Inc., Houston, TX 77058, USA

<sup>4</sup>Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria <sup>5</sup>Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

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 2021 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.

Полученные важные данные для планирования будущих пилотируемых экспедиций к Марсу, в том числе и с точки зрения обеспечения радиационной безопасности космонавтов (см. выше: Наиболее значимые результаты, готовые к практическому использованию в 2021 году. Мониторинг радиационной обстановки при полете космических аппаратов к Марсу).

В ходе перелета к Меркурию продолжена работа прибора МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) миссии «БепиКоломбо» (подробнее о приборе МГНС см. раздел 4 настоящего Отчета).

21 октября 2021 года МГНС стал частью международной программы IPN (InterPlanetary Network) по локализации источников космических гамма-всплесков. Вместе с МГНС в программе IPN на сегодняшний день участвуют еще пять приборов на бортах различных космических аппаратов.

Вклад МГНС в эту программу состоит в том, что в ходе полета к Меркурию он осуществляет постоянный мониторинг космического гамма-излучения, данные для энергетических спектров которого измеряются каждые 20 секунд на 4071 канале от 250 кэВ до 10 МэВ, а временной профиль - в интегральном диапазоне энергий от 250 до 440 кэВ с временным разрешением 1–5 с.

Используя эти данные, МГНС регистрирует гамма-всплески для последующей локализации их источников в пространстве с помощью метода межпланетной триангуляции на основании его данных и данных других приборов – участников программы. Точность локализации обратно пропорциональна расстоянию между космическими аппаратами, совместно обнаружившими гамма-всплеск.

За короткий срок участия прибора МГНС в программе IPN было опубликовано шесть циркуляров, пять из которых представили данные по локализации космических гамма-всплесков: GRB 211130A (см. рисунок 1.1), GRB 210927B, GRB 211019A, GRB 211022A, GRB 211120A (см. рисунок 1.2).



**Рисунок 1.1** Локализация (слева направо) на небесной сфере источников космических гамма-всплесков GRB 210927B, GRB 211019A, GRB 211022A, GRB 211120A с участием данных приборов МГНС/БепиКоломбо и ХЕНД/Марс Одиссей

Существенным преимуществом МГНС с точки зрения обеспечения точности локализации является его работа на орбите перелета к Меркурию (из пяти других приборов программы четыре работают на околоземной орбите; единственный кроме МГНС прибор программы, работающий не на околоземной орбите – прибор ХЕНД на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей» на околомарсианской орбите; прибор также, как и МГНС,

создан в ИКИ РАН). Благодаря межпланетному расположению данные этих приборов позволяют выполнить локализацию источников всплесков с максимально высоким пространственным разрешением порядка нескольких минут дуги (см. рисунок 1.2).



а

**Рисунок 1.2** Локализация на небесной сфере источника космического гамма-всплеска GRB 211130A: а) без участия прибора МГНС; в) с участием прибора МГНС

в

Всего же за время межпланетного перелета к Меркурию прибор МГНС зарегистрировал 43 подтвержденных другими приборами гамма-всплеска. Для 24 гаммавсплесков, одновременно зарегистрированных приборами МГНС и ХЕНД, было проведено сравнение кривых блеска и получено кольцо локализации источника гамма-всплеска на небесной сфере с точностью в среднем около 13 угловых минут, на уровне достоверности 35. Для 8 из 24 гамма-всплесков было обнаружено оптическое послесвечение, которое было отождествлено с источником соответствующего гамма-всплеска. Локализация этих всплесков на основе данных МГНС и ХЕНД подтвердила координаты источника оптического послесвечения. 8 всплесков были использованы для проверки точности локализации, которая показала, что все источники гамма-всплесков находятся в пределах области локализации МГНС-ХЕНД на уровне значимости 35. Для остальных 16 гамма-всплесков, которые были одновременно зарегистрированы приборами ХЕНД и МГНС, существующая область локализации была сильно уменьшена с нескольких градусов до

нескольких угловых минут (11 гамма-всплесков) или предложена новая область локализации (5 гамма-всплесков).

Как указывалось в предыдущем отчете (см. отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2020 год), прибор МГНС обладает потенциалом и с точки зрения регистрации гамма-излучения солнечных вспышек. Возможность наблюдать последние с разных направлений в Солнечной системе имеет важное значение для дальнейшего понимания их развития и распространения. Преимуществом МГНС является то, что «БепиКоломбо» сейчас направляется во внутреннюю часть Солнечной системы, что потенциально создает возможность получить уникальные данные о солнечной активности с близкого расстояния от звезды. Однако если в 2020 году прибор МГНС событий от солнечных вспышек не зарегистрировал, что объяснялось нахождением Солнца в периоде минимума активности в начале нового 25-го солнечного цикла, то в 2021 году им было зарегистрировано восемь солнечных вспышек (17.04.2021, 07.05.2021, 18.07.2021, 17.09.2021, 28.09.2021, 09.10.2021, 28.10.2021, 10.11.2021), при чем две из них, 18.07.2021 и 10.11.2021, сопровождались корональными выбросами массы. Кроме того, излучение трех солнечных вспышек (18.07.2021, 17.09.2021 и 28.10.2021) было зарегистрировано научными приборами, которые работают на орбите вокруг Марса. Накопление данных по этим событиям, совместная обработка с данными других экспериментов и их интерпретация продолжаться в 2022 году.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.1, 1.3, 1.5, 1.6) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.2-5.26, 5.30, 5.31).

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

Период 2021-2022 гг. должен стать рубежным для реализации отечественной лунной программы – старт космического аппарата «Луна-25», запланированный на октябрь 2021 года и в настоящий момент перенесенный на лето 2022 г. является определяющим для распределения усилий в направлениях исследований по теме в 2021 году.

Так, в 2021 году была продолжена работа по ознакомлению научной общественности с предпосылками, целями и задачами миссии «Луна-25», теоретическими обоснованиям планируемой программы ее научных исследований, научной аппаратурой, установленной на борту космического аппарата и ее задачами, содержанием и итогами наземной экспериментальной отработки научных приборов, изучением основного и запасного района посадки «Луны-25».

Целью проекта являются контактные и дистанционные научные исследования поверхности и внутреннего строения Луны, кратеров в окрестности Южного полюса, разведка природных ресурсов и процессов воздействия на поверхность Луны космических лучей и электромагнитных излучений. Для реализации целей и задач проекта КА «Луна-25» оснащен комплексом научной аппаратуры из 9 научных приборов: ЛАЗМА-ЛР, ЛИС-ТВ-РПМ и АДРОН-ЛР для изучения состава реголита в месте посадки, АРИЕС-Л и ПмЛ для изучения полярной экзосферы в окрестности южного полюса Луны, служебной телевизионной системы СТС-Л, служебного прибора БУНИ для управления научной аппаратурой и сбора информации, манипуляторного комплекса ЛМК и европейской ТВ-камеры Пилот-Д, включенной в состав научной аппаратуры по просьбе Европейского космического агентства для отработки перспективной европейской системы обеспечения высокоточной и безопасной посадки на лунную поверхность.

Уникальный полярный характер миссии, необходимость реализации научных целей и задач проекта и при этом обеспечения безопасности космического аппарата определяют ряд требований к выбору места посадки «Луны-25». Для обеспечения научных исследований аппарат должен совершить мягкую посадку в заранее выбранном районе на поверхности Луны; сохранить работоспособность после пребывания в условиях лунной

ночи; обеспечить энергетические и коммуникационные потребности бортовой научной аппаратуры в течение лунного дня.

Особые требования в соответствии с указанными задачами выдвигаются к освещенности поверхности в месте посадки. При этом необходимо отметить, что данные, имевшиеся на «старте» российского лунного проекта еще не позволяли построить карты залежей льдов вечной мерзлоты и подтвердить (или опровергнуть) гипотезу об их связи с постоянно-затененными районами на дне полярных кратеров (Mitrofanov, Sanin, et al., 2010). Лишь на основании нейтронного картографирования лунной полярной поверхности, выполненной российским нейтронным телескопом ЛЕНД на борту лунного спутника НАСА ЛРО и проведенного теплового моделирования было показано, что полярные районы повышенной концентрации водорода в лунном реголите, обнаруженные ЛЕНДом, не обязательно совпадают с областями постоянно низких температур реголита (см. раздел «Важнейшие результаты» настоящего отчета).

Оказалось, что условие постоянного затенения от солнечных лучей на дне полярных кратеров не является обязательным – водяной лед присутствует в веществе под укрывающим слоем реголита с толщиной порядка от нескольких сантиметров до десятков сантиметров и в тех областях, которые регулярно освещаются Солнцем. Намеченные основной и резервный районы посадки «Луны-25», энергетика которого обеспечивается солнечными батареями, имеют соответственно координаты 69.55° ю.ш., 43.54° в.д. и 68.77° ю.ш., 21.21° в.д., и могут относится к указанным выше областям.

Кроме того, выполнена работа по геоинформационному обеспечению основного и запасного районов посадки КА «Луна-25». Разработаны инженерные модели указанных районов, содержащие сведения о рельефе поверхности, о ее основных морфометрических параметрах, а также об условиях освещенности Солнцем и радиовидимости Земли.

Основой разработанных инженерных моделей стали цифровые модели рельефа (ЦМР) различного пространственного разрешения: GLD100, полученная из наблюдений с широкоугольной камерой WAC (Wide Angle Camera), установленной на борту КА НАСА «ЛРО», DEM (Digital Elevation Model) 30 и DEM 60, полученные по альтиметрическим измерениям с прибором LOLA, так же установленным на борту КА НАСА «ЛРО» (30 и 60 в названии моделей означают пространственное разрешение, 30 и 60 метров соответственно); SLDEM2013, созданная JAXA на основе общирных топографических данных о лунной поверхности, полученных космическим аппаратом «Кагуйя» с учетом данных, полученных с прибором LOLA; NAC\_DTM\_BOGUSLAWSKY1 из специального набора данных SDNDTM (Special Data Record NAC Digital Terrain Map) узкоугольной камеры NAC (Narrow Angle Camera) в составе инструмента LROC (Lunar Reconnaissance

Orbiter Camera) на борту КА НАСА «ЛРО», специально созданная для основного района посадки командой прибора NAC по запросу российских участников исследовательской команды КА «ЛРО». Используя при работе с указанными ЦМР метод сравнительного анализа удалось обеспечить территорию районов посадки данными о рельефе поверхности с разрешением до 2 м для основного района посадки и до 30 м для запасного района посадки.

По всем указанным выше ЦМР было проведено вычисление уклонов поверхности. Было установлено, что значения доли крутых склонов, имеющих уклон более 15° (посадка на склон круче 15° может привести к опрокидыванию КА «Луна-25») составляют менее 1% для основного района посадки и менее 3% для резервного района. Также вычислено, что в пределах обоих районов преобладают склоны с северной и западной экспозициями, тогда как с точки зрения обеспечения оптимального температурного режима КА являются склоны южной, юго-восточной и юго-западной экспозиций. Однако, благодаря небольшим значениям средних уклонов, преобладание склонов северной и западной экспозиций не должно привести к значительному увеличению угла падения солнечных лучей на поверхность участка посадки.

На основе данных ЦМР для характеристики условий освещенности и радиовидимости в точке посадки для обоих районов были построены локальные линии горизонта. В качестве примера были рассчитаны (см. рисунок 2.1) видимые линии горизонта для центра основного района посадки и для точек А (69.88° ю.ш., 43.80° в.д.), В (69.87° ю.ш., 43.01° в.д.), С (69.34° ю.ш., 43.83° в.д.) и D (69.15° ю.ш., 43.34° в.д.) в основном районе посадки. Из рисунка видно, что видимые линии горизонта в пределах основного района посадки имеют существенные отличия. Эти отличия могут быть использованы при определении местоположения КА, севшего на поверхность Луны и передавшего панораму окружающего ландшафта.



**Рисунок 2.1** Видимые линии горизонта для точек внутри основного района посадки КА «Луна-25». Кривая О соответствует видимой линии горизонта в центре основного района посадки

Построение локальных линии горизонта в выбранном месте посадки КА и вычисление с высокой точностью эфемерид Солнца и Земли позволило определить моменты восхода и захода Солнца и, соответственно, продолжительности светлых и темных периодов лунаций, периоды видимости станций космической связи на поверхности Земли, которые, пересекаясь со светлыми периодами лунаций, характеризуют возможность проведения и продолжительность сеансов радиосвязи с Землей в интервалы времени, соответствующие трем лунациям после запуска КА при дате запуска 1 октября 2021 г. В основном районе посадки линия локального горизонта располагается на высотах 0.1°–3.6° в интервале азимутов –90°...+90°. Это обеспечивает приемлемую продолжительность светлого периода лунаций от 12.7 до 14.0 земных суток (43.22–47.36% лунных суток), а суммарное время возможных сеансов связи составляет до 8 ч в сутки и более. Аналогичные показатели определены и для запасного района посадки.

Таким образом, проведенным моделированием подтверждена безопасность посадки в выбранные районы как с точки зрения морфометрических параметров (уклонов и экспозиции), так и с точки зрения условий освещенности и радиовидимости в предполагаемый период работы КА «Луна-25».

Сама посадка должна быть осуществлена примерно в середине лунного дня за 9-10 земных дней до захода Солнца. За это время будет установлена радиосвязь с КА, проведена проверка работоспособности всех бортовых систем аппарата и научных приборов и т.д. Перед наступлением лунной полярной ночи аппарат будет переведен в спящий режим.

После завершения полярной ночи и перехода аппарата в активный режим планируется провести первый сеанс исследований лунного полярного реголита. ЛМК проведет раскопку поверхности и забор грунта, после чего доставит его в прибор ЛАЗМА-ЛР. Прибор ЛИС-ТВ-РПМ измерит спектр ИК–излучения вещества, ранее укрытого верхним слоем. Затем начнется программа исследований природных условий в районе посадки приборами АРИЕС-Л и ПмЛ. Прибор АДРОН-ЛР будет работать в пассивном режиме (без включения импульсного нейтронного генератора) и регистрировать собственное нейтронное и гамма-излучение поверхности Луны в точке посадки. Измеренный спектр гамма-лучей позволит оценить локальный радиационный фон.

Работа в последующие лунации будет аналогична программе второй лунации. В течение всей миссии планируется провести 11 заборов образцов грунта со всей поверхности рабочего поля ЛМК. Это позволит изучить переменность состава на локальных масштабах (порядка 10 см вдоль поверхности и от нескольких см до 25 см по глубине).

На завершающем этапе выполнения программы-минимум будут осуществлены несколько сеансов активного нейтронного зондирования верхнего слоя вещества поверхности импульсным нейтронным генератором прибора АДРОН-ЛР, что позволит оценить доли основных породообразующих элементов до глубины около 60 см и массовую долю воды в верхнем метровом слое.

Необходимо отметить, что заданный срок активного существования космического аппарата «Луна-25» на лунной поверхности составляет 1 год, что делает возможным продолжение научных исследований после завершения программы-минимум.

Из вышеприведенного очевидно, что ключевым элементом миссии должен стать манипуляторный комплекс ЛМК, что в целом отражает общее направление развития космической техники для планетных исследований in situ. Тяжелые марсоходы НАСА «Кюриосити» и ««Персеверанс», марсианская посадочная платформа НАСА «Инсайт», посадочный аппарат Китайского национального космического управления ««Чанъэ-5» оборудованы манипуляторами. Указанные устройства позволяют существеннейшим образом расширить список научных и практических задач, независимо от того, используются они на стационарных платформах или на луноходах. С учетом задач геологоразведки, которые сейчас ставятся перед будущими лунными миссиями и требуют

комплексного исследования различных свойств лунного грунта, использование различных типов манипуляторных устройств будет только расширяться.

Созданный в ИКИ РАН лунный манипуляторный комплекс ЛМК представляет собой легкий (из-за существенных ограничений по массе научной аппаратуры КА «Луна-25»; полная масса ЛМК - 5.5 кг) и компактный (максимальная длина в разложенном состоянии около 1.6 м) манипулятор, вместе с тем способный обеспечить копание лунного реголита на глубину до 25 см, забор, доставку и выгрузку собранных образцов в лазерный ионизационный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР, а так же наведение установленного на ЛМК прибора ЛИС-ТВ-РПМ, объединяющего в себе инфракрасный спектрометр и стереокамеру.

ЛМК состоит из двух штанг, четырех приводов (азимутального, плеча, локтя и запястья), кронштейна для установки ЛИС-ТВ-РПМ, и блока электроники. На конце первой штанги закреплен прибор ЛИС-ТВ-РПМ, на конце второй штанги установлен ковш и грунтозаборник (см. рисунок 2.2).



**Рисунок 2.2** Лунный манипуляторный комплекс ЛМК: 1) азимутальный привод с блоком управления; 2) привод плеча; 3) привод локтя с кронштейном и прибором ЛИС-ТВ-РПМ; 4) привод запястья с ковшом и грунтозаборником

Алгоритмы будущей работы ЛМК на лунной поверхности были отработаны в ходе наземных функциональных испытаний и калибровок. Указанные наземные отработки были разделены на два этапа. Первая часть работ была проведена в нормальных (лабораторных) условиях и в основном касалась отработки кинематической схемы ЛМК. Вторая часть функциональных испытаний была посвящена изучению взаимодействия ЛМК с аналогом мерзлого лунного реголита и проводилась в специальной термовакуумной камере в условиях, приближенных по давлению и температуре к тем, которые ожидаются на лунной поверхности.

Основными целями первого этапы были: создание методики копания и забора грунта; совместные калибровки ЛМК и стереокамеры СТС-Л для выбора места забора грунта по данным фотосъемки лунной поверхности; совместные калибровки ЛМК и стереокамеры СТС-Л для коррекции траектории движения ЛМК при доставке образцов грунта в прибор ЛАЗМА-ЛР; отработка возможных нештатных ситуаций при копании и доставке грунта.

Для испытаний использовался имитатор КА «Луна-25» с установленными на нем технологическим (TO-1) или конструкторско-доводочным (КДО) образцом ЛМК, а также лабораторным образцом стереокамер СТС-Л и габаритными макетами остальных научных приборов. Все указанные задачи были успешно решены.

Особый интерес в рамках первого этапа представляют отработки некоторых нештатных ситуаций, включая сбой движения ЛМК и его столкновение с элементами конструкции КА, застревание ковша при копании траншеи (попадание на большой камень), остановка ГЗУ при погружении в твердый грунт и т.п. На рисунке 2.3 продемонстрировано, как при копании ЛМК наталкивается на массивный камень, который имитирует стальной цилиндр весом 5 кг. В процессе выкапывания камня сработали датчики скорости и запустился итерационный процесс выхода в исходную точку и повторения копания, в ходе которого ЛМК за отведенное время (заложенное на выполнение циклограммы) смог сдвинуть "камень" и произвести забор грунта.



**Рисунок 2.3** Имитация нештатной ситуации: столкновение при копании ковша ЛМК с массивным камнем

Второй этап испытаний для проверки возможностей ЛМК в части копания и забора проб мерзлого лунного реголита проводился в специально созданном криогенном вакуумном стенде КВС. В состав КВС входит криовакуумная камера с герметично подсоединенным к ней криоконтейнером, вакуумная откачная система и криогенная система. Внутренний объем камеры и криоконтейнера образуют единое пространство с объемом около 1 кубического метра, в котором и осуществлялись испытания ЛМК. Внутри криоконтейнера расположен криососуд с внутренним диаметром 500 мм и высотой 520 мм, образованный двумя коаксиально расположенными цилиндрами, в который помещается В пространство, образованное коаксиальными исследуемый образец аналога грунта. цилиндрами криососуда подается хладагент (жидкий азот или его подогретые пары), что обеспечивает захолаживание образца грунта до температуры ниже минус 100°С, поддержание в процессе испытаний температуры на заданном уровне, а также последующий отогрев образца перед вскрытием камеры. Для испытаний использовался специально созданный для этой цели в ГЕОХИ РАН аналог лунного грунта ЛГА-1, в котором не только подобран гранулометрический состав, но также учтена морфология (форма) лунных частиц. При подготовке к испытаниям сухой грунт максимально уплотнялся с добавлением различного количества воды. В итоге были созданы несколько типов грунтов, для которых содержание воды менялось от 0.1 до 1.5% по массовой доле, а плотность – от 1.87 до 1.65 г/см<sup>3</sup>.

В ходе проведенных установлено, что прочностные свойства грунта-аналога лунного реголита существенно зависят от массовой доли водяного льда. Было экспериментально установлено, что уже при значениях массовой доли водяного льда в грунте около 1.5% требуются неоднократные повторяющиеся движения ковша при максимальном усилии на него двигателей. При отработках подобных ситуаций ЛМК на криогенном вакуумном стенде были отработаны специальные алгоритмы движения ковша, которые позволяют преодолевать сопротивление поверхностного слоя.

В итоге функциональных испытаний было подтверждено, что разработана легкая и надежная конструкция ЛМК с достаточными функциональными возможностями для задач исследований проекта «Луна-25». Было показано, что благодаря использованию стереокамер СТС-Л можно построить трехмерную модель рабочей зоны ЛМК; точно связать системы координат СТС-Л и ЛМК и по стереофотографиям поверхности Луны прицельно выбирать различные места копания и забора грунта в пределах рабочей зоны ЛМК; создать циклограмму движения ЛМК по выходу в заданную точку на поверхности. Была откалибрована кинематическая схема ЛМК, позволяющая забирать образцы лунного грунта из рабочей зоны ЛМК с различной глубины (до 25 см) в окрестности посадочного аппарата и доставлять их в приемное окно лазерного ионизационного масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР для последующего элементного и изотопного анализа. Разработана методика работы технологического образца ЛМК с аналогом лунного реголита, замороженного до криогенных температур при низком давлении.

В целом в ходе проведенных в 2021 году работ было обосновано, что несмотря на относительно небольшой состав научных приборов, программа исследований в рамках миссии «Луна-25» сможет предоставить важные и приоритетные сведения о свойствах полярного вещества Луны и полярной экзосферы.

Впервые могут быть получены прямые оценки массовой доли лунной воды в реголите в районе посадки. Сопоставление этих оценок с данными орбитального картографирования позволит уточнить оценки водных ресурсов во всем южном полярном регионе. Измерения состава основных породообразующих и естественных радиоактивных элементов в южном полярном грунте позволят сравнить этот грунт с ранее доставленными на Землю образцами лунного вещества и оценить возможное влияние на этот грунт вещества, выброшенного из гигантского ударного бассейна Южный полюс - Эйткен на обратной стороне Луны.

Изучение динамических процессов в полярной экзосфере позволит впервые детально изучить процессы конденсации и сублимации молекул летучих соединений на

затененной и освещенной поверхностях Луны и также эффекты левитации лунной пыли в течение лунных суток.

Измерения потоков гамма-лучей и нейтронов с лунной поверхности позволят оценить радиационную обстановку в районе посадки под воздействием галактических космических лучей и для условий спокойного и активного Солнца.

Все перечисленные результаты могут оказать существенное влияние на последующие проекты для исследования и освоения Луны как в автоматических миссиях, так и в составе пилотируемых экспедиций.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.2, 2.2-2.4, 3.1, 3.3-3.7) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.17, 5.18, 5.20, 5.24).

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 2021 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 «Кюриосити».

Для последнего предложен перспективный метод оценки содержания водного эквивалента водорода (ВЭВ) по данным нейтронного зондирования. Ключевым элементом метода является использование данных пассивных измерений ДАН, при которых прибор регистрирует поток нейтронного альбедо от поверхности, создаваемый вследствие бомбардировки галактическими космическими лучами (ГКЛ) и облучения от радиоизотопного термоэлектрического генератора (РИТЭГ), установленного на борту марсохода.

Как ранее указывалось (см. отчеты по теме ОСВОЕНИЕ за 2018-2020 гг.) прибор ДАН является детектором тепловых и эпитепловых нейтронов, работающим на борту марсохода НАСА «Кюриосити». ДАН - первый нейтронный спектрометр, доставленный на поверхность Марса. Он начал свою работу сразу после успешной посадки марсохода «Кюриосити» в августе 2012 года и продолжает работать до настоящего времени.

Физическая идея прибора ДАН основана на применении методики нейтронактивационного 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 <sup>3</sup>Не пропорциональные счетчики потоков, замедлившихся в веществе эпитепловых и тепловых нейтронов, которые называются соответственно Counter of Epithermal Neutron (CETN) и Counter of Total Neutron (CTN).

Результаты данных измерений с нейтронным генератором показали высокую эффективность применения этого метода для планетных исследований. На основе активного нейтронного зондирования впервые в практике космических исследований были получены прямые оценки содержания воды и нейтронно-поглощающих элементов (главным образом, хлора) в подповерхностном слое Марса, также были обнаружены

отдельные участки поверхности, в которых содержание воды оказалось неоднородным по глубине. Однако существенной особенностью измерений в активном режиме является запрет на работу генератора во время движения марсохода, который связан с необходимостью исключения возможности сбоев в блоке управления «Кюриосити» под воздействием интенсивного потока нейтронов от генератора. В связи с этим сеансы активных измерений проводятся только на остановках, как правило, в начале и в конце перемещения марсохода от стоянки до стоянки. Эти точки могут быть удалены друг от друга на несколько сотен метров.

Данные активных измерений позволяют определить характерные значения концентрации воды и хлора в веществе поверхности в местах остановок, но по этим данным в принципе нельзя узнать, с каким линейным масштабом изменяется содержание воды в веществе вдоль трассы движения марсохода, и с какими особенностями локального рельефа могут быть связаны эти изменения. Поэтому возможность непрерывных измерений содержания воды вдоль трассы представляет значительный интерес.

После облучения поверхности Марса импульсом от нейтронного генератора в приповерхностном слое грунта нейтроны взаимодействуют с ядрами основных породообразующих элементов и в конечном итоге проникают вглубь вещества или на поверхность. За это время значительная часть нейтронов замедляется до эпитепловых или тепловых энергий, причем доля этих частиц в полном нейтронном потоке и соотношение между потоком послеимпульсного излучения нейтронов эпитепловых и тепловых энергий характеризует эффективность процесса замедления. Такой процесс характеризуется тем, что наиболее эффективным замедлителем нейтронов при столкновениях с ядрами является водород. Чем больше столкновений с водородом испытали нейтроны до их излучения с поверхности, тем большую долю от полного потока составляют тепловые частицы. Основным водородосодержащим химическим веществом в марсианском грунте является вода, поэтому по данным измерений прибора ДАН можно провести оценку количество водяной компоненты грунта в месте измерения.

Кроме воды, данные активных измерений позволяют оценить количество в грунте ядер с большим сечением поглощения тепловых нейтронов. Присутствие в грунте этих ядер слабо влияет на поток эпитепловых нейтронов, но может значительно ослабить излучение тепловых частиц. Оценки показали, что основным поглотителем нейтронов в грунте Марса является хлор, поэтому при обработке данных измерений применяется метод "эквивалентного хлора". Согласно этому методу вещество с заданной долей хлора и составом поглощающих породообразующих элементов представлялось в виде вещества со

стандартным содержанием всех элементом и долей хлора, которая учитывает, как значение хлора, так и отклонения содержания поглощающих элементов в ту или в другую сторону.

Детекторы нейтронов прибора ДАН СЕТN и СТN работают практически постоянно как во время движения, так и во время стоянок. При неработающем генераторе детекторы измеряют потоки эпитепловых и тепловых нейтронов с временным разрешением 20 секунд (пассивные измерения). Это нейтронное излучение возникает на поверхности Марса вследствие того, что источником нейтронов является сам марсоход. На его борту установлен плутониевый радиоизотопный источник РИТЭГ. Плутоний излучает нейтроны с характерными энергиями до 10 МэВ и образует в окрестности марсохода локальное поле нейтронного излучения с постоянной и переменной компонентами. Постоянная компонента связана с прямым потоком нейтронного излучения от плутония и с нейтронами от плутония, которые рассеялись на конструкции РИТЭГ и марсохода. Переменная компонента локального нейтронного поля от плутония связана с нейтронным альбедо вещества поверхности. Величина этой компоненты и соотношение содержания в ней эпитепловых и тепловых нейтронов зависят от состава вещества грунта под марсоходом. Кроме того, сама поверхность испускает нейтронное излучение естественного происхождения, которое возникает в приповерхностном слое под воздействием проникающих сквозь атмосферу галактических космических лучей. Собственное нейтронное альбедо поверхности под воздействием космических лучей также зависит от содержания в веществе водорода и ядер с большим сечением поглощения нейтронов. Именно это нейтронное излучение Марса регистрируется нейтронными приборами ХЕНД и ФРЕНД на марсианских орбитальных аппаратах, и анализ его энергетического распределения и пространственной переменности позволяет оценить содержание воды в приповерхностном слое вещества и построить глобальную карту ее распределения.

Для использования данных пассивных измерений на поверхности Марса необходимо иметь независимые оценки темпа счета собственного нейтронного фона марсохода от прямого излучения РИТЭГ и от потока, рассеянного на конструкции марсохода. Эти измерения фона были проведены в Космическом центре им. Кеннеди при подготовке аппарата к полету.

Для изучения содержания воды в грунте на основе данных пассивных измерений предпочтительной измеряемой величиной является отношение темпов счета тепловых и эпитепловых нейтронов с поверхности  $F = C_{CTN} / C_{CETN}$ . Очевидно, что использование такой относительной величины позволяет в первом приближении скомпенсировать изменение потока нейтронного излучения поверхности как вследствие вариаций потока галактических космических лучей, так и вследствие изменения расстояния от плутониевого источника

нейтронов до поверхности. Полной компенсации указанных переменностей для величины сигнала F не происходит, так как в исходных темпах счета C<sub>CTN</sub> и C<sub>CETN</sub> вклады от локального источника нейтронов и от космических лучей входят независимо.

Физической основой используемого метода оценки содержания воды в подповерхности Марса по пассивным данным прибора ДАН является тот факт, что подповерхностный слой с различным содержанием воды оказывает разный эффект замедления нейтронов в подповерхностном слое и, таким образом, влияет на отношение F. Однако эффект замедления нейтронов также зависит от содержания эквивалентного хлора C1 в подповерхности, поскольку сильные поглотители уменьшают поток тепловых нейтронов. Таким образом, измерения только одного параметра F не позволяют оценить массовые доли двух независимых компонентов грунта – воду и эквивалентный хлор.

Для реализации метода оценки по пассивным измерениям были выбраны все точки активных измерений, для которых модель грунта Марса описывается однородной моделью. Таким образом было отобрано более 450 измерений воды и эквивалентного хлора. Полученные данные разбиты на 10 групп с учетом значений эквивалентного хлора. Каждая хлорная группа содержит около 45 точек, чтобы обеспечить статистически близкое количество значений (см. таблицу 3.1). Для каждого интервала хлора была реализована линейная ортогональная регрессия, аппроксимирующая зависимость результатов измерений активной воды и отношения F:

$$\xi w = A_i * F + B_i \tag{3.1}$$

где «*i*» - это индекс группы от 1 до 10, A<sub>i</sub> и B<sub>i</sub> - наиболее подходящие параметры регрессии для группы.

Для всех групп обнаружена очень высокая степень корреляции между результатами оценки воды ξw, полученным из активных данных, и значениями параметра F, полученного из пассивных данных для того же места измерения. Коэффициенты корреляции относительно высокие, от 0,75 до 0,93.

Таблица 3.1 Эмпирические соотношения между значениями массовых долей воды ξw по данным активных измерений и значений параметра F для 10 групп измерений, соответствующих различным значениям массовых долей хлора до данным активных измерений

Интервал значений	Коэффициенты	Параметр А <sub>і</sub>	Параметр В <sub>і</sub>
массовой доли	корреляции между		
хлора	ξw и F		
0,0-0,59	0,86	$(1,07 \pm 0,09)$	$-(1,55\pm0,27)$
0,59 - 0,69	0,88	$(0,92 \pm 0,06)$	- (0,77 ± 0,21)
0,69 - 0,81	0,86	$(1,03 \pm 0,07)$	$-(0,94\pm0,21)$
0,81 - 0,88	0,84	$(0,88 \pm 0,07)$	$-(0,44\pm0,22)$
0,88 - 0,98	0,75	$(1,08 \pm 0,09)$	$-(0,92\pm0,30)$
0,98 - 1,08	0,85	$(1,01 \pm 0,06)$	- (0,61 ± 0,19)
1,08 - 1,21	0,86	$(1,14 \pm 0,08)$	- (0,91 ± 0,25)
1,21 – 1,34	0,93	$(1,19 \pm 0,05)$	$-(0,90\pm0,15)$
1,34 - 1,63	0,83	$(1,29\pm0,10)$	$-(0,92\pm0,29)$
1,63 - 2,45	0,87	$(1,38 \pm 0,11)$	$-(0,84\pm0,29)$
Уравнение (З	3.1) демонстрирует	основные эмпири	ческие зависимости

предложенного метода, который позволяет оценить локальное содержание воды в грунте под марсоходом с использованием пассивных измерений прибора ДАН. Очевидно, для такой оценки необходимо знать значение эквивалентного хлора для места измерения. Это значение может быть получено непосредственно из результатов активных измерений или может быть известно из результатов других приборов, которые входят в состав марсохода.

Чтобы показать отсутствие систематических ошибок в оценках водного эквивалента водорода по пассивным данным прибора ДАН, была построена зависимость результатов активных измерений и полученных значений при помощи уравнения (3.1) для одних и тех же мест стоянок марсохода. На рисунке 3.1 приведено сравнение таких оценок. Оценка коэффициента корреляции между ними составляет 0,96, что указывает на хорошее согласие. Разброс точек сравнения относительно диагонали составляет относительной погрешности около 18%. Указанную величину можно рассматривать как относительную погрешность оценки массовой доли воды по данным пассивных измерений.



**Рисунок 3.1** Расчетные значения содержания ВЭВ, полученные на основе данных активных и пассивные измерений прибора ДАН, выполненные для одинаковых локаций

Указанный метод был успешно применен для оценки содержания водного эквивалента водорода в период движения марсохода «Кюриосити» приблизительно от 17 км до 23 км (с 1800 по 2900 солы или марсианские сутки работы миссии МСЛ) пути по хребту Веры Рубин и области Гленн Торридон (см. рисунок 3.2). Поверхность последнего представлена в основном глинистыми минералами, тогда как для хребта Веры Рубин характерны в основном гематитовые породы.



**Рисунок 3.2** Карта активных измерений прибора ДАН в период с 1800 по 1900 солы на хребте Веры Рубин и в области Гленн Торридон

Измерения ДАН в области Гленн Торридон показывают заметное увеличение значений ВЭВ по сравнению с данными предыдущих пассивных и активных измерений прибора. Пассивные данные показывают ВЭВ в значениях от 1,4 % массовой доли до 6,3 % массовой доли со средним значением 3,0 % массовой доли на хребте Вера Рубин и от 1,4 % массовой доли до 5,7 % массовой доли со средним значением 3,7 % массовой доли в области Гленн Торридон (см. Рисунок 3.3).



**Рисунок 3.3** Профиль содержания ВЭВ по пассивным измерениям прибора ДАН в период с 1800 по 2900 солы. Черная линия – данные ДАН

Можно предположить, что увеличение ВЭВ может быть связано с увеличением содержания водорода в недрах или с увеличением эффективного значения хлора, основанного на однородной модели грунта. Распределения эффективного хлора для хребта Веры Рубин и области Гленн Торридон не показывают заметной разницы между ними (см. рисунок 3.4) в отличии от значений ВЭВ (см. рисунок 3.5).



**Рисунок 3.4** Распределение эффективного хлора по данным активных измерений ДАН для областей хребтом Веры Рубин (зеленая линия) и области Гленн Торридон (серая линия).



**Рисунок 3.5** Распределение ВЭВ по данным пассивных измерений ДАН для областей хребтом Веры Рубин (коричневая линия) и области Гленн Торридон (синяя линия)

Соответственно, можно предположить, что область Гленн Торридон имеет гораздо большие значения водного эквивалента водорода, чем нежели чем те, которые измерялись прибором ДАН в каких-либо областях раньше. И, возможно, это может указывать на присутствие в нем гидратированных минералов, что ранее наблюдалось по данным прибора CRISM.

При всех своих неоспоримых достоинствах предложенный метод имеет один недостаток. Согласно численному моделированию, размер измеренного "пятна" во время пассивных измерений составляет около 3 метров в диаметре, что создает определенные сложности для интерпретации полученных данных в случаях, когда путь марсохода не линеен или, когда марсоход движется по кругу (в качестве примера см. путь марсохода на рисунке 3.6). Таким образом, несколько разных пиков на профиле вдоль пути «Кюриосити» могут быть связаны с одними и теми же локальными участками с высоким содержанием воды, несколько раз пересеченными марсоходом. Чтобы корректно учесть такие сложные элементы пути, было предложено создать пиксельное представление пассивных данных (рисунок 3.6). На основе численного моделирования для размера излучающей области отдельный пиксель для усреднения данных был выбран в виде квадрата размером 6х6 метров.



**Рисунок 3.6** Пиксельное отображение значений ВЭВ Белой линией указан центр пути марсохода «Кюриосити»

Пиксельное отображение ВЭВ позволяет значительно лучше интерпретировать локальные участки с повышенным содержанием воды в соответствии с геоморфологическими изменениями поверхности. Оба типа оценки ВЭВ на основе пассивных данных являются согласованными и могут использоваться параллельно в зависимости от типа анализа.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 3.2) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.1, 5.19, 5.21 - 5.23, 5.27-5.29, 5.32, 5.33).

## 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 2021 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 Міо, 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 СеВг<sub>3</sub>, обладающий максимально достижимым на сегодня среди сцинтилляционных кристаллов спектральным разрешением и эффективностью регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 250 кэВ – 10 МэВ.



**Рисунок 4.1** Профили потока быстрых нейтронов (Fast neutron) от Венеры (а) и от Меркурия (б) по данным измерений прибора МГНС во время пролетов космического комплекса «БепиКоломбо» в окрестности этих планет. Пунктир означает момент наибольшего сближения с планетой

За время полета в 2021 году «БепиКоломбо» совершил пролет у Венеры 10 августа 2021 года и у Меркурия 1–2 октября 2021 года. В ходе последнего минимальное расстояние до поверхности планеты составило всего 199 км. Во время этих пролетов МГНС зарегистрировал потоки собственного излучения нейтронов и гамма-лучей, которые возникают в результате взаимодействия галактических космических лучей с верхними слоями атмосферы Венеры и поверхности Меркурия (рисунок 4.1).



**Рисунок 4.2** Сопоставление потоков нейтронного излучения Марса и Венеры по данным прибора МГНС во время пролетов космического комплекса «БепиКоломбо» в окрестности этих планет

Анализ полученных данных показал значительное отличие энергетических спектров потоков нейтронов от этих двух планет, вызванное различием состава вещества в указанных слоях (рисунок 4.2).

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.1, 1.4, 1.5).

## 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 2021 году были продолжены ранее начатые работы в области разработки новых образцов ядерно-космических приборов и новых детекторных сборок для перспективных космических миссий.

Описана методика проведения измерений и представлены основные научные задачи прибора АДРОН-ЛР созданного для отечественного лунного аппарата «Луна-25», приведено описание прибора. Представлены результаты наземных отработок активного детектора нейтронов и гамма-лучей АДРОН-ЛР с моделями лунного грунта с различным содержанием водорода.

Научная аппаратура АДРОН-ЛР разработана в ИКИ РАН на основе опыта создания приборов ДАН для марсохода НАСА «Кюриосити», который успешно работает на поверхности Марса с августа 2012 г. (см. раздел 3 настоящего отчета), и МГНС для межпланетного аппарата ЕКА «БепиКоломбо» для исследования Меркурия (см. раздел 4 настоящего отчета). Основной научной задачей космического эксперимента АДРОН-ЛР является определение элементного состава лунного грунта и содержания воды на глубине до 1 м (вероятно, в форме льда) в поверхностном слое грунта на месте посадки.

Прибор АДРОН-ЛР состоит из блока детекторов и электроники с гамманейтронным спектрометром и блока импульсного нейтронного генератора ИНГ-10Л (см. рисунок 5.1). Суммарная масса прибора составляет 6.1 кг. Энергопотребление в активном режиме нейтронного зондирования не превышает 20 Вт.

В активном режиме работы прибора АДРОН-ЛР блок ИНГ излучает нейтронные импульсы, облучая быстрыми нейтронами поверхность под прибором. В результате взаимодействия с ядрами основных породообразующих элементов нейтроны теряют свою энергию до эпитепловых и тепловых значений. Часть нейтронов вылетает обратно из-под поверхности и регистрируется нейтронными детекторами АДРОН-ЛР в виде временного отклика (кривая затухания с характерной длительностью в сотни микросекунд). Процесс замедления быстрых нейтронов в облучаемом грунте определяется наличием ядер легких элементов, в особенности водорода, поскольку его масса близка к массе нейтрона и передача энергии при рассеянии наиболее эффективна. Разная концентрация и распределение по глубине ядер водорода существенно влияют на процесс замедления, что проявляется в виде значительных вариаций амплитуды и формы временного профиля

выходящих нейтронов и позволяет оценить содержание воды в приповерхностном слое грунта (до глубин порядка 1 м).



**Рисунок 5.1** Блок детекторов и электроники (слева) и блок нейтронного генератора прибора АДРОН-ЛР (справа)

При облучении поверхности нейтронами высоких энергий также возникает гаммаизлучение с определенным набором гамма-линий в зависимости от типа ядерной реакции и от состава породообразующих элементов. Помимо этого, в процессе облучения вещества образуются радиоактивные изотопы различных элементов, которые, распадаясь на временных масштабах от минут до часов после активации нейтронами, также излучают гамма-линии определенных энергий.

Для регистрации гамма-излучения используется сцинтилляционный детектор на основе кристалла LaBr<sub>3</sub>(Ce). Для спектрометрии используются 4096 спектральных каналов, покрывающих диапазон от 200 кэВ до 10 МэВ. При работе в активном режиме используются 64 логарифмических временных интервалов для записи гамма-спектров с различными временными задержками по отношению к моменту излучения нейтронного импульса блоком ИНГ-10Л. Одно измерение формируется на основе суммирования

спектров излучения в отдельных временных интервалах от большого числа импульсов от ИНГ-10Л. Нейтроны регистрируются двумя пропорциональными счетчиками на основе <sup>3</sup>Не с давлением 20 атмосфер, которые способны регистрировать нейтроны с энергией от долей эВ до 1 кэВ по реакции захвата <sup>3</sup>He(n,p)<sup>3</sup>H. Один из счетчиков окружен кадмиевым экраном, который не пропускает тепловые нейтроны с энергией менее 0.4 эВ. Таким образом, первый нейтронный детектор регистрирует все нейтроны в диапазоне от тепловых энергий до 1 кэВ, а второй – только эпитепловые нейтроны с энергией выше 0.4 эВ. Поэтому разница в темпе счета между двумя нейтронными детекторами соответствует вкладу тепловых нейтронов.

Блок импульсного нейтронного генератора ИНГ-10Л представляет собой отдельное устройство, соединенное с блоком нейтронного и гамма-спектрометра с помощью двух межблочных кабелей (питания и телеметрии). Блок ИНГ-10Л имеет в своем составе нейтронную трубку и высоковольтную электронику для выработки ускоряющего напряжения~120 кэВ. Импульс нейтронов с энергией 14 МэВ генерируется при столкновении ускоренных ионов дейтерия с мишенью из трития в результате ядерной реакции D + T = <sup>4</sup>He + n. ИНГ-10Л способен вырабатывать нейтронные импульсы с интенсивностью до 10<sup>7</sup> нейтронов в импульсе и с частотой до 10 Гц. Длительность (полная ширина на полувысоте) отдельного импульса составляет около 1 мкс. Блок ИНГ-10Л духова.

Наземные отработки эксперимента АДРОН-ЛР для различных моделей планетного вещества (из стекла и полиэтилена в качестве имитатора воды с различными вариантами расположения и толщины) в качестве облучаемой "толстой мишени" проводились в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) на специально созданном экспериментальном стенде. При проведении физических измерений взаимное расположение блоков прибора и их высота над поверхностью полностью соответствовали конфигурации прибора на поверхности предполагаемой Луны. Эксперименты сопровождались численным моделированием кривых затухания нейтронов и гаммаизлучения при воздействии нейтронных импульсов от ИНГ-10Л на модель лунного грунта с помощью специализированного пакета программ МСNPX. Наземные отработки подтвердили высокую чувствительность метода активного нейтронного зондирования для оценки содержания воды и основных породообразующих элементов в планетном веществе.

Технические решения, отработанные в приборе АДРОН-ЛР, найдут свое применение в создаваемом приборе БТН-М2. Так, в нем будет применена электроника

спектрометра с быстрой обработкой сигнала, ранее примененная в АДРОН-ЛР для задач регистрации космических и земных гамма-вспышек.

Прибор БТН-М2 (см. рисунок 5.2) предназначен для установки на борту Международной космической станции и создается для проведения второго этапа эксперимента БТН-Нейтрон.



Рисунок 5.2 Внешний вид аппаратуры БТН-М2 без защитных экранов

В ходе этого этапа должны быть решены следующие задачи: проведение исследований радиационно-защитных свойств различных материалов для разработки эффективной радиационной защиты на борту перспективных космических аппаратов и для создания радиационных убежищ для будущих пилотируемых экспедиций на Луну и Марс; создание инженерной модели радиационного фона нейтронов как внутри гермоотсеков российского сегмента МКС, так и снаружи в различных условиях полета МКС на околоземной орбите по данным как уже установленного на борту МКС прибора БТН-М1, так и БТН-М2; регистрация гамма-лучей и нейтронов во время солнечных вспышек и солнечных протонных событий (совместно с БТН-М1); регистрация наземных гаммавспышек (НГВ) и измерение спектров гамма-лучей этих событий, проверка гипотезы о наличии у части НГВ компоненты нейтронного излучения; регистрация космических гамма-всплесков.

При разработке прибора использовались решения, хорошо зарекомендовавшие себя в предыдущих разработках. Так, в качестве детекторной части используется нейтронный и гамма-спектрометр МГНС для Европейской миссии БепиКоломбо с заимствованиями от летного образца прибора АДРОН-ЛР.

Детектирование нейтронов низких энергий производится с помощью трех сенсоров, которые имеют одинаковые гелиевые счетчики фирмы LND 25169 с давлением газа 20 атмосфер и различные конструкции внешних частей, обеспечивающие детектирование нейтронов разных энергий.

Сцинтилляционный детектор нейтронов высоких энергий 0.1-8 МэВ выполнен на основе составного детектора из стильбена и органического пластика с ФЭУ Hamamatsu R5611. В данном детекторе применена схема дискриминации сигналов по форме для разделения нейтронных событий в сцинтилляторе от событий заряженных частиц. Таким образом, своими нейтронными детекторами прибор покрывает энергетический диапазон энергий от 0.025 эВ до 8 мэВ.

В сцинтилляционном гамма детекторе используется кристалл бромида церия CeBr3 размером 3x3 дюйма. На данный момент этот сцинтиллятор имеет одно из наилучших спектральных разрешений из всех сцинтилляционных детекторов. Устройством считывания сигнала является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с усиленной прочностью Hamamatsu R1307. Данная пара «детектор-ФЭУ» уже неоднократно демонстрировала в нескольких предыдущих разработках свою надежность, низкий собственный шум и спектральное разрешение на уровне 4.3% на 662 кэВ.

Электронным ядром прибора является программируемая логическая интегральная микросхема (ПЛИС) фирмы Actel объемом 3 млн. вентилей.

Одной из важнейших новых частей конструкции прибора являются съемные экраны (см. рисунок 5.3), которые содержат внутри себя сборки материалов для исследования их защитных свойств от нейтронного излучения. На начальном этапе эксперимента с аппаратурой БТН-М2 будет применяться первая серия экранов из слоя полиэтилена высокого давления, работающего как замедлитель нейтронов, и слоя порошка изотопа бора <sup>10</sup>В, работающего как поглотитель нейтронов низких энергий. В дальнейшем, с учетом данных измерений, планируется создать вторую серию экранов с возможным увеличением толщины слоев и/или добавлением слоев из других веществ, поглощающих нейтроны.



Рисунок 5.3 Внешний вид защитного экрана

На данный момент опытный образец аппаратуры БТН-М2 проходит полный цикл конструкторско-доводочных испытаний (КДИ), включающий вибрационные, ударные, климатические испытания, а также испытания на электромагнитную совместимость. Начало работы штатного образца аппаратуры (ШО) на борту модуля МКС «Наука» запланировано на 2023-2024 год.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 2.1, 2.5) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.25, 5.26).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2021 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 2021 году было продолжено изучение небесных тел Солнечной системы, в том числе и с учетом перспектив их народно-хозяйственного освоения.

Наиболее важным результатом стал вывод об отсутствии обязательного совпадения районов на дне постоянно затененных полярных кратеров с районами лунной вечной мерзлоты. Установлено, что такие районы могут регулярно освещаться Солнцем в течение продолжительных периодов лунных суток. Этот вывод имеет принципиальное значение для выбора районов посадки российского автоматического космического аппарата «Луна-25».

В целом основной вектор работ был направлен на «лунную» тематику, что объясняется переходом подготовки старта миссии «Луна-25» в финальную стадию. Завершена установка на борту космического аппарата научной аппаратуры, продолжалось изучение будущих основного и запасного районов посадки, ознакомление научной общественности с историей, целями и задачами миссии, планом научных исследований. Продолжалось создание перспективных приборов для исследований лунного грунта.

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.

Важный результатом стало присоединение прибора МГНС к международной программе IPN (InterPlanetary Network) по локализации источников космических гаммавсплесков, что имеет значительный потенциал с точки зрения увеличения точности результатов локализации последних.

Велась разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики, обобщался накопленный опыт создания таких приборов для использования в будущих межпланетных миссиях.

В рамках исследований по теме ОСВОЕНИЕ подготовлено 18 статей, из которых 15 опубликованы и 3 поступили в редакции (см. список источников).

Из вышеуказанных публикаций 6 подготовлены в периодических изданиях, имеющих квартиль Q1, 5 – Q3 и 7 публикаций осуществлено в сборниках материалов.

О полученных результатах было сделано 18 докладов на научных конференциях и разослано 15 циркуляров.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список подготовленных в 2021 г. работ:

Всего подготовлено научных публикаций в 2021 г: 55 (из них опубликовано 52, подготовлено к печати 3)

Статьи в зарубежных изданиях: 9 (из них 1 выполнена при поддержке РФФИ и 2 - РНФ); Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 7 (из них 2 при поддержке РНФ);

Публикации в сборниках и материалах конференций: 8 (из них 1 при поддержке РНФ); Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 9 (из них 1 выполнена при поддержке РФФИ и 2 - РНФ);;

Доклады и циркуляры: 33

- 1 Статьи в зарубежных изданиях
- 1.1 Benkhoff, J., Murakami, G., Baumjohann W., Besse S., Bunce E., Casale M., Cremosese G., Glassmeier K.-H., Hayakawa H., Heyner D., Hiesinger H., Huovelin J., Hussmann H., Iafolla V., Iess L., Kasaba Y., Kobayashi M., Milillo A., Mitrofanov I. G., Montagnon E., Novara M., Orsini S., Quemerais E., Reininghaus U., Saito Y., Santoli F., Stramaccioni D., Sutherland O., Thomas N., Yoshikawa I., Zender J. BepiColombo Mission Overview and Science Goals. Space Science Reviews, 217, 90 (2021) https://doi.org/10.1007/s11214-021-00861-4 ; (Q1)
- Glaser P., Sanin A., Williams J.-P., Mitrofanov I., Oberst J. Temperatures near the lunar poles and their correlation with hydrogen predicted by LEND. Journal of Geophysical Research: Planets, 2021, 126(9), <u>https://doi.org/10.1029/2020JE006598</u>; (Q1)
- 1.3 Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Bakhtin B., Golovin D.V., Zeitlin C. Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars. Life Sciences in Space Research, 2021, Volume 29, (частично выполнена при поддержке РФФИ) <u>https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.03.003</u>; (Q1)
- Mangano, V., Dósa, M., Fränz, M. ... Kozyrev A., Mitrofanov I. et al. BepiColombo Science Investigations During Cruise and Flybys at the Earth, Venus and Mercury. Space Science Reviews, 217, 23 (2021). <u>https://doi.org/10.1007/s11214-021-00797-9</u>; (Q1)

- 1.5 Mitrofanov, I.G., Kozyrev, A.S., Lisov, D.I. D. I. Lisov, M. L. Litvak, A. A. Malakhov, M. I. Mokrousov, J. Benkhoff, A. Owens, R. Schulz & F. Quarati. The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) Onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission: Design Updates and First Measurements in Space. Space Science Reviews ,217, 67 (2021). <u>https://doi.org/10.1007/s11214-021-00842-7</u>; (Q1)
- 1.6 Svinkin, D., Frederiks, D., Hurley, K., ... Mitrofanov, I.; Litvak, M.; Sanin A., Kozyrev, A.; Golovin, D. et al. A bright γ-ray flare interpreted as a giant magnetar flare in NGC 253. Nature 589, 211–213 (2021). <u>https://doi.org/10.1038/s41586-020-03076-9</u>; (Q1)
- 2 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах
- 2.1 Головин Д. В., Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Козырев А. С., Литвак М. Л., Малахов А. В., Никифоров С. Ю., Санин А. Б., Бармаков Ю. Н., Боголюбов Е. П., Шоленинов С. Э., Юрков Д. И. Прибор АДРОН-ЛР для активного нейтронного зондирования состава лунного вещества. Астрономический вестник, 2021, Т. 55, № 6, стр. 542-549, https://doi.org/10.31857/S0320930X21060049; (Q3)
- 2.2 Дьячкова М. В., Митрофанов И. Г., Санин А. Б., Литвак М. Л., Третьяков В. И. Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25. Астрономический вестник, 2021, Т. 55, № 6, стр. 522-54, <u>https://doi.org/10.31857/S0320930X21060037</u>; (Q3)
- 2.3 Литвак М. Л., Козлова Т. О., Ильин А. Г., Киселев А. Б., Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Носов А. В., Папко В. Ф., Третьяков В. И., Яковлев В. А., Слюта Е. Н., Гришакина Е. А., Маковчук В. Ю. Наземные отработки лунного манипуляторного комплекса проекта Луна-25. Астрономический вестник, 2021, Т. 55, № 6, стр. 618-632, https://doi.org/10.31857/S0320930X21060062; (Q3)
- 2.4 Митрофанов И. Г., Зеленый Л. М., Третьяков В. И., Калашников Д. В. Луна-25: первая полярная миссия на Луну. Астрономический вестник, 2021, Т. 55, № 6, стр. 497-508, <u>https://doi.org/10.31857/S0320930X21060098</u>; (Q3)
- 2.5 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.Н., Санин А.Б., Третьяков В.И. Второй этап космического эксперимента «БТН Нейтрон» на борту российского сегмента международной космической станции: аппаратура БТН-М2. Космические исследования, направлена в редакцию (Q3)

- 3 Публикации в сборниках и материалах конференций
- 3.1 Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И. Характеристика основного и запасного районов посадки космического аппарата «Луна-25». XVIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2021, С. 74.
- 3.2 Никифоров С.Ю., Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Лисов Д.И., Санин А.Б. Оценка содержания воды в марсианском грунте вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити» по данным пассивных измерений прибора ДАН. XVIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2021, С. 88.
- 3.3 Носов А.В., Литвак М.Л., Козлова Т.О. Создание и отработка макетов глубинных грунтозаборный устройств для миссии Луна-27. XVIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2021, С. 111.
- 3.4 Перхов А.С., Литвак М.Л. Разработка перспективных прототипов устройств для предобработки, подготовки лунного грунта и их последующей передачи в аналитические приборы на борту будущих лунных миссий. XVIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2021, С. 112.
- 3.5 Прохоров В.Г., Зеленый Л.М., Литвак М.И., Малахов А.В., Митрофанов И.Г., Третьяков В.И. Научная аппаратура первого российского лунного посадочного аппарата Луна-25. Задачи и планируемая программа научных исследований. Седьмая Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов» Сборник трудов. Статья передана в печать.
- 3.6 Третьяков В.И., Зеленый Л.М., Митрофанов И.Г., Петрукович А.А. Российская лунная программа: автоматические аппараты для изучения полярных регионов Луны, как предшественники пилотируемых полетов для ее освоения. Седьмая Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов» Сборник трудов. Статья передана в печать.

3.7 Яковлев В.А., Литвак М.Л., Козлова Т.О., Носов А.В. Проведение наземных экспериментов по определению возможностей лунного манипуляторного комплекса при работе в лунных условиях. XVIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2021, С. 112.

4Статьи, выполненные при поддержке РНФ и РФФИ

- 4.1 Аникин А.А., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Санин А.Б., Мокроусов М.И., Никифоров С.Ю. Экспериментальная установка для калибровки перспективного космического гамма-спектрометра с меченными заряженными частицами для изучения элементного состава вещества Луны, Марса, и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой. XVIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г., под. ред. А.М. Садовского М., 2021, С. 93.
- 4.2 Anikin, A.A., Djachkova, M.V., Litvak, M.L. et al. A Promising Experiment with a Gamma Ray Spectrometer Onboard a Mobile Spacecraft to Study the Elemental Composition of the Moon, Mars, and Other Celestial Bodies without an Atmosphere or with a Thin Atmosphere. Cosmic Res 59, 30–35 (2021). https://doi.org/10.1134/S0010952521010019; (Q2)
- 4.3 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 experiment for spectrometry of planetary gamma-rays with tags of Galactic Cosmic Rays producing them, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1003, 2021, https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165286; (Q1)
- 4.4 Semkova, J.; Koleva, R.; Krastev, K.; Benghin, V.; Dachev, T.; Matviichuk, Y.; Tomov, B.; Maltchev, S.; Dimitrov, P.; Bankov, N.; Mitrofanov, I.; Malakhov, A.; Golovin, D.; Mokrousov, M.; Sanin, A.; Litvak, M.; Zelenyi, L.; Shurshakov, V.; Drobyshev, S. Results from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018 December 2019, Icarus, 2021, Volume 361, <a href="https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114264">https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114264</a>. (Q1)

#### 5 Доклады, тезисы, циркуляры

- 5.1 Golovin, D., Mitrofanov, I., Litvak, M., Sanin, A., and Malakhov, A.: Annual variations of Mars atmosphere, as seen by HEND data since 2002, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-11879, <u>https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11879</u>;
- 5.2 Hurley, K. ; Svinkin, D. ; Frederiks, D. ; Aptekar, R. ; Golenetskii, S. ; Lysenko, A. ; Tsvetkova, A. ; Ulanov, M. ; Cline, T. ; Mitrofanov, I. ; Golovin, D. ; Kozyrev, A. ; Litvak, M. ; Sanin, A. ; Goldstein, A. ; Briggs, M. ; Wilson-Hodge, C. ; von Kienlin, A. ; Zhang, X. ; Rau, A. Savchenko, V. ; Bozzo, E. ; Ferrigno, C. ; Ubertini, P. ; Bazzano, A. ; Barthelmy, S. ; Cummings, J. ; Krimm, H. ; Palmer, D. ; Boynton, W. A bright gamma-ray flare interpreted as a giant magnetar flare in NGC 253. Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 53, No. 1 e-id 2021n1i340p06 https://baas.aas.org/pub/2021n1i340p06/release/1;
- 5.3 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 210511B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30002 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30002.gcn3;
- 5.4 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team IPN triangulation of GRB 210124B (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 29355 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/29355.gcn3;
- 5.5 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB

210204A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 29408 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/29408.gcn3;

- 5.6 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 210324C. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 29727 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/29727.gcn3;
- 5.7 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 210427A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 29997 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/29997.gcn3;
- 5.8 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 210518A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30053 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30053.gcn3;
- 5.9 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 210524A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30076 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30076.gcn3;
- 5.10 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN

triangulation of GRB 210606B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30154 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30154.gcn3;

- 5.11 Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; Ridnaia, A.; Golenetskii, S.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Lysenko, A.; Cline, T.; Konus-Wind Team; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; Fermi-Grb Team; von Kienlin, A. Zhang, X.; Rau, Q.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C.; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Tohuvavohu, A.; Swift-Bat Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grb-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 210925B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30890 <u>https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30890.gcn3;</u>
- 5.12 Hurley, K. ; IPN Team ; Kozyrev, A. S. ; Golovin, D. V. ; Litvak, M. L. ; Mitrofanov, I. G. ; Sanin, A. B. ; MGNS/BepiColombo team ; Benkhoff, J. ; BepiColombo team. BepiColombo MGNS joins the IPN. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30949 <u>https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30949.gcn3</u>;
- 5.13 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V.; Litvak, M. L.; Mitrofanov, I. G.; Sanin, A. B.; Benkhoff, J.; Hurley, K.; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Lysenko, A.; Cline, T.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 211120A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 31129, #1 (2021) <u>https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31129.gcn3</u>;
- 5.14 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V.; Litvak, M. L.; Mitrofanov, I. G.; Sanin, A. B.; Mgns/Bepicolombo Team; Hend/Mars Odyssey Team; Benkhoff, J.; Bepicolombo Team; Hurley, K.; Ipn; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Lysenko, A.; Cline, T.; Konus-Wind Team; Goldstein, A.; Briggs, M. S. Wilson-Hodge, C.; Fermi Gbm Team ; von Kienlin, A. ; Zhang, X. ; Rau, A. ; Savchenko, V. ; Bozzo, E. ; Ferrigno, C.; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Tohuvavohu, A.; Swift-Bat Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN Triangulation of GRB 210927B. GRB Coordinates Network, Circular Service. No. 30956 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30956.gcn3;
- 5.15 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V.; Litvak, M. L.; Mitrofanov, I. G.; Sanin, A. B.; Mgns/Bepicolombo Team; Hend/Mars Odyssey Team; Benkhoff, J.; Bepicolombo Team; Hurley, K.; Ipn; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Lysenko, A.; Cline, T.; Konus-Wind Team; Goldstein, A.; Briggs, M. S. Wilson-Hodge, C.; Fermi Gbm Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno,

C. ; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team ; Boynton, W. ; Fellows, C. ; Harshman, K. ; Enos, H. ; Starr, R. ; Grs-Odyssey Grb Team. IPN Triangulation of GRB 211019A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30993 <u>https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/30993.gcn3;</u>

- 5.16 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V.; Litvak, M. L.; Mitrofanov, I. G.; Sanin, A. B.; Mgns/Bepicolombo Team; Hend/Mars Odyssey Team; Benkhoff, J.; Bepicolombo Team; Hurley, K.; Ipn; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Lysenko, A.; Cline, T.; Konus-Wind Team; von Kienlin, A.; Zhang, X. Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C.; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Tohuvavohu, A.; Swift-Bat Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB GRB Network. 211022A. Coordinates Circular Service. No. 31024 https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/31024.gcn3;
- 5.17 Li, Y.; Basilevsky, A. T.; Kreslavsky, M. A.; Sanin, A. B.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L. Analysis of Surface Roughness vs WEH Values in the Regolith of the Lunar South Pole Area. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.1871 <a href="https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1871.pdf">https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1871.pdf</a>;
- 5.18 Litvak, M. L.; Kozlova, T. O.; Mitrofanov, I. G.; Kozyrev, A. S.; Il'in, A. G.; Nosov, A. V.; Tretyakov, V. I.; Yakovlev, V. The Sampling Acquisition Instrumentation for the Lunar Missions. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.2045 <a href="https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2045.pdf">https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2045.pdf</a>;
- 5.19 Litvak, M. L. ; Mitrofanov, I. G. ; Sanin, A. B. ; Bakhtin, B. N. ; Golovin, D. ; Zeitlin, C. The Measurements of Neutron Radiation Dose During Mars Odyssy Cruise to Mars. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.2058 <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2058.pdf</u>;
- 5.20 Litvak, M., Mitrofanov, I., Zelenyi, L., Tretyakov, V., Kozlova, T., Mokrousov, M., Kozyrev, A., Nosov, A., and Yakovlev, V.: ROBOTS for MOON EXPLORATION, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-11190, <a href="https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11190">https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11190</a>;
- 5.21 Malakhov, A. V.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Golovin, D. V.; Djachkova, M. V.; Nikiforov, S. Yu.; Anikin, A. A.; Lisov, D. I.; Lukyanov, N. V.; Mokrousov, M. I. Areas with Enhanced Water Content Observed in Equatorial Areas of

Mars Trough TGO's FREND Neutron Telescope. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.2015 <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2015.pdf;</u>

- 5.22 Malakhov, A., Mitrofanov, I., Litvak, M., Sanin, A., Golovin, D., Djachkova, M., Nikiforov, S., Anikin, A., Lisov, D., Lukyanov, N., and Mokrousov, M.: High Water Content Areas Identified In Equatorial Band of Mars by FREND Neutron Telescope Onboard ExoMars TGO, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-8797, <u>https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8797</u>;
- 5.23 Martinez-Sierra, L. M. ; Jun, I. ; Ehresmann, B. ; Hassler, D. ; Litvak, M. L. ; Mitrofanov, I. G. ; Zeitlin, C. The martian neutron environment depends on the galactic cosmic rays, atmospheric conditions, and solar cycle phase. Data from Mars spacecraft (orbiter and rover) helps us understand the neutron flux intensity and evolution. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.1020 <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1020.pdf;</u>
- 5.24 Mitrofanov, I. G.; Tretyakov, V. I.; Zelenyi, L. M. Mission of Luna-25, as the First Step of Russian Robotic Moon Exploration Program. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.2032 <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2032.pdf</u>;
- 5.25 Mokrousov, M. I.; Golovin, D. V.; Mitrofanov, I. G.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Malakhov, A. V.; Sanin, A. B.; Tretyakov, V. I.; Anikin, A. A. ADRON Instrument for Future Missions to Moon and Mars: Active Gamma-Ray Sensing of Shallow Subsurface.
  52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.1952
  https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1952.pdf;
- 5.26 Mokrousov, M., Golovin, D., Mitrofanov, I., Kozyrev, A., Litvak, M., Malakhov, A., Sanin, A., Tretyakov, V., and Anikin, A.: ADRON instrument for future missions to Moon and Mars: active neutron and gamma-ray spectroscopy, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-11505, <u>https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11505;</u>
- 5.27 Nikiforov, S. Y.; Djachkova, M. V.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L.; Lisov, D. I.; Sanin, A. B. Water Estimation in Vera Rubin Ridge and Glen Torridon Based on Measurements of the MSL/DAN Instrument. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.2152, <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2152.pdf;</u>

- 5.28 Nikiforov, S. Y.; Djachkova, M. V.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L.; Lisov, D. I.; Sanin, A. B. Pixel Map Interpretation of the MSL DAN Passive Measurements. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.2159. <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2159.pdf;</u>
- 5.29 Nikiforov, S., Djachkova, M., Mitrofanov, I., Litvak, M., Lisov, D., and Sanin, A.: Estimation of Water Content in Vera Rubin Ridge and Glen Torridon areas Based on Measurements of the MSL/DAN Instrument in Gale crater, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-11196, <u>https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11196</u>;
- 5.30 Sanin, A. B.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L. Updated LEND Hydrogen Mapping in the Lunar Southern Polar Region. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15-19 March, 2021. LPI Contribution No. 2548, id.1966 <u>https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1966.pdf;</u>
- 5.31 Sanin, A., Mitrofanov, I., and Litvak, M.: Updated Mapping of Hydrogen in the Lunar Southern Polar Regions according to LEND/LRO data, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10440, <u>https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10440</u>;
- 5.32 Svedhem, H., Vandaele, A., Korablev, O., Mitrofanov, I., and Thomas, N.: The ExoMars Trace Gas Orbiter Progress and future studies, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-16216, <u>https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16216</u>;
- 5.33 Thomas, N.; Svedhem, H.; Forget, F.; Vandaele, A. C.; Korablev, O.; Wilson, C.; Rodionov, D.; Mitrofanov, I.; Vago, J. The ExoMars Trace Gas Orbiter First Martian Year in Orbit. 43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January 4 February, 2021. Abstract B0.2-0001-21 (oral), id.149. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021cosp...43E.149T/abstract.