

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. № 122042500014-1

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

ИКИ РАН,

Член-корреспондент РАН

А.А. Петрукович

20 декабря 2023 г.



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

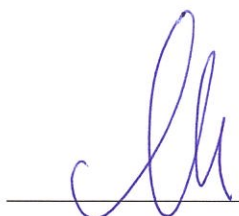
(промежуточный, этап 2)

по теме

ОСВОЕНИЕ

FFWG-2022-0003


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

  
И.Г. Митрофанов

Москва 2023


## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

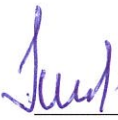
  
\_\_\_\_\_ (И.Г. Митрофанов)  
подпись, дата (введение, заключение, раздел 1)  
20/12/23

Исполнители:

заместитель заведующего  
отделом 63 ИКИ РАН

  
\_\_\_\_\_ (В.И. Третьяков)  
подпись, дата (раздел 2)  
20.12.2023

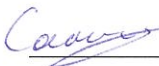
заведующий лабораторией  
отдела 63 ИКИ РАН,  
д.ф.-м.н., проф. РАН

  
\_\_\_\_\_ (М.Л. Литвак)  
подпись, дата (разделы 1, 2, 3)  
20.12.2023


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

  
\_\_\_\_\_ (М.И. Мокроусов)  
подпись, дата (раздел 5)  
20.12.2023


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

  
\_\_\_\_\_ (А.Б. Санин)  
подпись, дата (разделы 2, 3)  
20.12.2023


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

  
\_\_\_\_\_ (А.С. Козырев)  
подпись, дата (разделы 1, 4)  
20.12.2023

ведущий специалист  
отдела 63 ИКИ РАН

  
\_\_\_\_\_ (Д.В. Калашников)  
подпись, дата (введение, заключение,  
разделы 1, 2, 3, 4, 5)  
20.12.2023

Нормоконтроль

  
\_\_\_\_\_ (В.Г. Прохоров)  
подпись, дата

## РЕФЕРАТ

Отчет – 60 с., 1 кн., 20 рис., 7 табл., 56 источн.

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

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

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

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

В результате исследований определены угрозы радиационной безопасности космонавтов при нахождении на поверхности Марса и предложены меры по ослаблению воздействия на них нейтронного излучения, определены особенности распределения хлора в грунте Марса по глубине, получены данные о космическом радиационном фоне, в том числе и на орбите МКС. В рамках работ по теме «ОСВОЕНИЕ» проводилось научное сопровождение лунных проектов Луна-25 и Луна-27. Выполнена оценка влияния присутствия водяного льда на топографическую неровность поверхности.

Осуществлялось создание приборов для исследований лунного и марсианского грунта; практическое применение метода пиксельного представления данных измерений прибора ДАН; и практическое использование каталога данных о концентрации воды и хлора вдоль трассы марсохода «Кьюриосити» по измерениям прибора ДАН, изучение радиационного фона на Марсе на основе данных измерений прибора ДАН, осуществлялась локализация источников космических гамма-всплесков.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Наиболее значимый результат за 2023 год. ....	6
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.....	7
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 .....	19
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 .....	29
4 Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы.....	39
5 Разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению ....	46
Заключение .....	51
Список использованных источников .....	53



## ВВЕДЕНИЕ

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

В 2023 году проводились следующие исследования:

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

В данном отчете отражены основные результаты исследований, проведенных в 2023 г. по теме ОСВОЕНИЕ. Исследование Луны, планет и объектов Солнечной системы методами ядерной физики для изучения физической природы этих небесных тел для выяснения условий их освоения.

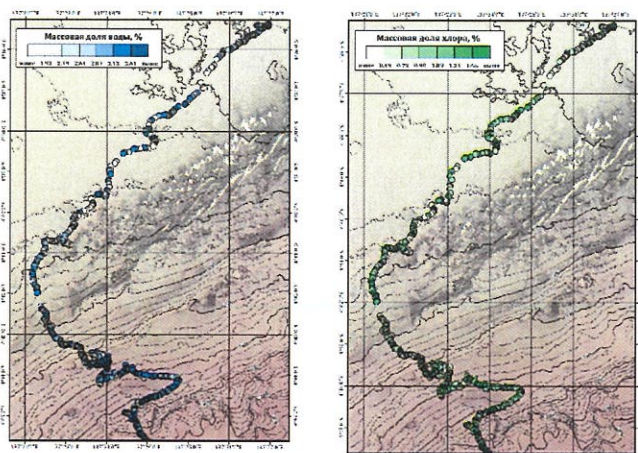


## Наиболее значимый результат за 2023 год. Оценки массовых долей воды и хлора в грунте Марса на основе каталогизированных данных нейтронного зондирования в российском космическом эксперименте ДАН на борту марсохода НАСА

### «Кьюриосити»

Митрофанов И.Г.<sup>1</sup>, Никифоров С.Ю.<sup>1</sup>, Литвак М.Л.<sup>1</sup>, Дьячкова М.Ю.<sup>1✉</sup>, Лисов Д.И.<sup>1</sup>

Российский прибор ДАН (от англ. *Dynamic Albedo of Neutrons*), работающий на Марсе на борту марсохода НАСА «Кьюриосити», является первым активным нейтронным детектором, зондирующим поверхность другого небесного тела. Прибор создан в Институте космических исследований РАН с участием Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова Госкорпорации «Росатом».



А

Б

Рисунок. Распределение воды (А) и эквивалентного хлора (Б) в грунте вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити» по данным прибора ДАН

Основной целью эксперимента является измерение массовой доли воды и хлора в грунте Марса. В созданном общедоступном Каталоге представлены данные указанных измерений вдоль 27-километровой трассы марсохода, полученные за период от даты его посадки 9 августа 2012 года до 21 декабря 2021 года. Данные Каталога позволят исследователям Марса выяснить условия гидрологической эволюции «красной» планеты и определить свойства минералов ее поверхности на современном этапе.

Результаты опубликованы: Mitrofanov, I. G., Nikiforov, S. Y., et al. Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover: 1. DAN measurement profiles along the traverse. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127, e2022JE007327 <https://doi.org/10.1029/2022JE007327> ; Djachkova M. V., Mitrofanov I. G., et al. Testing Correspondence between Areas with Hydrated Minerals, as Observed by CRISM/MRO, and Spots of Enhanced Subsurface Water Content, as Found by DAN along the Traverse of Curiosity. *Advances in Astronomy*, vol. 2022, Article ID 6672456, 10 pages, 2022 <https://doi.org/10.1155/2022/6672456> ; Litvak, M. L., Mitrofanov, I. G., et al. Depth distribution of chlorine at Gale crater, Mars, as derived from the DAN and APXS experiments onboard the Curiosity rover. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128, e2022JE007694 <https://doi.org/10.1029/2022JE007694>.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Тема ОСВОЕНИЕ, № 122042500014-1.

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

<sup>1</sup> Институт космических исследований Российской академии наук

✉ [djachkova@np.cosmos.ru](mailto:djachkova@np.cosmos.ru) , 8(495)333-42-77



# **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**

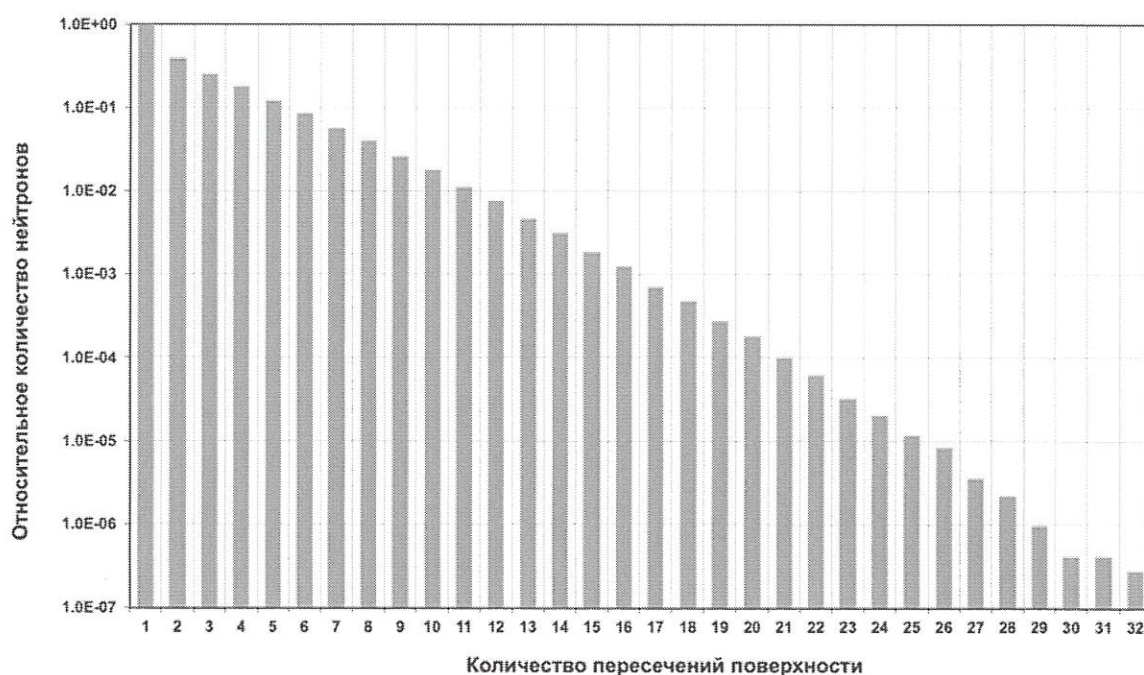
Руководитель Раздела д.ф.-м.н. И.Г. Митрофанов

В 2023 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.

Осуществлен анализ нейтронной компоненты радиационного фона на Марсе в кратере Гейл, где проводит свои исследования марсоход НАСА «Кьюриосити». Как уже указывалось ранее (см. отчет по теме «ОСВОЕНИЕ» за 2021-2022 гг.) в состав научной аппаратуры указанного марсохода входит российский прибор ДАН, позволяющий осуществлять как активное, так и пассивное нейтронное зондирование вещества Марса. За 10 лет (с 9 августа 2012 года) наблюдений с помощью этого прибора были получены данные о массовой доле воды и элементов с большими сечениями поглощения нейтронов в более чем 700 локальных районах остановок марсохода. С учетом полученных оценок для концентрации поглощающих элементов, методом пассивного нейтронного зондирования были получены оценки массовой доли воды вдоль всей пройденной трассы марсохода протяженностью около 20 км. Кроме этого, в распоряжении исследователей имеются данные о распространенности воды в грунте Марса, полученные на основе анализа орбитальных измерений собственного нейтронного излучения планеты (в том числе и отечественного прибора ХЕНД на борту КА «Марс Одиссей»). Так как основным фактором, который влияет на спектр нейтронного излучения Марса, является массовая доля водорода в веществе, на основании этих данных стала возможной оценка величины нейтронной компоненты собственного радиационного фона Марса на поверхности и на орбитах с различными высотами и наклонами.

Для оценки был применен следующий метод. Возникновение собственного нейтронного излучения Марса происходит в веществе планеты под воздействием заряженных частиц галактических космических лучей (далее – ГКЛ). Это приводит к рождению быстрых нейтронов, как в атмосфере, так и в верхнем слое поверхности. Спектральная плотность потока нейтронов на поверхности, в атмосфере и на орбите зависит

от ядерных реакций взаимодействия нейтронов с ядрами. Это реакции упругого и неупругого рассеяния, поглощения и распада нейтронов. Вследствие реакций рассеяния нейтроны изменяют свою энергию и направление движения. Можно схематично представить поле марсианского нейтронного излучения как совокупность компонент частиц с различной собственной историей взаимодействия с приповерхностным слоем вещества и с веществом атмосферы до того момента, как частицы покинут окрестность планеты, выйдя за пределы ее атмосферы, или уйдут в глубокие слои вещества без шансов вернуться из-за поглощения или распада. Каждая компонента нейтронного излучения может характеризоваться определенным числом пересечений поверхности планеты от момента рождения до “завершения истории” (см. рисунок 1.1).



**Рисунок 1.1** Распределение нейтронов по количеству пересечений поверхности кратера Гейл (все столбцы нормированы на количество нейтронов первого пересечения поверхности,  $7.2 \times 10^6$ )

Так, частицы компоненты № 1 после рождения под поверхностью вылетают в космическое пространство без взаимодействия с атмосферой, или поглощаются в атмосфере, или распадаются. В эту компоненту также входят нейтроны, которые родились в атмосфере, прошли через поверхность и ушли в глубокие слои планеты.

Нейтроны компоненты № 2 могли родиться в веществе под поверхностью, отразиться в атмосфере и повторно пересечь поверхность с уходом в глубокие слои. Или нейтроны этой компоненты могли родиться в атмосфере, отразиться в верхнем слое поверхности и выйти за пределы атмосферы или поглотиться в ней. Описание этого ряда



компонент можно соответственно продолжить, определив номер компоненты  $N$  как число пересечений нейтронами поверхности планеты.

Очевидно, что полный поток нейтронов в каждой точке под поверхностью, над поверхностью и на орбите равен сумме вкладов всех компонент. Его величина определяется производством нейтронов под поверхностью, в атмосфере, а также “отражательной” способностью слоев вещества ниже и выше поверхности. Поэтому величина полного потока зависит как от состава вещества (массовая доля воды и поглотителей нейтронов), так и от толщины атмосферы.

Для района кратера Гейл было выполнено численное моделирование для оценки парциальных потоков нейтронов для всех компонент нейтронного излучения и для определения полного потока нейтронов на поверхности и на орбите с высотой 400 км. Использовался пакет Geant4 toolkit (version: geant4-10-07-patch-01). В расчеты закладывались не только состав марсианской поверхности, состав и толщина атмосферы, но и определенная спектральная плотность потока частиц ГКЛ.

Численные оценки показали, что мощность эффективной нейтронной дозы на открытой поверхности Марса на дне кратера Гейл (без всякой защиты) в диапазоне энергий до 1000 МэВ составляет около 100 мкЗв/день. Оценки были сделаны для максимума потока ГКЛ и для толщины атмосферы, усредненной за марсианский год. Эта величина составляет около 10% от полной дозы, учитывающей вклад заряженных частиц. Это означает, что учет нейтронной компоненты на 10% сокращает допустимый срок пребывания космонавтов на открытой поверхности. Для стандартного сценария (500 дней на поверхности Марса) это сокращение составит около 2 месяцев.

Так же в ходе исследования установлено, что Мощность эффективной нейтронной дозы в кратере Гейл может меняться сезонно за счет сезонной переменности атмосферы. Эта переменность небольшая и может составить около 1%.

Поток ГКЛ модулируется солнечной активностью с периодом в 11 лет. Поэтому в ходе солнечного цикла варьируются и потоки вторичных частиц, произведенных в атмосфере и веществе грунта Марса заряженными частицами ГКЛ. Основываясь на численных расчетах и длительном мониторинге нейтронного потока на орбите Марса (данные прибора ХЕНД на борту КА «Марс Одиссей»), можно сказать, что переменность потока достигает около 2 раз между солнечным минимумом и максимумом. Такая же переменность наблюдается и в величине нейтронной дозы.

При тонкой (на два порядка тоньше, чем на Земле) атмосфере Марса, ее толщины достаточно, чтобы производить нейтроны и эффективно отражать нейтроны, родившиеся в верхних слоях грунта и вышедшие на поверхность. За счет многократных отражений

увеличивается поток нейтронов через поверхность и соответственно возрастает величина нейтронной дозы. Так, если доза на дне кратера Гейл составляет около 100 мкЗв/день, то доза на орбите (без учета вклада дозы от космического аппарата, которая должна учитываться отдельно) над кратером Гейл – всего 25 мкЗв/день.

Основной вклад в эффективную дозу по нейтронам вносят нейтроны очень больших энергий за счет своей высокой поражающей способности. Тем не менее вклад нейтронов в диапазоне ниже 10–15 МэВ значителен (более 50%). В этом диапазоне поток нейтронов сильно зависит от содержания воды в грунте Марса. Поэтому мощность эффективной дозы по нейтронам существенно меняется при переходе от мест с низким содержанием воды к более влажным. Даже в таком относительно сухом районе, как кратер Гейл, наблюдения прибора ДАН обнаружили, что содержание воды меняется в широком интервале от 0.5 до 5%. Соответствующие численные оценки показали, что мощность эффективной дозы по нейтронам в этом случае меняется в пределах 92–108 мкЗв/день, то есть приблизительно на 20%.

Данные численного моделирования были верифицированы измерениями нейтронной компоненты дозы, выполненными дозиметром RAD, также входящим в состав научной аппаратуры марсохода «Кьюриосити» (см. табл. 1.1). Сравнение показало, что численные расчеты дают сопоставимые величины мощности дозы.

**Таблица 1.1** Сравнение результатов численной оценки с результатами измерений прибора RAD

Измерения RAD на поверхности кратера Гейл за период 15 ноября 2015 г.–15 января 2016 г. в диапазоне энергий 7–740 МэВ*	Численная оценка, полученная за период 15 ноября 2015 г.–15 января 2016 г. в диапазоне энергий 7–740 МэВ**
25.3 ± 3.3 мкЗв/день	39.1 ± 0.5 мкЗв/день
*Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Scheingruber R.F., Hassler D.M., Köhler J., Ehresmann B., Böttcher S., Böhm E., Brinea D.E. Measurements of the neutral particle spectra on Mars by MSL/RAD from 2015-11-15 to 2016-01-15 // Life Sciences in Space Research. 2017. V. 14. P. 12–17. <a href="https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.06.001">https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.06.001</a>	** Учитывает поток ГКЛ за период 15 ноября 2015 г.–15 января 2016 г., среднюю толщину атмосферы над кратером Гейл и среднее содержание воды, измеренное прибором ДАН за этот же период.



Полученные данные убедительно демонстрируют, что пребывание космонавтов на поверхности Марса без специальной защиты от радиации несет в себе значительный риск для их здоровья. Поэтому для проектирования будущих обитаемых форпостов на Марсе требуется использование элементов радиационной защиты или естественных укрытий (лавовые пещеры), расположенных в районах с высоким содержанием воды. Последнее условие не только дает возможность доступа к такому важному ресурсу как вода, но и понижает поток быстрых нейтронов, а с ним и нейтронную компоненту радиационной дозы.

Продолжено проведение космического эксперимента «БТН-Нейтрон» с НА БТМ-М1 на борту Международной космической станции (МКС). Основными задачами этого эксперимента являются:

- непрерывное наблюдение за переменностью нейтронного потока в окрестности МКС в широком спектральном диапазоне от надтепловых до быстрых нейтронов. Эта задача подразумевает поиск вариаций фона на разных временных масштабах, начиная от орбитальной переменности и заканчивая долгопериодическими изменениями, связанными с одиннадцатилетним солнечным циклом;

- поиск пространственной переменности нейтронного потока при пролёте МКС над разными участками земной поверхности, включая пролёты над экваториальными районами, Южно-Атлантической магнитной аномалией (ЮАМА), и на высоких геомагнитных широтах;

- мониторинг нейтронного фона во время сильных солнечных протонных событий и солнечных вспышек, поиск и регистрация солнечных нейтронов;

- переход от измерений спектральной плотности нейтронного потока к оценке мощности нейтронной компоненты радиационной дозы снаружи МКС с последующим сопоставлением с измерениями радиационной дозы от заряженных частиц и построением глобальной карты (в рамках широт, внутри которых летает МКС) радиационной дозы и мониторингом её переменности во времени.

Эксперимент осуществляется с ноября 2006 года. Временная дорожка полученных данных позволяет наблюдать солнечную модуляцию потока ГКЛ и соответственно долгопериодические вариации нейтронного потока для разных фаз солнечного цикла. Для таких наблюдений наибольший интерес представляют пролёты МКС над высокоширотными областями с низкой жёсткостью геомагнитного обрезания (ЖГО). Это параметр, который характеризует возможность проникновения космических заряженных частиц в магнитосферу и атмосферу Земли. В окрестности магнитных полюсов, из-за дипольной конфигурации магнитного поля Земли, заряженные частицы, составляющие

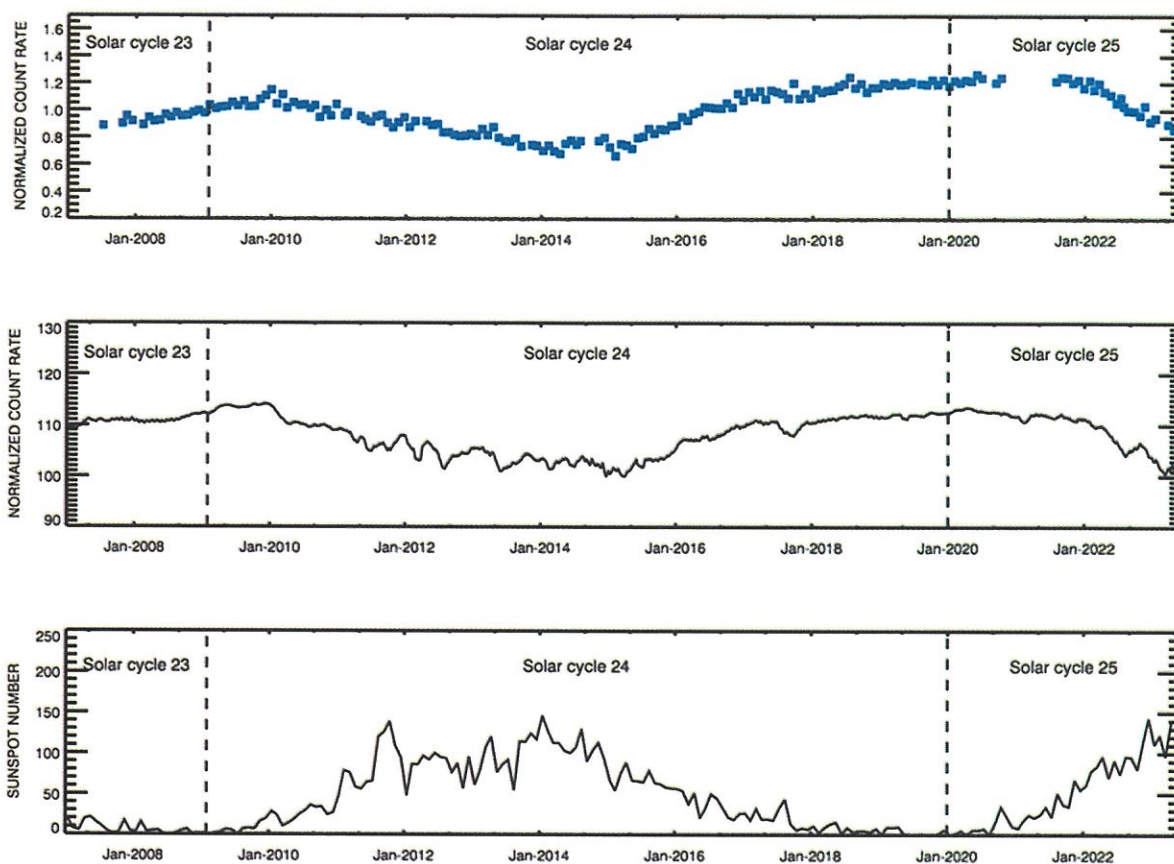
низкоэнергетичную часть спектра ГКЛ, двигаясь вдоль силовых линий, могут проникать на высоты, где летает МКС. Поток этих частиц больше всего меняется из-за солнечной модуляции, а значит длительное наблюдение за величиной нейтронного потока при пролёте этих областей даёт возможность изучать долгопериодические вариации ГКЛ и понимать, как они влияют на поток вторичных частиц, рождённых в верхней атмосфере Земли и конструкции самой орбитальной станции.

На рисунке 1.2 (верхний график) показан временной профиль темпа счета нейтронов в окрестности магнитных полюсов Земли, зарегистрированный аппаратурой «БТН-М2» за весь период наблюдений до июня 2023 г. Хорошо видно, что представленный временной профиль существенно меняется во времени, демонстрируя периодические вариации (до двух раз между минимумом и максимумом) в соответствии с фазами солнечной активности, которые определяются по значению параметра, связанного с подсчётом количества солнечных пятен (число Вольфа). Динамика этого параметра показана на нижнем графике рисунка 1.2.

Начало и конец солнечного цикла характеризуются минимальной солнечной активностью, поэтому в эти периоды поток ГКЛ внутри Солнечной системы достигает максимума, одновременно приводя к увеличению потока вторичных нейтронов. За весь период наблюдений было зарегистрировано два максимума потока нейтронов: с сентября 2009 г. по апрель 2010 г. и с августа 2018 г. по август 2021 г. Кроме этого на временном профиле хорошо виден минимум нейтронного потока в конце 2014, начале 2015 гг. и приближение ко второму минимуму летом 2023 г., что соответствует временным интервалам наиболее активного Солнца.

На рисунке 1.2 (средний график) для сравнения также показан профиль нейтронного потока, зарегистрированный одним из наземных нейтронных мониторов, находящимся в университете Oulu, Финляндия (см., <https://www.nmdb.eu/station/oulu/>). Эта локация тоже находится на высоких широтах с ЖГО  $< 1$  ГВ и поэтому обладает высокой чувствительностью для регистрации переменности потока ГКЛ. Хорошо видно, что в части крупномасштабной переменности орбитальный и наземный нейтронные мониторы хорошо повторяют друг друга.





**Рисунок 1.2** Временные профили нейтронного потока по данным эксперимента «БТН-Нейтрон» (синий цвет, верхний график), наземного нейтронного монитора Oulu (средний график) и солнечных пятен (нижний график)

Необходимо отметить несколько важных наблюдений: нейтронный сигнал инерционен и существенно запаздывает по сравнению с динамикой солнечной пятен (от нескольких месяцев до года); есть различия в мелкомасштабной переменности появления солнечных пятен и переменности нейтронного потока на орбите и на поверхности; солнечные циклы отличаются друг от друга.

По данным измерений «БТН-Нейтрон» можно восстановить спектральную плотность нейтронного потока и от неё перейти к оценке эффективной дозы по нейтронам. В таблице 1.2 приведены средние значения нейтронной компоненты радиационной дозы, полученные для различных областей для периодов в окрестности максимума (октябрь 2022 г.–март 2023 г.) и минимума (октябрь 2019 г. – апрель 2020 г.) солнечной активности в ходе 25-го солнечного цикла.

**Таблица 1.2** Оценки мощности нейтронной компоненты радиационной дозы для максимума и минимума солнечной активности (25-й солнечный цикл) при пролёте МКС над различными областями

Область на карте	Доза, мкЗв/ч	
	Октябрь 2019 г.– апрель 2020 г.	Октябрь 2022 г.– март 2023 г.
Экваториальная	0,206±0,0001	0,208±0,002
Северная приполярная	2,17±0,02	1,50±0,02
Южная приполярная	2,30±0,02	1,71±0,01
ЮАМА	28,9±1,0	24,1±1,0

Данные в таблице 1.2 наглядно демонстрируют, что максимальная переменность (от 1,5 раз, учитывая, что максимум солнечной активности в 25-м солнечном цикле еще не наступил) зафиксирована при пролете северных и южных высокоширотных областей в окрестности магнитных полюсов Земли, а максимальная абсолютная величина дозы (в 50–100 раз выше, чем на экваторе) наблюдается при пролёте ЮАМА.

Продолжена работа по локализации источников космических гамма-всплесков в рамках международной программы IPN (InterPlanetary Network), частью которой являются разработанные в ИКИ РАН приборы МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) миссии «БепиКоломбо» и прибор ХЕНД на борту КА «Марс Одиссей». Кроме них, в программе IPN на сегодняшний день участвуют еще четыре прибора на бортах различных космических аппаратов. Как уже указывалось (см. отчеты по теме «ОСВОЕНИЕ» за 2021-2022 гг.), приборы МГНС и ХЕНД единственные из числа участвующих в указанной программе приборов, кто работает не на земной орбите (МГНС – на орбите перелета к Меркурию, ХЕНД – на марсианской орбите). Такое положение создает предпосылки для особой точности локализации гамма-всплеска с использованием данных этих двух приборов.

Всего за время перелета КА «БепиКоломбо» к Меркурию прибором МГНС было зарегистрировано 123 подтвержденных космических гамма-всплеска (см. Таблицу 1.3). В период с 20 октября 2021 года по 1 декабря 2023 года, с использованием данных прибора МГНС, как участника программы Межпланетной сети по локализации гамма-всплесков IPN, было локализовано 29 гамма-всплесков, по которым были выпущены соответствующие циркуляры в системе GCN (<https://gcn.nasa.gov/circulars>), 19 из которых были локализованы с использованием данных прибора ХЕНД.



За 2023 год прибором МГНС было зарегистрировано 26 космических гамма-всплесков, из которых для 19 были выпущены циркуляры в системе GCN (см. Таблицу 1.3).

**Таблица 1.3** Список зарегистрированных прибором МГНС космических гамма-всплеска. В предпоследней колонке показаны гамма-всплески, которые были зарегистрированы прибором ХЕНД. Прибор МГНС присоединился к программе Межпланетной сети по локализации гамма-всплесков IPN 20 октября 2021 г. В последней колонке отражены гамма-всплески прибора МГНС, локализованные программой IPN, с публикацией циркуляра в системе GCN

№	Название всплеска	Дата и время регистрации, [UTC]	Номер дня в году	Регистрация всплеска прибором МГНС	Публикация циркуляра
1	GRB 190415A	15.04.2019 04:10:51	105	-	-
2	GRB 190501A	01.05.2019 05:23:23	121	+	-
3	GRB 190530A	30.05.2019 10:19:08	150	+	-
4	GRB 190620A	20.06.2019 12:10:10	171	-	-
5	GRB 190727B	27.07.2019 20:18:17	208	-	-
6	GRB 191125A	25.11.2019 04:56:43	329	+	-
7	GRB 191202A	02.12.2019 20:48:51	336	+	-
8	GRB 200125B	25.01.2020 20:43:31	25	+	-
9	GRB 200205B	05.02.2020 19:21:43	36	-	-
10	GRB 200205C	05.02.2020 20:17:23	36	-	-
11	GRB 200211A	11.02.2020 07:26:28	42	-	-
12	GRB 200219A	19.02.2020 07:36:49	50	-	-
13	GRB 200219C	19.02.2020 23:57:10	50	+	-
14	GRB 200311A	11.03.2020 15:16:12	71	-	-
15	GRB 200313A	13.03.2020 01:41:36	73	+	-
16	GRB 200318A	18.03.2020 22:35:27	78	-	-
17	GRB 200324A	24.03.2020 16:39:07	84	-	-
18	GRB 200326B	26.03.2020 21:13:52	86	+	-
19	GRB 200412B	12.04.2020 09:08:40	103	-	-
20	GRB 200415A	15.04.2020 08:48:05	106	+	-
21	GRB 200416A	16.04.2020 07:05:17	107	-	-
22	Not in GCN	18.05.2020 17:25:01	139	+	-
23	GRB 200522A	22.05.2020 11:41:34	143	-	-
24	GRB 200524A	24.05.2020 05:04:00	145	-	-
25	GRB 200531A	31.05.2020 02:51:18	152	-	-
26	GRB 200605A	05.06.2020 18:17:42	157	+	-
27	GRB 200609A	09.06.2020 09:06:59	161	+	-
28	GRB 200615B	15.06.2020 10:30:18	167	-	-
29	GRB 200619A	19.06.2020 02:36:11	171	+	-
30	GRB 200703A	03.07.2020 08:11:39	185	-	-
31	GRB 200703B	03.07.2020 23:16:41	185	+	-
32	GRB 200714A	14.07.2020 05:56:02	196	-	-



№	Название всплеска	Дата и время регистрации, [UTC]	Номер дня в году	Регистрация всплеска прибором МГНС	Публикация циркуляра
33	GRB 200716A	16.07.2020 01:26:37	198	+	-
34	GRB 200716C	16.07.2020 22:57:41	198	+	-
35	GRB 200826B	26.08.2020 22:09:42	239	+	-
36	GRB 200829A	29.08.2020 13:59:34	242	+	-
37	GRB 200903E	03.09.2020 02:34:27	247	+	-
38	GRB 200907C	07.09.2020 22:57:28	251	-	-
39	GRB 200914A	14.09.2020 12:48:30	258	-	-
40	GRB 200919C	19.09.2020 23:08:22	263	-	-
41	GRB 201009A	09.10.2020 03:08:26	283	-	-
42	GRB 201013A	13.10.2020 03:46:30	287	-	-
43	Not in GCN	13.10.2020 17:57:29	287	+	-
44	GRB 201016A	16.10.2020 00:27:49	290	-	-
45	GRB 201103B	03.11.2020 18:06:45	308	+	-
46	GRB 201104A	04.11.2020 00:00:56	309	-	-
47	GRB 201105A	05.11.2020 05:31:07	310	-	-
48	GRB 201116A	16.11.2020 00:49:47	321	-	-
49	GRB 201209A	09.12.2020 05:44:52	344	-	-
50	GRB 201216C	16.12.2020 23:07:31	351	-	-
51	GRB 201218A	18.12.2020 04:14:15	353	+	-
52	GRB 210112A	12.01.2021 01:37:03	12	+	-
53	GRB 210116A	16.01.2021 05:53:33	16	+	-
54	GRB 210121A	21.01.2021 18:41:48	21	+	-
55	GRB 210123A	23.01.2021 07:19:10	23	+	-
56	GRB 210427A	27.04.2021 04:57:12	117	+	-
57	GRB 210619B	19.06.2021 23:59:25	170	+	-
58	GRB 210812A	12.08.2021 16:47:01	224	+	-
59	GRB 210818A	18.08.2021 01:02:08	230	-	-
60	GRB 210927B	27.09.2021 23:54:45	270	+	+
61	GRB 211019A	19.10.2021 05:59:31	292	+	+
62	GRB 211022A	22.10.2021 00:47:28	295	+	+
63	GRB 211023A	23.10.2021 13:05:43	296	-	-
64	GRB 211120A	20.11.2021 23:05:21	324	+	+
65	GRB 211130A	30.11.2021 15:16:27	334	-	+
66	GRB 211219A	19.12.2021 14:55:22	353	+	+
67	GRB 211221A	21.12.2021 20:48:40	355	-	-
68	GRB 211226A	26.12.2021 05:25:41	360	+	+
69	GRB 220101A	01.01.2022 05:09:55	1	+	-
70	GRB 220209A	09.02.2022 23:00:50	40	-	+
71	GRB 220305B	05.03.2022 11:33:20	64	+	+
72	GRB 220308A	08.03.2022 05:43:08	67	-	-
73	GRB 220320A	20.03.2022 04:42:17	79	+	+
74	GRB 220403C	03.04.2022 10:13:50	93	+	+
75	GRB 220408B	08.04.2022 07:28:05	98	-	+
76	GRB 220423A	23.04.2022 14:14:14	113	-	+
77	GRB 220426A	26.04.2022 06:49:51	116	+	-



№	Название всплеска	Дата и время регистрации, [UTC]	Номер дня в году	Регистрация всплеска прибором МГНС	Публикация циркуляра
78	GRB 220430A	30.04.2022 13:53:15	120	+	-
79	GRB 220507A	07.05.2022 10:09:06	127	-	-
80	GRB 220522B	22.05.2022 00:17:38	142	+	-
81	GRB 220527A	27.05.2022 09:17:15	147	+	-
82	GRB 220606C	06.06.2022 13:35:14	157	-	+
83	GRB 220609B	09.06.2022 12:21:08	160	+	+
84	GRB 220613A	13.06.2022 20:27:21	164	+	+
85	GRB 220623A	23.06.2022 07:04:14	174	+	-
86	GRB 220624A	24.06.2022 02:58:35	175	+	+
87	GRB 220910A	10.09.2022 05:48:26	253	-	+
88	GRB 220921A	21.09.2022 11:05:59	264	+	-
89	GRB 220930A	30.09.2022 11:11:52	273	-	-
90	GRB 221009A	09.10.2022 13:16:59	282	-	+
91	GRB 221017A	17.10.2022 05:39:31	290	+	-
92	GRB 221021A	21.10.2022 09:18:25	294	+	-
93	GRB 221022B	22.10.2022 22:55:48	295	-	-
94	GRB 221023A	23.10.2022 20:41:34	296	+	-
95	GRB 221028A	28.10.2022 13:16:27	301	-	-
96	GRB 221121A	21.11.2022 06:34:49	325	-	+
97	GRB 221122A	22.11.2022 19:59:12	326	-	-
98	GRB 230120A	20.01.2023 10:53:13	20	+	-
99	GRB 230204B	04.02.2023 21:47:51	35	-	-
100	GRB 230209B	09.02.2023 22:32:36	40	+	+
101	GRB 230217A	17.02.2023 21:53:10	48	+	-
102	GRB 230304B	04.03.2023 14:35:49	63	+	+
103	GRB 230307A	07.03.2023 15:44:06	66	+	+
104	GRB 230308A	08.03.2023 13:32:27	67	+	+
105	GRB 230309A	09.03.2023 12:32:21	68	-	+
106	GRB 230512A	12.05.2023 06:27:45	132	-	+
107	GRB 230614C	14.06.2023 10:10:31	165	+	-
108	GRB 230616A	16.06.2023 20:37:56	167	+	+
109	GRB 230621A	21.06.2023 23:45:24	172	+	-
110	GRB 230701A	01.07.2023 22:44:39	182	-	-
111	GRB 230803A	03.08.2023 01:27:08	215	+	-
112	GRB 231004A	04.10.2023 08:23:35	277	-	-
113	GRB 231012A	12.10.2023 05:32:20	285	-	-
114	GRB 231015A	15.10.2023 23:49:53	288	+	-
115	GRB 231018A	18.10.2023 12:30:10	291	-	-
116	GRB 231020A	20.10.2023 18:56:58	293	+	+
117	GRB 231030B	30.10.2023 19:58:19	303	+	-
118	GRB 231104A	04.11.2023 01:47:28	308	-	-
119	GRB 231117A	17.11.2023 03:03:19	321	-	-
120	GRB 231118B	18.11.2023 22:34:14	322	-	-
121	GRB 231122B	22.11.2023 15:12:41	326	-	-

№	Название всплеска	Дата и время регистрации, [UTC]	Номер дня в году	Регистрация всплеска прибором МГНС	Публикация циркуляра
122	GRB 231127A	27.11.2023 05:14:21	331	-	-
123	GRB 231129C	29.11.2023 19:10:18	333	+	+

Космические гамма-всплески, перечисленные в таблице выше, были также обнаружены по крайней мере в одном или нескольких космических научных экспериментах, предназначенных для поиска и изучения космических гамма-всплесков (FERMI, KONUS, INTEGRAL, ХЕНД и др.). В таблице 1.3 в отдельной колонке указаны гамма-всплески, которые были одновременно обнаружены приборами МГНС и ХЕНД.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.2, 1.5, 1.6, 2.3, 2.4, 2.2, 2.4) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.33, 5.34).



## **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

11 августа 2023 год с космодрома «Восточный» был осуществлен запуск КА «Луна-25». Этим было положено начало практической реализации отечественной лунной программы в новейшей истории. Значительные усилия были направлены на научно-информационное обеспечение указанной миссии.

Подготовлено описание и анализ программы научных исследований, которые планировалось провести с помощью комплекса научной аппаратуры на борту КА «Луна-25». Указанная программа научных исследований представляет собой алгоритм оптимального выполнения научных задач в рамках указанного проекта: изучения элементного и изотопного состава поверхности и верхнего слоя полярного реголита (эксперименты с приборами АДРОН-ЛР и ЛАЗМА-ЛР); поиска воды и летучих соединений в лунном полярном веществе (эксперименты с приборами АДРОН-ЛР, ЛАЗМА-ЛР, ЛИС-ТВ-РПМ); исследования лунной экзосферы (эксперименты с приборами ПмЛ и АРИЕС-Л), проведения научно-технологических экспериментов и обеспечения выполнения программы научных исследований (приборы БУНИ, СТС-Л, ЛМК).

Для реализации программы научных исследований в ИКИ РАН при участии Специального конструкторского бюро космического приборостроения ИКИ РАН (СКБ КП, г. Таруса Калужской обл.), Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова Госкорпорации «Росатом» (ВНИИА, г. Москва), ООО «НПП Астрон Электроника» (г. Орел), ООО «Растр Технолоджи» (г. Москва), Университета Берна (Швейцария) и с привлечением Института геохимии и аналитической химии РАН им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН, г. Москва), Института машиноведения РАН им. А.А. Благонравова (ИМАШ РАН, г. Москва), АО «НПО Молния» (г. Москва), Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна Московской обл.) был создан соответствующий комплекс научной аппаратуры (КНА). Состав КНА, планировавшиеся к выполнению задачи и масса приборов приведены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1** Задачи и масса приборов КНА КА «Луна-25»

№	прибор	проводимое исследование (выполняемая задача)	масса (кг)
1	АДРОН-ЛР	изучение элементного состава и содержания водорода в реголите методом активной нейтрон-нейтронной и нейтрон-гамма-спектроскопии; измерение радиационного фона нейтронов и гамма-лучей на лунной поверхности	6,23
2	АРИЕС-Л	изучение ионной и нейтральной экзосферы Луны, исследования взаимодействия солнечного ветра с поверхностью Луны и десорбции ионов из поверхностного слоя реголита	2,46
3	ЛАЗМА-ЛР	прямые измерения методом лазерной масс-спектрометрии химического, элементного и изотопного состава образцов грунта, доставленных ЛМК	2,56
4	ЛИС-ТВ-РПМ	изучение методами инфракрасной спектроскопии минералогического состава поверхностного слоя реголита Луны и содержания в нем воды – как для раскопов ЛМК, так и за пределами рабочего поля манипулятора; стереосъемка поверхности	2,22
5	ПмЛ	исследование физических характеристик лунной пылевой экзосферы и поверхностного реголита, рассеиваемого под действием микрометеоритных воздействий	1,04
6	СТС-Л	съемка поверхности Луны с низкой окололунной орбиты и на этапе спуска; панорамная съемка поверхности Луны; съемка рабочего поля ЛМК для координатного и визуального обеспечения управления работой ЛМК; изучение пылевых явлений; отработка технологии визуального тракта системы высокоточной и безопасной посадки	6,35
7	ЛМК	проведение раскопов вблизи КА, взятие образцов лунного грунта и доставка в ЛАЗМА-ЛР	5,87



		наведение ЛИС-ТВ-РПМ на объекты исследования; изучение физико-механических свойств реголита;	
8	БУНИ	коммутация электропитания, управление аппаратурой, сбор с приборов, хранение и передача телеметрической и научной информации в бортовые системы КА	2,39

Ряд приборов выполнен в многоблочном исполнении (см. таблицу 2.2).

**Таблица 2.2** Поблочный состав приборов КНА КА «Луна-25»

	Название прибора	Названия блоков
1	АДРОН-ЛР	блок детекторов и электроники - АДРОН-ЛР-ДЭ блок нейтронного генератора - АДРОН-ЛР-ИНГ
2	АРИЕС-Л	моноблок
3	ЛАЗМА-ЛР	моноблок
4	ЛИС-ТВ-РПМ	оптическая часть - ОЧ (ЛИС и 2 камеры ТВ-РПМ) блок электроники
5	ПмЛ	ударный сенсор - УС-1 датчик - ЭД-1 датчик - ЭД-2
6	СТС-Л	камера обзорная - КАМ-О (4 шт.) камера ближней зоны - (КАМ-С) (4 шт.); блок сбора данных - БСД
7	ЛМК	моноблок
8	БУНИ	моноблок

Размещение блоков приборов КНА на борту КА было проведено специалистами ИКИ РАН в тесном взаимодействии с конструкторами и инженерами АО «НПО Лавочкина», с учетом необходимых прочностных характеристик механических интерфейсов, обеспечения тепловых условий выживания и работы научных приборов, оптимизации длин кабелей бортовой кабельной сети (БКС) и, главное, обеспечения возможности беспрепятственного проведения заявленных научных экспериментов. Большая часть блоков приборов КНА была размещена на термостабилизированной панели (ТСП) приборного контейнера (ПК) КА, обеспечивавшей тепловые условия от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На ТСП ПК были расположены приборы БУНИ, АРИЕС-Л, ЛАЗМА-ЛР, а также

блок электроники ЛИС-ТВ-РПМ, две камеры КАМ-С для съемок рабочей зоны ЛМК и блок сбора данных (БСД) СТС-Л.

Для проведения панорамной съемки, камеры КАМ-О были установлены на четырех сторонах верхнего силового кронштейна ПК КА таким образом, чтобы их поля зрения перекрывались и позволяли снимать сплошную панораму окрестностей КА. Еще две стереокамеры из состава СТС-Л были установлены снизу силовой рамы двигательной установки (ДУ) КА и направлены вниз для съемки на посадке.

ЛМК был установлен в нижней части КА на межбаковой проставке топливных баков ДУ КА, что обеспечивало для ЛМК рабочую зону для работы с грунтом, ограниченную внутренней и внешней окружностями с радиусами 383 и 835 мм относительно точки крепления и углами от  $-65^\circ$  до  $+65^\circ$  по азимуту и позволяет осуществлять доставку образцов в прибор ЛАЗМА-ЛР. На втором звене манипулятора ЛМК была размещена оптическая часть (ОЧ) прибора ЛИС-ТВ-РПМ, включавшая две камеры ТВ-РПМ и инфракрасный спектрометр ЛИС.

АДРОН-ЛР и ПмЛ, как приборы, для которых было необходимо быть как можно ближе к поверхности Луны, были расположены на отдельной термостабилизируемой плите научной аппаратуры (ПНА) в нижней части ДУ КА. Два датчика электрического поля (ЭД) из состава ПмЛ были размещены, в силу условий проведения КЭ, друг над другом – один на ПНА и второй на панели батареи фотоэлементов (БФ).

Непосредственное планирование научных исследований на борту КА «Луна-25», составление циклограмм функционирования научных и обеспечивающих приборов, контроль их состояния и условий работы, экспресс-анализ данных научных измерений осуществлялось посредством наземного научного комплекса проекта «Луна-Глоб» (ННК-ЛГ). ННК-ЛГ обеспечивал проведение полного цикла приема, обработки, анализа и долговременного хранения всех типов данных (научной, телеметрической и служебной информации), принимаемых с борта КА и формировавшихся наземными средствами комплекса (калибровочной, баллистической и другой вспомогательной информации).

ННК-ЛГ был подключен к наземному комплексу управления (НКУ-ЛГ), расположенному в АО «НПО Лавочкина» и осуществлявшего общее управление полётом КА и его работой на этапе перелета, посадки и на поверхности. ННК-ЛГ отвечал за функционирование комплекса научной аппаратуры, в части формирования циклограмм управления и выполнял эту задачу через взаимодействие с НКУ-ЛГ, который осуществлял непосредственное взаимодействие с КА через сеть наземных станций связи.

В соответствии с выше перечисленными научными задачами и имевшимися для их реализации средствами, план научных исследований состоял из пяти составляющих:



проверки функционирования научных приборов после выхода на траекторию перелета к Луне, после выхода на окололунную орбиту и после посадки; физических калибровок аппаратуры в полете и на лунной поверхности; программы-минимум научных исследований; основной программы научных исследований; дополнительной программы научных исследований.

Проверка функционирования научных приборов проводилась с целью экспресс-анализа состояния приборов в дежурном режиме. Проверка, как уже указывалось выше, производилась в три этапа. Было предусмотрено, что на каждом этапе обеспечивается двухсторонняя связь КА с наземными станциями НКУ-ЛГ по каналу С-диапазона.

Калибровка научных приборов была проведена для проверки функционирования в режимах измерений и выбора оптимальных настроек измерительных трактов или настроек детекторов и сенсоров приборов. Первый сеанс калибровки был проведен на траектории перелета после завершения проверки функционирования приборов. Второй сеанс калибровок был проведен на окололунной орбите. При проведении калибровок прибора СТС-Л был получен снимок лунного кратера Зеeman, который позволил получить интересные научные результаты. Третий сеанс планировалось провести на поверхности Луны после посадки. Все сеансы калибровок были проведены по одинаковым циклограммам управления приборами.

После завершения проверок функционирования и калибровок научной аппаратуры планировалось выполнить программу-минимум научных исследований. Цель этой программы состояла в выполнении каждым прибором проекта научных измерений в объеме, который считался минимально необходимым для выполнения основных исследовательских задач, поставленных перед этим прибором.

Предварительные оценки показали, что программа-минимум научных исследований могла быть выполнена в течение пяти-шести лунаций (лунных суток), включая первую лунацию, во время которой производится посадка КА на поверхность.

Начальный этап миссии должен был продлиться до завершения исследований по программе-минимум. Поскольку научные исследования на борту могли осуществляться только в течение светлого времени лунаций, продолжительность начального периода должна была определиться тем количеством лунаций, которые потребовалось бы для выполнения программы-минимум. Ожидалось, что полное время выполнения начального этапа составит 4 месяца.

Для каждой лунации должен был быть составлен детальный план работы научной и обеспечивающей аппаратуры. Исходными данными для составления этого плана были бы инженерные условия на борту КА, которые включают доступную энергетику, план сеансов

связи и тепловые условия на борту. Также при составлении плана работы должны были учитываться обязательные операции с бортовыми служебными приборами, необходимыми для обеспечения их нормального функционирования.

После выполнения программы-минимум научных исследований должен был наступить период расширенных исследований. Кроме проведения основных исследований, в план работ планировалось включить эксперименты по исследованию эффектов импульсного нейтронного излучения на динамические процессы в плазменной и нейтральной экзосфере в окрестности космического аппарата, изучению процесса сублимации летучих соединений в зависимости от глубины забора грунта и условий освещенности, изучению состояния локальной экзосферы и статического электрического поля в окрестности аппарата в условиях прохождения через хвост земной магнитосферы, изучению вариаций гамма-излучения лунной поверхности и радиационного фона во время солнечных протонных событий.

Ожидалось, что полученные в ходе исследований данные о составе полярного реголита дадут возможность проследить характер эволюции поверхности Луны на всем масштабе ее геологического времени, восстановить профиль интенсивности кометной и астероидной бомбардировки за время ее существования. Эти данные важны для решения практических задач будущего освоения Луны в части разведки основных полезных ископаемых Луны в окрестности полюсов. Так же не до конца понятные сейчас механизмы образования водяного льда и летучих соединений в реголите полярных областей Луны требуют новых данных для подробного исследования. Это необходимо как для ответа на чисто научные, фундаментальные вопросы об эволюции Луны и Солнечной системы, так и для разработки основных этапов программы освоения Луны. При обнаружении водяного льда в реголите наибольший интерес для исследований будут иметь те полярные районы, где в непосредственной близости к полюсам находятся вечно освещенные плато, на которых существует постоянная радиосвязь с Землей и вечно затененные низменности на дне кратеров с залежами льдов в реголите. В этих районах начнутся технологические эксперименты по добыче воды, выработке кислорода и водорода, по созданию инфраструктуры будущей лунной базы.

Данные о лунной полярной экзосфере важны для изучения физических процессов, разыгрывающихся на поверхности небесного тела в потоках горячей бесстолкновительной замагниченной плазмы солнечного ветра или в еще более разреженных энергичных плазменных потоках дальнего хвоста земной магнитосферы, где тоже иногда оказывается Луна. Эти исследования позволят построить количественные модели генерации и переноса



ионов, нейтральных частиц и пылевых частиц экзосферы, образующихся при воздействии на поверхность как частиц солнечного ветра, так и потоков микрометеоритов.

Знания об особенностях полярной экзосферы важны и для практических задач освоения Луны. Они позволят обеспечить безопасные условия для длительного пребывания на поверхности Луны оборудования и людей и разработать методы защиты от воздействия потоков плазмы, токсичной лунной пыли и микрометеоритов.

Проведение ядерно-физических измерений на лунной поверхности позволит оценить радиационный фон на поверхности Луны. Эти исследования предоставят данные по радиационным полям на Луне в приполярных районах как в условиях спокойного Солнца, так и во время его повышенной активности, необходимые для обеспечения условий длительного и безопасного пребывания оборудования и людей на поверхности Луны.

В целом результаты исследований могут иметь большое практическое значение – на основе данных измерений научных приборов будут отбираться районы для начала развертывания лунной космической инфраструктуры. В дальнейшем на основе этой оценки будут разрабатываться космические технологии для снабжения лунных автоматических и обитаемых комплексов непосредственно на месте кислородом, водородом, водой, другими химическими элементами и соединениями.

Как уже указывалось ранее (см. Отчеты по теме ОСВОЕНИЕ за 2021- 2022 гг.), одним из ключевым элементом миссии «Луна-25» должен был быть манипуляторный комплекс ЛМК.

Подробное описание указанного комплекса, проведенных с ним отработок возможных на лунной поверхности нештатных ситуаций, режима копания и забора проб мерзлого лунного реголита представлены в отчете по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 год. Описание наземных экспериментов по наведению ЛМК на различные объекты в его рабочей зоне представлены в отчете по теме ОСВОЕНИЕ за 2022 год. В настоящем отчете представляется необходимым остановиться на экспериментальных отработках ЛМК в АО «НПО Молния», ранее не рассматривавшихся.

После посадки КА «Луна-25» на поверхность Луны ЛМК оказался бы в неблагоприятных тепловых условиях с большим перепадом температур. Для обогрева ЛМК в периоды лунной ночи были предусмотрены постоянные нагреватели мощностью 8,5Вт в блоке управления и 1,5Вт на грунтозаборном устройстве. Так как оба нагревателя не отключаемые и работают постоянно, необходимо было разработать решение, позволявшее регулировать теплообмен днем и ночью.

На манипуляторе были установлены радиаторы, верхняя грань блока управления также используется под радиатор. В зависимости от положения Солнца над лунным горизонтом, манипулятор должен перемещаться, отслеживая движение Солнца, чтобы занимать такое положение, в котором облучение поверхностей ЛМК будет минимальным. Эта стратегия была протестирована в термовакуумной камере АО НПО «Молния». ЛМК был закреплен на специальной оснастке (см. рисунок 2.1) и помещен в камеру с имитатором Солнца.



**Рисунок 2.1** Размещение ЛМК в термовакуумной камере с имитатором Солнца

Анализ температур проводился по термодатчикам, установленным как на манипуляторе и оснастке, так и непосредственно в самом ЛМК. Для контроля измерялся тепловой поток от имитатора Солнца. Также в камере были установлены две видеокамеры. Оператор выполнял движения ЛМК и вёл постоянный контроль за всеми датчиками и нагревателями.

По результатам испытаний было установлено, что температуры хранения/работы ЛМК могут составлять до  $+85^{\circ}\text{C}$  без ущерба для его работоспособности. Была определена комплексная система управления «выживания» ЛМК на лунной поверхности, подразумевающая постоянное слежение ЛМК за положением Солнца в условиях лунного дня и использование специальной ночной парковки в период лунной ночи, которая обеспечивала практически полное закрытие поверхности радиаторов, что предотвращало ненужную потерю тепла.

Кроме работ по проекту КА «Луна-25» в 2023 г по теме ОСВОЕНИЕ выполнялись работы по решению научных задач с использованием данных российского нейтронного



телескопа ЛЕНД, работающего на орбите вокруг Луны на борту КА Лунный Разведывательный Орбитер (ЛРО) с 2009 г. Данные указанного прибора позволяют изучить распределение водородсодержащих соединений, таких как вода/водяной лед, в верхнем слое лунного реголита толщиной около 1 м в околополярных регионах.

Значительные количества водородсодержащих соединений были ранее обнаружены в полярных областях Луны по данным прибора ЛЕНД. Была выполнена оценка влияния присутствия водяного льда на топографическую неровность поверхности. Понимание этого влияния важно для будущих исследований и освоения окрестностей южного полюса Луны. Чтобы исследовать этот вопрос, были проанализированы корреляции между оценками содержания воды в верхнем метровом подповерхностном слое реголита и топографической шероховатостью южных полярных регионов Луны. Результаты показывают, что водяной лед, вероятно, играет важную роль в шероховатости поверхности на масштабе десятка метров и может оказывать подавляющее воздействие на шероховатость поверхности.

При детальном анализе отдельных кратеров оказалось, что шероховатость поверхности дна кратеров Шумейкер, Фаустини, Слейтер и Свердруп демонстрирует тенденцию к уменьшению с увеличением содержания воды в реголите при различных уменьшающихся углах наклона. Кратер Хаурт демонстрирует тенденцию некоторого возрастания шероховатости с увеличением содержания воды в реголите. Полученные результаты, вероятно, могут быть связаны с мелкомасштабными топографическими особенностями на поверхности и/или тонкими изменениями в поверхностных и подповерхностных концентрациях воды, которые, в свою очередь, влияют на шероховатость поверхности.

Кроме того, был проведен анализ свойств кратера в краевой зоне южной полярной области Луны с координатами центра  $126.59^\circ$  з.д.,  $64.32^\circ$  ю.ш. Диаметр кратера составляет 34 км. Он обладает трещиноватым дном, что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство. Абсолютный возраст образования изучаемого кратера был оценен равным  $\sim 3.85$  млрд лет по пространственной плотности наложенных на его вал малых кратеров. В окрестностях изучаемого кратера преобладает низкожелезистый анортозитовый материал. Было найдено, что бассейн исследуемого кратера очень сухой по сравнению с его окрестностью. Существенная потеря водорода/воды и ее перераспределения со дна кратера на территорию вокруг кратера могли быть вызваны переработкой поверхности вследствие внедрения магмы под кратер, следы которого прослеживаются по наличию трещин на днище кратера.

Результаты проделанной работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.3, 2.1, 2.6, 3.3, 3.5) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.4, 5.29, 5.31, 5.33).



### **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**

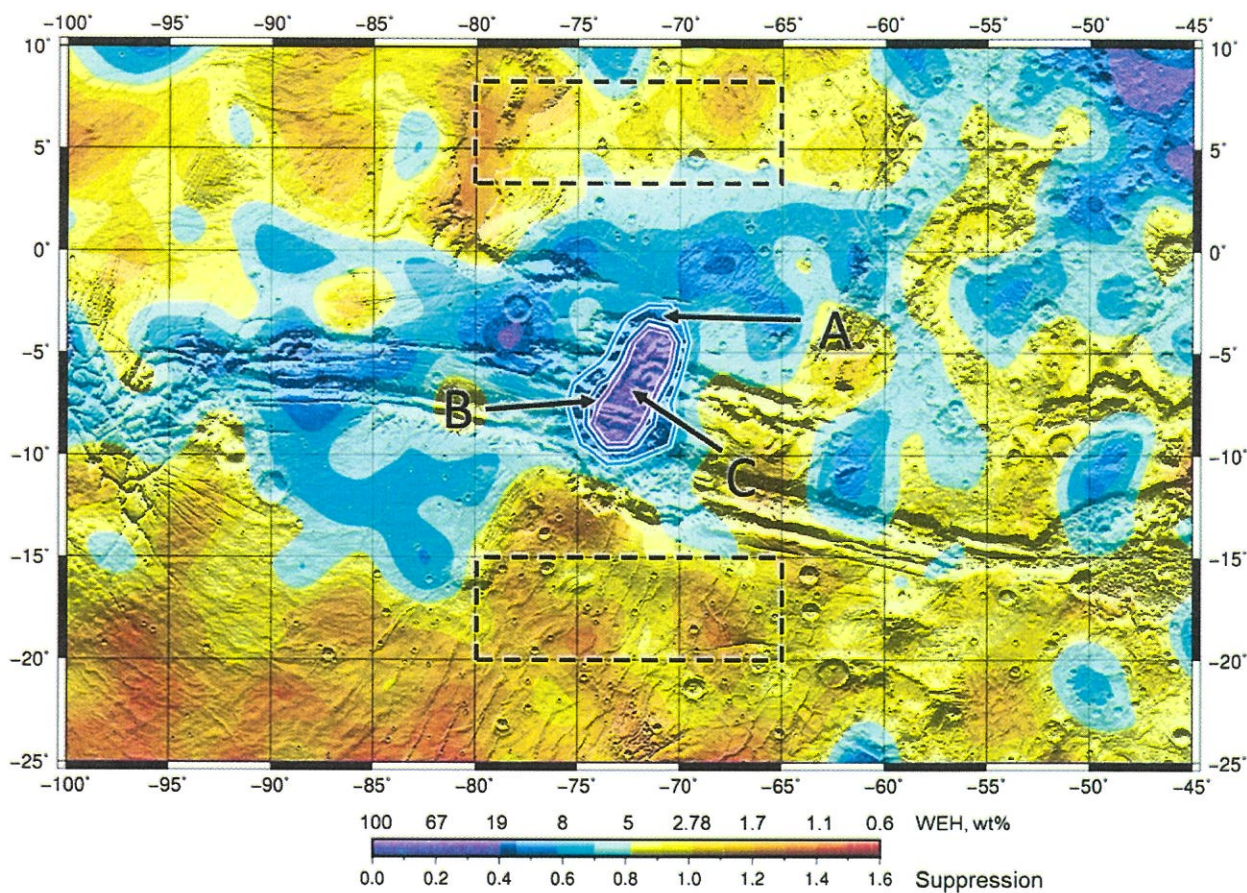
Руководитель Раздела д.ф.-м.н. М.Л. Литвак

В 2023 году была продолжена работа по изучению Марса с помощью отечественных приборов ФРЕНД на борту космического орбитального аппарата ЕКА «ТГО», ХЕНД на борту космического орбитального аппарата НАСА «Марс Одиссей» и ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити».

Продолжено картографирование собственного нейтронного излучения Марса с высоким пространственным разрешением с помощью прибора ФРЕНД (FRIEND, Fine Resolution Epithermal Neutron Detecor). Нейтронное излучение Марса возникает в верхнем слое его поверхности под воздействием потока ГКЛ. Энергетический спектр потока марсианских нейтронов зависит от концентрации атомов водорода в веществе поверхности, поскольку именно в столкновениях с протонами (то есть ядрами водорода) нейтроны в максимальной степени теряют свою энергию. Поэтому регистрация потоков нейтронов с орбиты позволяет оценить массовую долю воды в веществе различных районов поверхности, так как вода является основным водородосодержащим химическим соединением в веществе Марса. В ходе картографирования в экваториальном регионе Долин Маринер выявлен район («мерзлотный оазис») размером около 102 000 км<sup>2</sup> с очень высоким содержанием водорода. Анализ данных измерений показал, что эквивалентная массовая доля воды в веществе центральной области этого района составляет около 42%.

На рисунке 3.1 представлена карта центрального района на дне Долин Маринер. На сером фоне рельефа поверхности показаны вариации нейтронного потока (параметр Suppression, в %) и соответствующие этим вариациям оценки массовой доли воды в веществе верхнего слоя поверхности (WEN, water equivalent hydrogen, в %). Показанные пунктиром прямоугольники отмечают районы на поверхности, по отношению к которым получена оценка воды на дне Долин. Буквами А, В и С отмечены изолинии для значений массовой доли воды, соответственно 7.6, 13.6 и 41.9%. Центральный район внутри контура имеет размеры около 240 км вдоль широты и около 360 км вдоль долготы. Его площадь оценивается как 41 000 км<sup>2</sup>.





**Рисунок 3.1** Карта центрального района на дне Долины Маринеров. Оттенками синего цвета показано распределение воды (WEN, water equivalent hydrogen) по данным нейтронных измерений прибора ФРЕНД

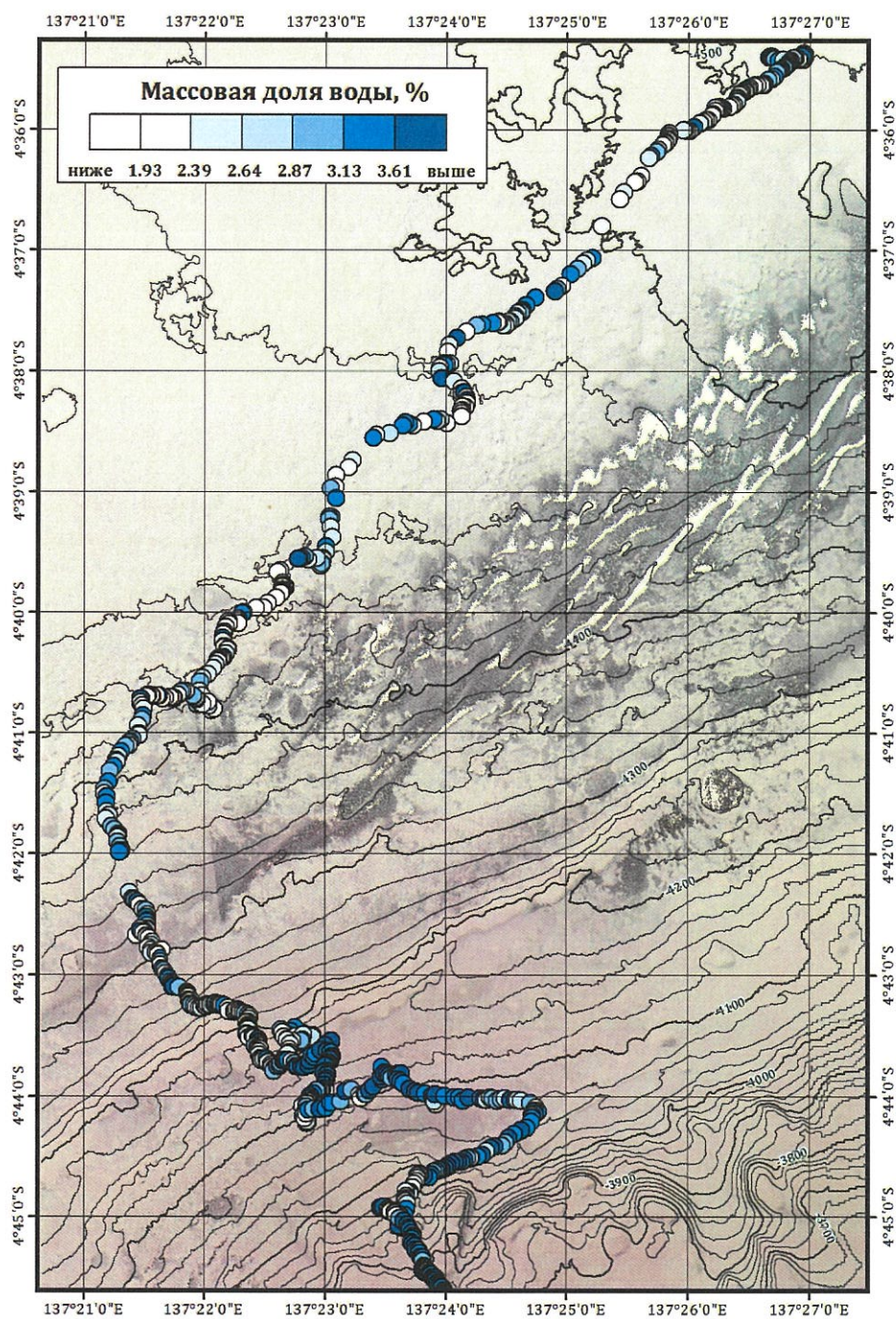
В настоящий момент изучение указанного района с помощью данных прибор ФРЕНД продолжается.

Продолжено проведение эксперимента ДАН (от англ. Dynamic Albedo of Neutrons), осуществляемого с 9 августа 2012 года в кратере Гейл на поверхности Марса с борта марсохода НАСА «Кьюриосити» в целях изучения трехмерной картины (по глубине и вдоль трассы движения марсохода) распределения воды в верхних слоях грунта Марса. Анализ получаемых данных и их сопоставление с данными других экспериментов дают представление о процессах формирования и эволюции природной среды в кратере Гейл и предоставляют важную информацию для планирования будущих, в том числе пилотируемых, экспедиций на Марс.

С августа 2012 года марсоход «Кьюриосити» прошел свыше 30 километров по поверхности Марса. За это время был проведен значительный объем измерений по нейтронному зондированию вещества поверхности в рамках эксперимента ДАН. Данные измерений, полученные в результате измерений прибора ДАН, начиная с момента посадки,

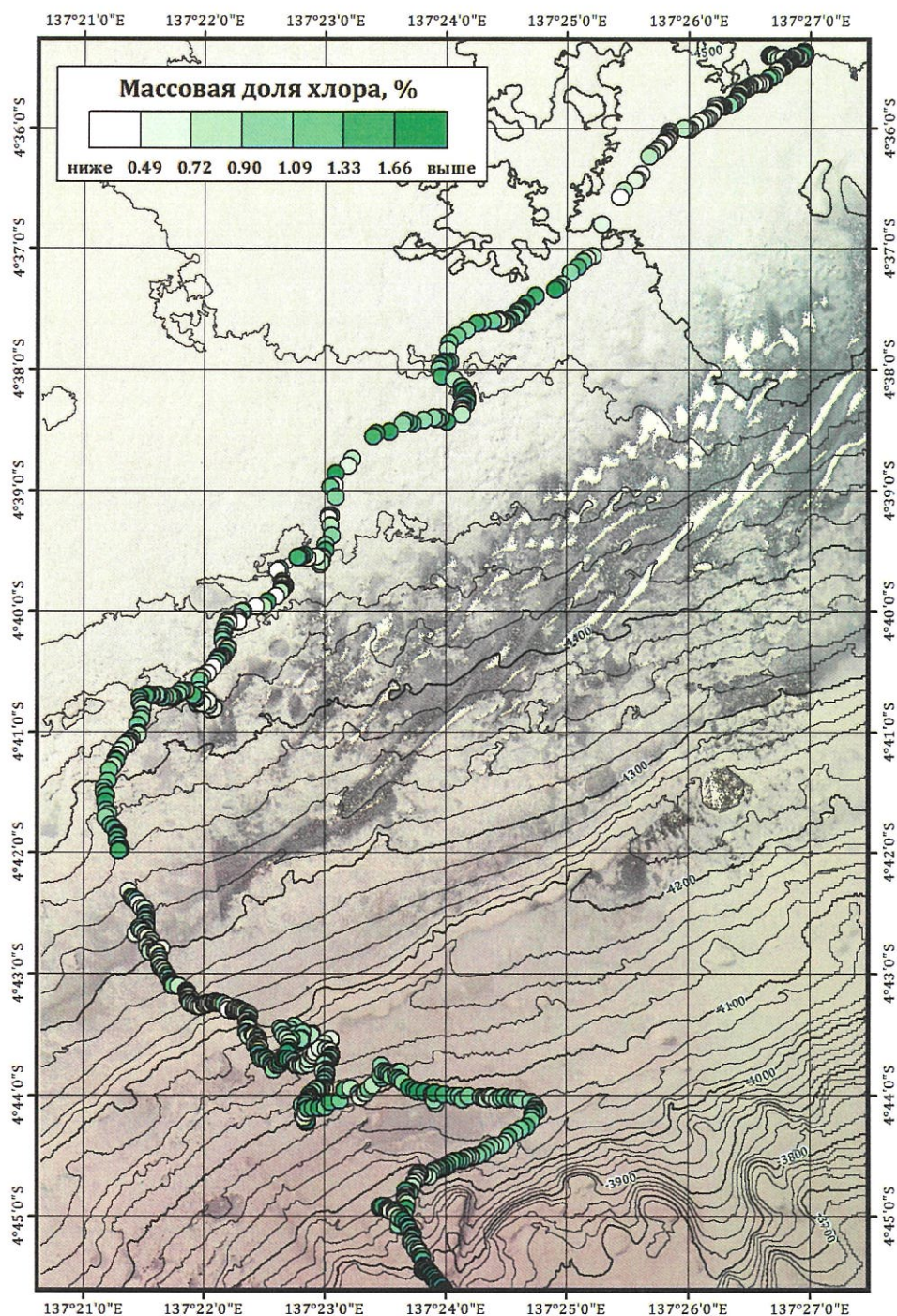


были проанализированы с применением методов численного моделирования, преобразованы в оценки массовой доли воды и хлора, систематизированы для территорий с различной геологией и обобщены в рамках единого каталога (см отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2022 г.). В каталоге результаты наблюдений представлены попиксельно в виде карты (см. рисунки 3.2, 3.3; раздел «Наиболее значимый результат» настоящего отчета) покрывающей территорию, по которой двигался и которую исследовал марсоход за 10 лет своей работы на поверхности Марса.



**Рисунок 3.2** Распределение воды в грунте вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити» по данным прибора ДАН





**Рисунок 3.3** Распределение эквивалентного хлора в грунте вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити» по данным прибора ДАН

Используя данные указанного каталога, было проведено исследование распределения хлора по глубине в грунте Марса.

Как уже указывалось ранее (см. отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2022 г.) прибор ДАН является первым в истории активным гамма- и нейтронным спектрометром, работающим на поверхности другого небесного тела. В его состав входит уникальный искусственный



источник нейтронов (импульсный нейтронный генератор или ИНГ), предназначенный для облучения грунта под марсоходом короткими нейтронными высокоэнергетическими импульсами, и детекторный блок регистрации альбеда наведенных нейтронов марсианского грунта, которое сильно зависит от распределения в нем воды и наличия поглотителей нейтронов. ДАН облучает, а затем обнаруживает нейтроны на площади размером до круга радиусом 1,5 м и на глубине до ~50 см. Таким образом, ДАН получает доступ к 5 кубическим метрам марсианской почвы/камней вокруг марсохода и является единственным инструментом на борту «Кьюриосити», позволяющим оценить объемное содержание основных элементов - поглотителей тепловых нейтронов в приповерхностном слое марсианского грунта, прежде всего водорода и хлора.

При этом необходимо учитывать, что сам по себе ДАН не может как определить точную концентрацию хлора без знания концентраций других поглотителей нейтронов, так и различить  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Вследствие этого, результаты измерений обычно представляются в виде водородного эквивалента водорода (ВЭВ), что предполагает, что весь водород, обнаруженный с помощью ДАН, связан в молекулах воды. Значение эквивалентного хлора (ЭХ) при анализе данных ДАН учитывает концентрации всех поглотителей нейтронов (не только Cl). ЭХ равен истинной концентрации хлора, если элементный состав других (не Cl) поглотителей нейтронов в данном месте соответствует элементному составу, предполагаемому в числовой модели ДАН, которая использовалась для расчета ЭХ. Если содержание поглотителей нейтронов, отличных от Cl, в месте проведения измерений отличается от предполагаемого состава, то сообщаемое значение ЭХ окажется больше или меньше истинного значения Cl.

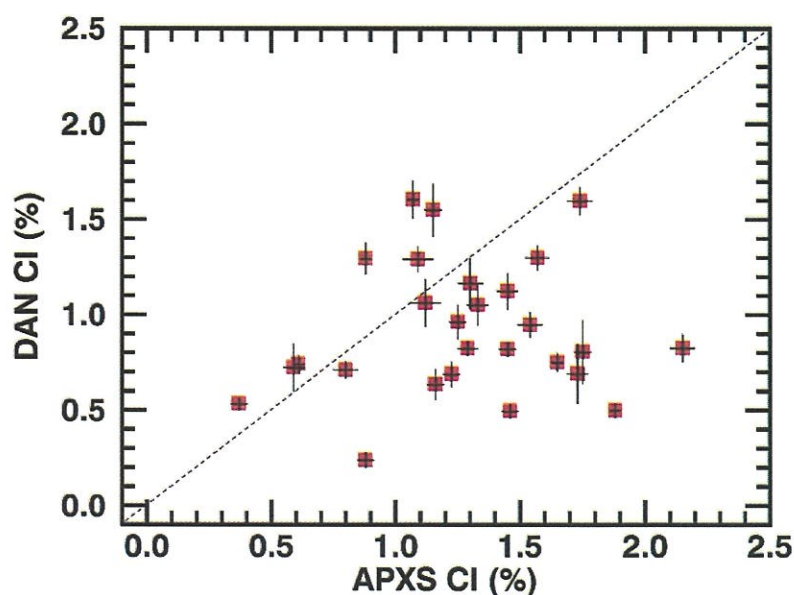
Обычно при анализе данных ДАН используется средний элементный состав (определяемый как средний состав измерений прибора APXS вдоль траверса движения «Кьюриосити») и предполагается, что он равномерно распределен по измеряемому прибором ДАН объему.

Рентгеновский спектрометр альфа-частиц APXS использует для определения содержания основных породообразующих элементов, а также некоторых второстепенных и микроэлементов в горных породах и почвах, методы индуцированной частицами рентгеновской эмиссии и рентгеновской флуоресценции. Чтобы вызвать рентгеновское излучение в образцах, он оснащен радиоизотопом кюрий-244, который испускает альфа-частицы и рентгеновские лучи. Концентрация элементов определяется по характерным площадям их рентгеновских пиков в предположении, что образец однороден, с поправкой на поглощение рентгеновских лучей внутри образца. Значения Cl имеют относительную погрешность точности около 30%, что в основном связано с неизвестным минералом,

содержащим Cl. Поглощение рентгеновских лучей Cl может сильно различаться: от более плотного NaCl до перхлоратов, таких как NaClO<sub>4</sub>. APXS имеет поле зрения диаметром около 17 мм. Сигнал хлора исходит с глубины около 15 мкм и зависит от пыли и других рыхлых поверхностных материалов, толщина которых может различаться. По этой причине APXS исследует не только покрытые пылью почвы и камни, но и поверхностные объекты, очищенные с помощью инструмента Dust Removal Tool (DRT). Операция бурения марсохода также предоставляет возможности для анализа APXS материалов из-под поверхностного слоя. Элементный состав подповерхностных слоев без пыли определяется с помощью APXS посредством анализа бурового шлама как вокруг буровых скважин, так и его излишков, сбрасываемых на грунт из системы отбора проб. Добытый при бурении материал залегает на глубине от ~1,5 до 5 см.

В целях определения распределения хлора по глубине в грунте Марса было предложено провести сравнительный анализ данных приборов ДАН и APXS. Сравнивались содержание хлора, измеренное с помощью APXS в местах бурения марсохода перед бурением (отчищенная поверхность, поверхностный хлор), содержание хлора, измеренное с помощью APXS в материалах бурения (хлор на небольшой глубине), и хлор, измеренный с помощью ДАН вокруг мест бурения (объемный хлор).

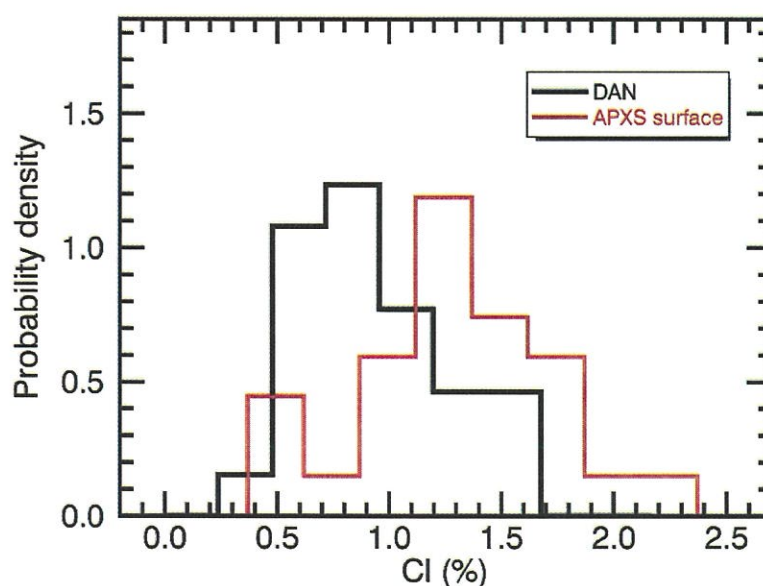
Корреляция между объемным хлором, восстановленным по измерениям ДАН, и поверхностным хлором, измеренным APXS на отчищенных поверхностях показана на рисунке 3.4. Очевидно, что она низкая.



**Рисунок 3.4** Cl, измеренный с помощью прибора APXS в местах бурения (перед бурением), в сравнении с Cl, восстановленным (с использованием элементного состава APXS) на основе измерений ДАН, произведенных около тех же мест бурения

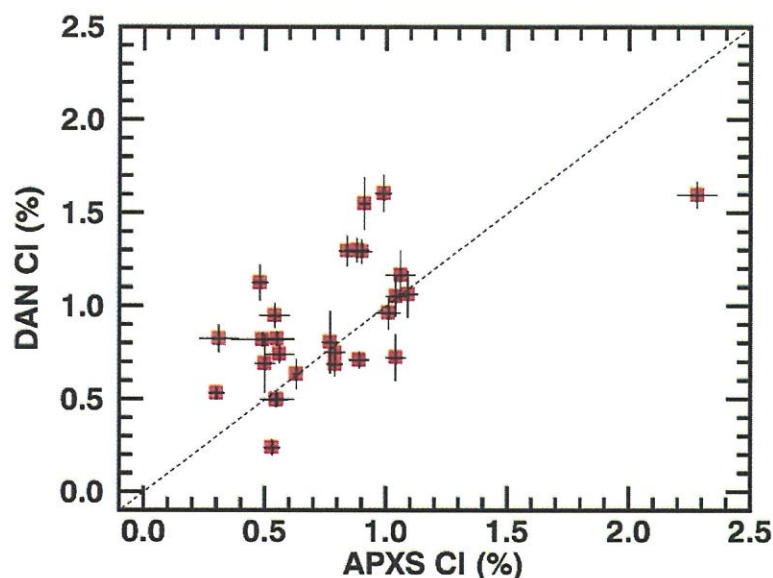


Численно это подтверждается коэффициентом линейной корреляции Пирсона, который очень низок ( $<0,1$ ) для сравнения измерений ДАН и APXS. Это означает, что вероятность того, что объемный хлор DAN соответствует поверхностному хлору APXS, пренебрежимо мала. Об отсутствии корреляции свидетельствует также тот факт, что содержание поверхностного хлора APXS ( $1,28 \pm 0,08$  мас. %) значительно выше, чем объемного хлора DAN ( $0,92 \pm 0,08$  мас. %). Сравнение распределения поверхностного хлора APXS и объемного хлора DAN представлено на рисунке 3.4, где распределение хлора APXS показано красным, а распределение восстановленного хлора ДАН - черным. Для проверки того, что эти распределения различны, был применен тест Колмогорова-Смирнова. Этот тест проверяет, взяты ли два массива/выборки значений данных из одного и того же распределения, и вычисляет соответствующую вероятность. Согласно указанному тесту, полученная вероятность составляет всего 0,2%, что подтверждает вывод о том, что распределение поверхностного хлора (десятки микрон), измеренное APXS, отличается от объемного распределения хлора (десятки сантиметров), измеренного ДАН.



**Рисунок 3.5** Распределение Cl, измеренное с помощью прибора APXS в местах бурения, и Cl, восстановленного (с использованием элементного состава APXS) на основе измерений ДАН, произведенных около тех же мест бурения

Противоположный вывод можно сделать из сравнения измерений APXS хлора на небольших глубинах (полученных на основе измерений материалов бурения) и восстановленного объемного хлора ДАН (рисунок 3.6). Корреляция между этими наборами данных относительно высока: коэффициент линейной корреляции Пирсона составляет 0,62.

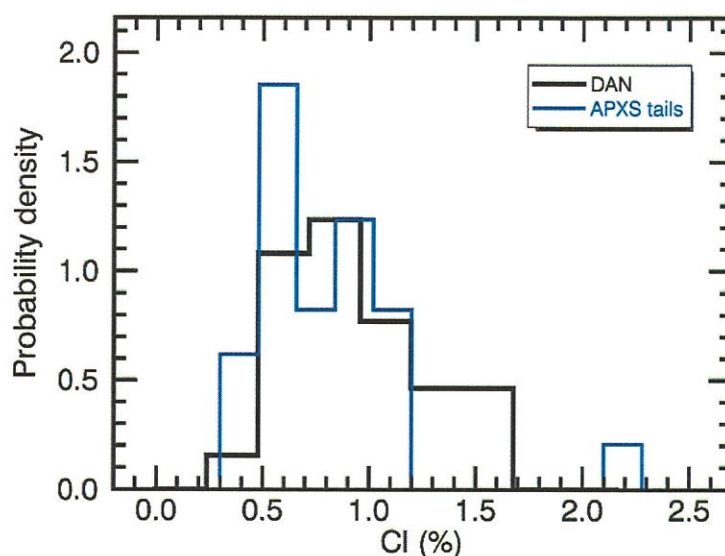


**Рисунок 3.6** Корреляция между Cl, измеренным прибором APXS в материалах бурения (после бурения), и Cl, восстановленным (с использованием элементного состава APXS) на основе измерений прибора ДАН, полученных около тех же мест бурения

В отличие от поверхностных измерений APXS, измерения материалов бурения APXS дают концентрации Cl, близкие к оценкам ДАН. Среднее значение, полученное на основе данных материалов бурения APXS, составляет  $0,78 \pm 0,07$  % масс., что находится в пределах неопределенности объемного значения ДАН  $0,92 \pm 0,08$  % масс. Статистическая разница между этими средними значениями незначительна.

На рисунке 3.7 синим цветом показано распределение хлора в материалах бурения APXS и черным цветом – в объемном распределении хлора ДАН. Они имеют схожие средние значения и форму. Применение теста Колмогорова-Смирнова дало относительно высокую (15 %) вероятность, подтвердив, что хлор APXS, измеренный в материалах бурения, и объемный хлор ДАН могут принадлежать к одному и тому же статистическому распределению.





**Рисунок 3.7** Распределение Cl, измеренное прибором APXS в материалах бурения (синий цвет), и Cl, восстановленного (с использованием элементного состава APXS) на основе измерений прибора ДАН, произведенных около тех же мест бурения

Проведенный анализ показал, что среднее значение восстановленного хлора ДАН для всех мест бурения ( $0,92 \pm 0,08$  мас. %) значительно меньше, чем значение поверхностного хлора APXS (верхний слой ~15 микрон) ( $1,28 \pm 0,08$  %), полученное на основе измерений очищенных поверхностей (места бурения после использования DRT). Это указывает на то, что поверхностные и подземные концентрации хлора различаются, и этот вывод также подтверждается пониженной концентрацией Cl в материалах бурения (глубина 1,5–5 см) по сравнению с поверхностными измерениями APXS. Одним из правдоподобных объяснений является то, что хлор, присутствующий в частицах пыли в воздухе, оседает на поверхности легче, чем другие компоненты пыли. В результате химического изменения, возможно, с участием малых количеств воды, он образует поверхность, обогащенную хлором, содержание которого превышает содержание хлора в самой пыли.

Сравнение Cl, измеренного с помощью APXS для материалов бурения (глубина от 1,5 до 5 см), и объемного Cl в подповерхностных слоях по данным ДАН (глубина ~50 см) представляет собой уникальный беспылевой метод оценки концентрации Cl в марсианских породах его изменения по глубине. Результаты этого анализа показали, что оценки Cl APXS ( $0,78 \pm 0,07$  мас.%) и ДАН ( $0,92 \pm 0,08$  мас.%) находятся в пределах погрешностей измерений. Все прикладные статистические тесты допускают, что неглубокий Cl APXS (глубина 1,5–5 см) и объемный Cl ДАН (глубина ~50 см) могут принадлежать к одному и тому же распределению.

Таким образом установлено, что распределение хлора в кратере Гейл состоит из двух компонентов - тонкого (десятки микрон) поверхностного слоя, характеризующегося более высокой концентрацией хлора (1,2–1,3 мас.%), и подповерхностного (глубиной  $\approx 0,5$  м) слоя, для которого характерна более низкая (0,8–0,9 мас.%) концентрация хлора. Высказано утверждение, что первый компонент обусловлен эловыми отложениями или продуктами их изменений, а второй предположительно сформировался в ходе активности грунтовых вод, имевших место в прошлые эпохи истории кратера Гейл.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 1.1, 1.4, 2.2, 2.5, 3.2, 3.4) и сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.1, 5.3, 5.5, 5.30, 5.32, 5.34).



#### **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

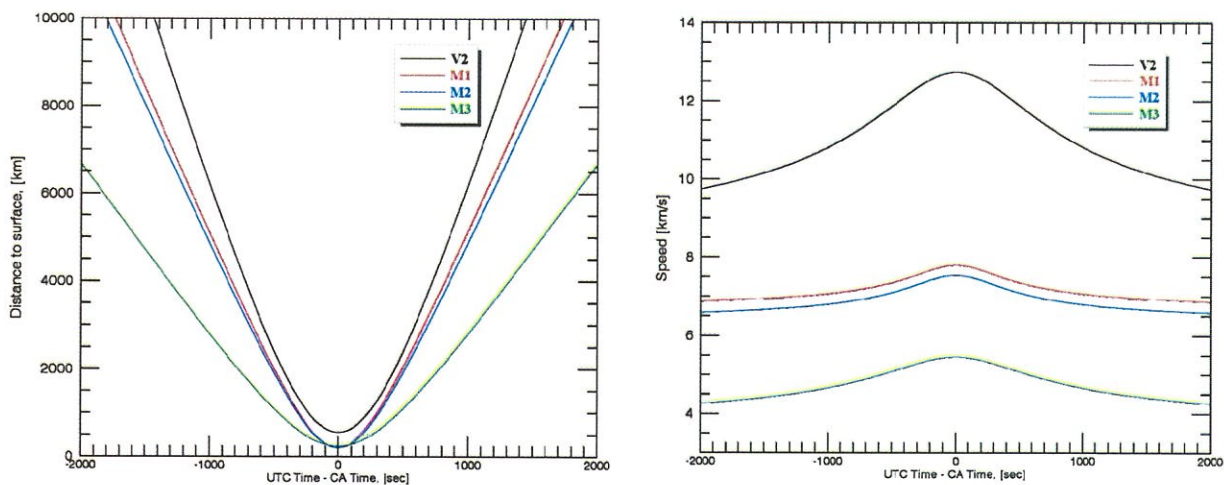
В 2023 году в ходе перелета к Меркурию продолжилась работа прибора МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) миссии ЕКА «БепиКоломбо». Эта миссия включает два аппарата: европейский МРО (Mercury Planetary Orbiter, основная цель — изучение самого Меркурия) и японский Mio, нацеленный на исследования магнитосферы планеты. Во время перелета они объединены в один перелетный комплекс МТМ. Этот комплекс был запущен 20 октября 2018 года и должен достичь Меркурия в конце 2025 года.

Прибор 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  $\text{CeBr}_3$ , обладающий максимально достижимым на сегодня среди сцинтилляционных кристаллов спектральным разрешением и эффективностью регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 250 кэВ – 10 МэВ.

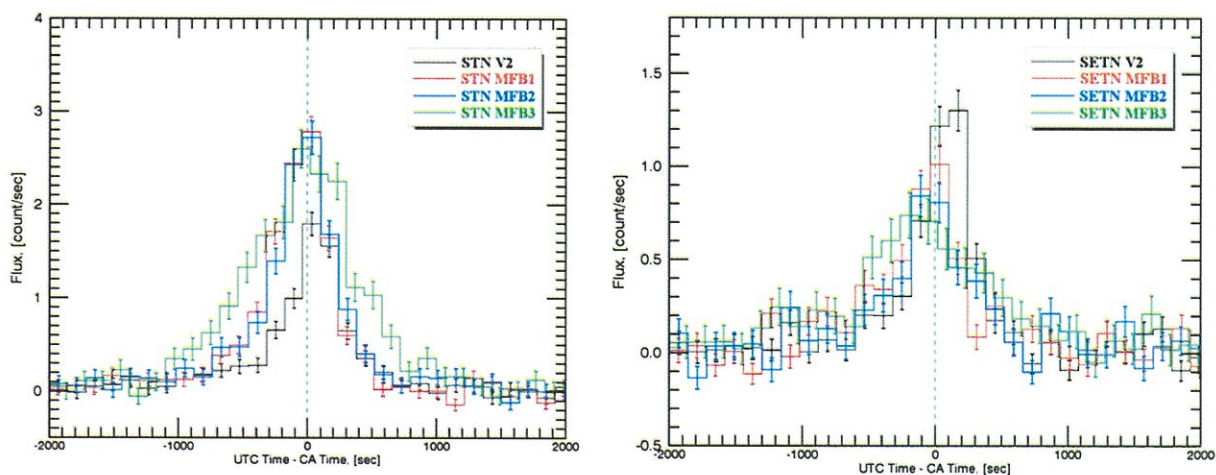
Траектория полета космического аппарата «БепиКоломбо» к Меркурию включает в себя серию гравитационных маневров у Земли, Венеры и Меркурия. В этом отчете представлены данные по второму пролету Венеры (10 августа 2021 г.), а также по первому (2 октября 2021 г.), второму (23 июня 2022 г.) и третьему (20 июня 2023 г.) пролетам Меркурия. Данные первого пролета Венеры не использовались, так как в момент наибольшего сближения космический аппарат «БепиКоломбо» находился на большом расстоянии, чтобы сигнал от планеты мог быть зафиксирован прибором МГНС с достоверной статистикой.

Во время пролетов Венеры и Меркурия были проведены специальные сеансы измерений, во время которых прибор МГНС измерял поток нейтронов с временным разрешением 20 секунд. Зависимость скорости космического аппарата и высоты над поверхностью планеты представлены на Рисунке 4.1.



**Рисунок 4.1** Второй (черный цвет) пролет у Венеры и первый (красный цвет), второй (синий цвет) и третий (зеленый цвет) пролеты у Меркурия космического аппарата «БепиКоломбо». Левый график отражает расстояние КА от планет, правый – скорость КА

Временные профили этих измерений для нейтронных детекторов STN и SETN показаны на Рисунке 4.2. Временные профили представляют собой пики, характеризующие увеличение и уменьшение потока нейтронов в детекторах STN и SETN по мере приближения и удаления от планеты, соответственно.

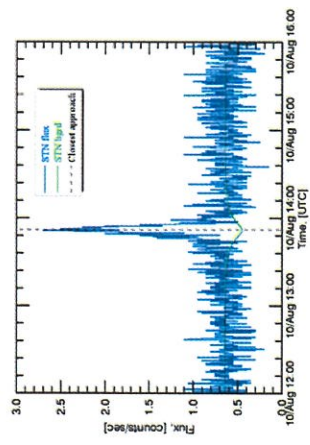


**Рисунок 4.2.** Временные профили нейтронных детекторов STN (слева) и SETN (справа) прибора МГНС для второго пролета Венеры и первых трех пролетов Меркурия. Нулевое значение соответствует минимальному сближению космического аппарата и поверхности планеты

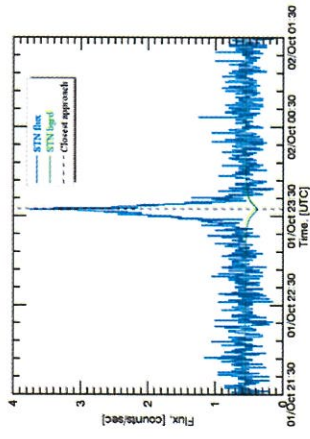
Иллюстрации вычитания нейтронного фона от космического аппарата, создаваемого ГКЛ, представлены на Рисунках 4.3-4.5.



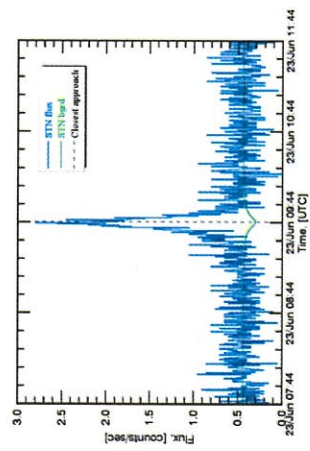
## Venus



## Mercury#1



## Mercury#2



## Mercury#3

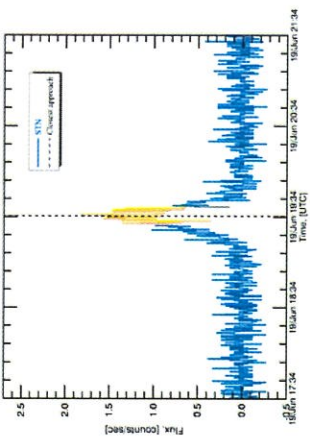
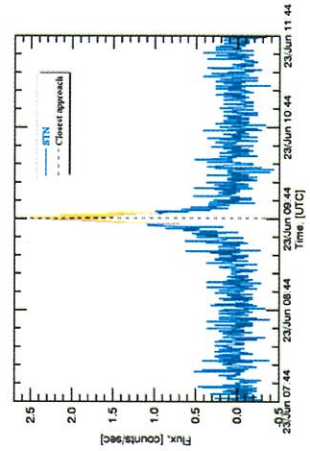
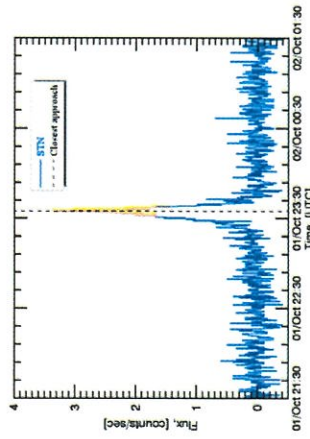
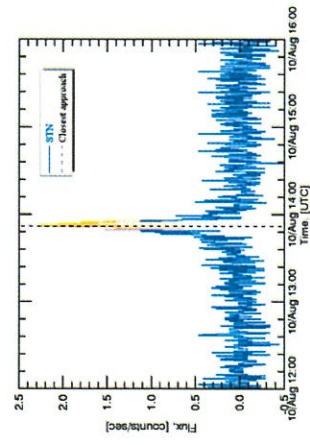
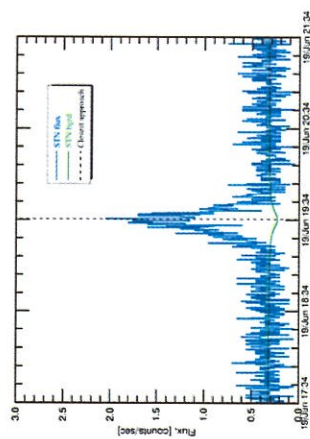


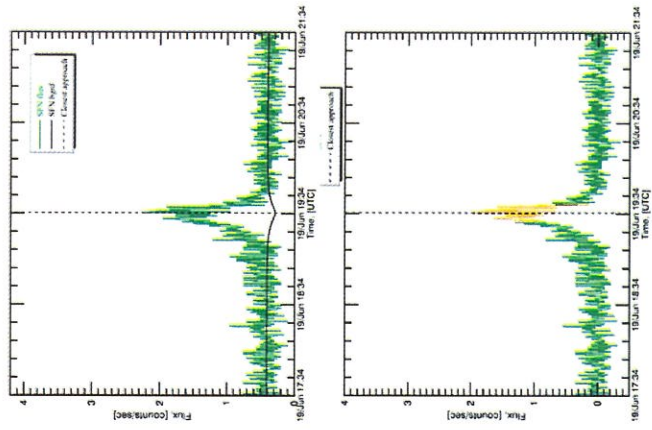
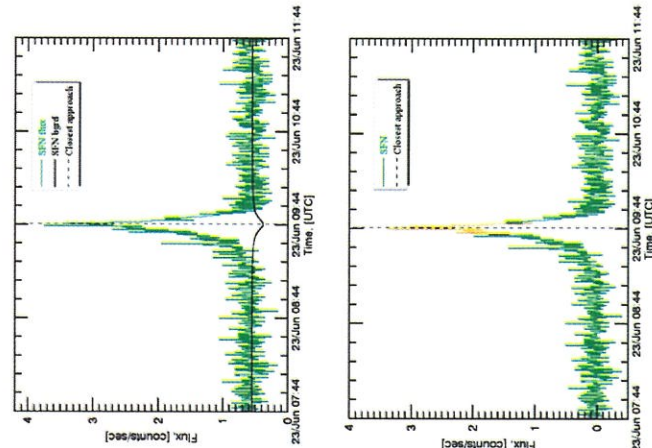
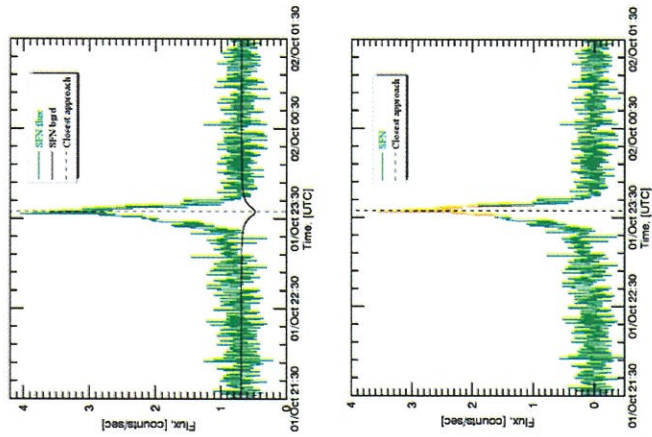
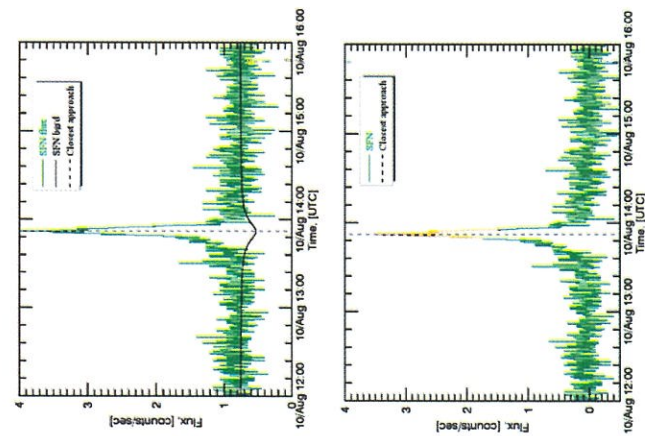
Рисунок 4.3. Временные профили нейтронного детектора STN прибора МГНС без вычитенного фона (верхний) и с вычитенным фоном (нижний) от космического аппарата в ходе пролетов Венеры и Меркурия

## Venus

## Mercury#1

## Mercury#2

## Mercury#3



**Рисунок 4.4.** Временные профили нейтронного детектора SFN прибора МГНС без вычитенного фона (верхний) и с вычитенным фоном (нижний) от космического аппарата в ходе пролетов Венеры и Меркурия



Venus

Mercury#1

Mercury#2

Mercury#3

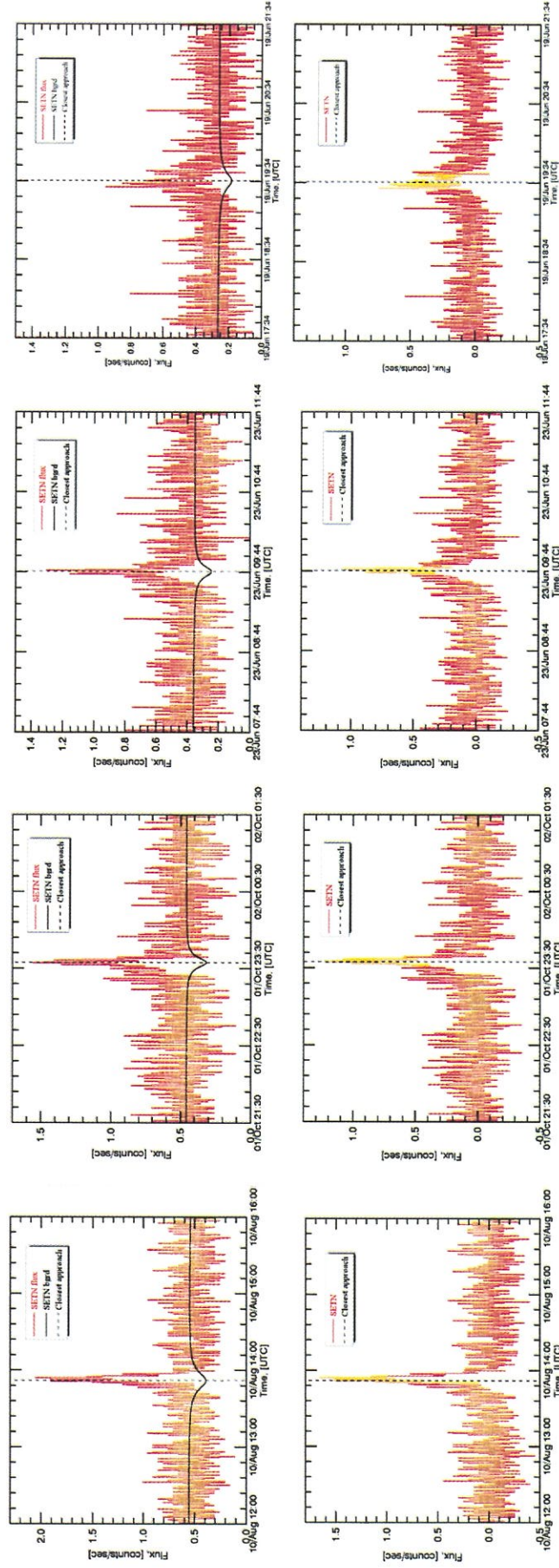
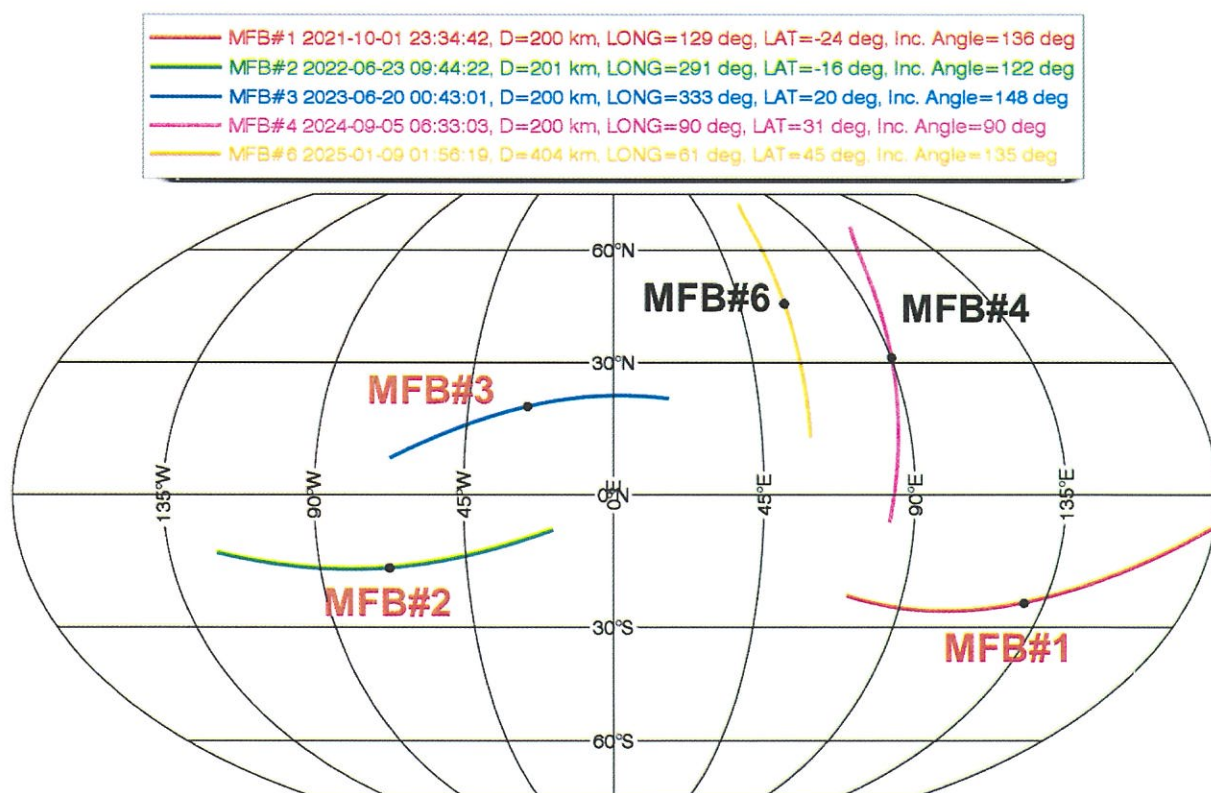


Рисунок 4.5. Временные профили нейтронного детектора SETN прибора МГНС без вычитенного фона (верхний) и вычтенным фоном (нижний) от космического аппарата в ходе пролетов Венеры и Меркурия

На Рисунке 4.6 представлена проекция орбит космического аппарата VeriColombo на поверхность Меркурия в интервале около +/- 6 мин в окрестностях точки наибольшего сближения. Красными маркерами отмечены первые три пролета, которые состоялись, как уже указывалось выше, в 2021, 2022 и 2023 годах.

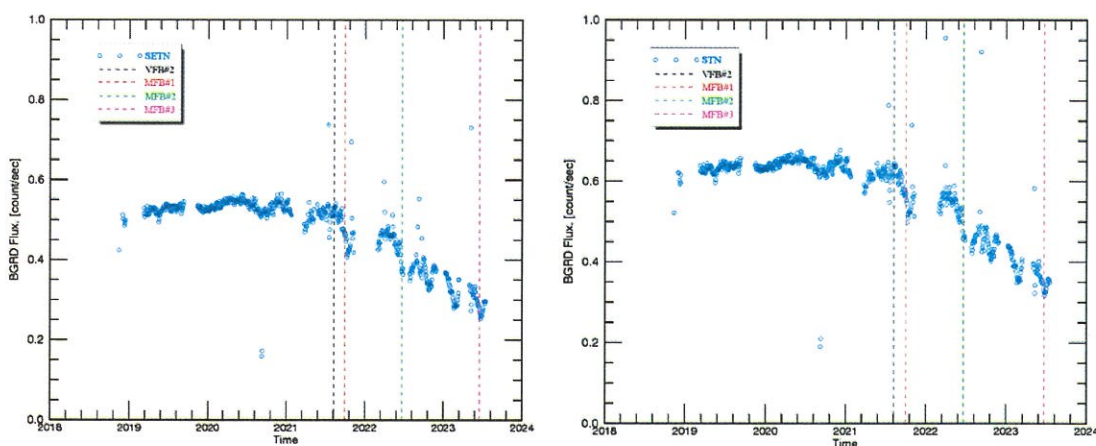
В случае Меркурия потоки нейтронов с энергиями около 1-100 МэВ образуются в неглубоком поверхностном слое под воздействием излучения галактических космических лучей. Эти нейтроны взаимодействуют с ядрами основных почвообразующих элементов посредством реакций неупругого рассеяния (если нейтроны обладают высокой энергией) или реакций захвата нейтронов (если нейтроны замедлены до тепловых энергий).

Для Венеры процессы генерации и замедления вторичных нейтронов такие же, как и для Меркурия, за исключением того, что поток нейтронов генерируется не на поверхности Венеры, а в ее атмосфере на высотах выше примерно 50-60 км. Для атмосферы Венеры элементом, который лучше всего поглощает тепловые нейтроны, является азот, содержание которого в верхних слоях атмосферы составляет около 3,0-3,5 мас. %.



**Рисунок 4.6** Проекция орбит космического аппарата VeriColombo на поверхность Меркурия в интервале около +/- 6 мин в окрестностях точки наибольшего сближения.





**Рисунок 4.7** Долгосрочные временные профили нейтронных детекторов SETN (слева) и STN (справа) прибора МГНС. Пунктирными линиями обозначены моменты времени для пролетов Венеры и Меркурия

Временные профили нейтронных сигналов, показанные на рисунке 4.2, построены с учетом изменения потока галактических космических лучей (ГКЛ). Такое изменение было определено по данным нейтронных детекторов прибора МГНС. Пример изменения потока нейтронов за счет вариации интенсивности ГКЛ для детекторов STN и SETN представлен на рисунке 4.7. Значения таких коэффициентов приведены в таблице 4.1.

**Таблица 4.1** Коэффициенты изменения потока нейтронов от КА за счет вариации интенсивности ГКЛ.

#	Fly-bys	Factor
1.	Венера: пролет#2	1.00
2.	Меркурий: пролет #1	1.13
3.	Меркурий: пролет #2	1.40
4.	Меркурий: пролет #3	1.91

Для получения модельных оценок состава поверхности Меркурия и интерпретации результатов измерений прибором МГНС в 2024 году будут подготовлены расчеты на основе метода Монте-Карло для условий окружающей среды во время полета.

Результаты работы сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.5).

## 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 2023 году были продолжены ранее начатые работы в области разработки новых образцов ядерно-космических приборов и новых детекторных сборок для перспективных космических миссий.

Завершены наземные физические калибровки научной аппаратуры БТН-М2 (см. Отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2021 г.), создаваемой для российского сегмента Международной космической станции (РС МКС).

Необходимость создания такой аппаратуры определяется прежде всего тем важным значением, которая придается обеспечению радиационной безопасности экипажей космических аппаратов, в том числе и с учетом возможности межпланетных космических перелетов и создания постоянно действующих лунных баз. Так, нейтронная компонента радиационного фона в окрестности МКС возникает в результате взаимодействия заряженных частиц (протоны из радиационных поясов, заряженные частицы галактических и солнечных космических лучей) с веществом, из которого состоит МКС. И если при работах на орбите Земли (при невысоких наклонениях орбит — ниже  $60^\circ$ ) вопрос радиационной безопасности экипажей частично решён благодаря экранированию космических лучей земной магнитосферой, то в условиях межпланетных перелётов и работах в радиационных поясах Земли безопасность экипажа напрямую зависит от окружающей радиационной обстановки.

НА БТН-М2 создается в целях обеспечения эффективной радиационной защиты на борту перспективных пилотируемых космических аппаратов, прежде всего за счет изучения физико-технических характеристик различных радиационно-защитных экранов, наполнение которых выполнено из различных материалов, создания инженерной модели радиационного фона как внутри, так и снаружи МКС, и для регистрации гамма-лучей и нейтронов во время солнечных вспышек и космических гамма-всплесков (КГВ). Создание НА БТН-М2 (см. Рисунок 5.1) обеспечивает проведение второго этапа космического эксперимент «БТН-Нейтрон» (см. раздел 1 настоящего отчета).

В процессе проведения эксперимента БТН-М1 на протяжении более семнадцати лет были изучены вариации нейтронной компоненты космического фона снаружи МКС, что позволило оценить пространственную переменность (пролеты над высокими



геомагнитными широтами и ЮАМА) и долгопериодические вариации в течение одиннадцатилетнего солнечного цикла. Было показано, что мощность нейтронной компоненты радиационной дозы возрастает в  $\sim 100$  раз при пролетах над ЮАМА по сравнению с пролетами над экваториальными районами с небольшим индексом геомагнитного обрезания. В течение одиннадцатилетнего солнечного цикла мощность нейтронной компоненты радиационной дозы менялась в пределах 1.5 – 1.6 раз (от минимума к максимуму солнечной активности).

Уже при получении первых результатов работы аппаратуры БТН-М1 стало понятно, что эксперимент «БТН-Нейтрон» существенно выиграет в научном плане, если на борту МКС появится аналогичная аппаратура, но установленная внутри гермоотсека и регистрирующая как вторичные нейтроны, так и гамма-лучи. Это позволит одновременно получать и сопоставлять измерения радиационного фона снаружи и внутри МКС. Поэтому было принято решение о продолжении эксперимента «БТН-Нейтрон» в части создания дополнительной научной аппаратуры, которая получила название БТН-М2.

Функциональные возможности предлагаемой аппаратуры было предложено расширить, чтобы не ограничиваться только анализом радиационной обстановки на МКС на орбите Земли, а также получить дополнительные данные о возможных средствах защиты от вторичной нейтронной радиации на борту космического аппарата, на основе которых можно было бы планировать будущие пилотируемые экспедиции в дальний космос к Луне и Марсу.



**Рисунок 5.1** Внешний вид НА БТН-М2

При разработке второго этапа эксперимента была использована концепция, хорошо себя зарекомендовавшая на первом его этапе: за основу берётся уже разработанный и прошедший лётные испытания прибор, к которому разрабатывается «оболочка» для адаптации интерфейсов с бортом РС МКС. В данном случае в качестве детекторной части был использован нейтронный и гамма-спектрометр МГНС (см. раздел 4 настоящего отчета), отличие заключается лишь в том, что для задач регистрации космических и наземных гамма-вспышек была использована электроника спектрометра с быстрой обработкой сигнала, также заимствованная от лётного образца прибора АДРОН-ЛР (см. отчет по теме ОСВОЕНИЕ за 2022 г.) российской миссии «Луна-Глоб» («Луна-25»).

Как уже указывалось выше, частью прибора, исходя из целей его создания, являются съёмные экраны, которые содержат внутри себя сборки материалов для исследования их защитных свойств от нейтронного излучения. Особенностью конструкции экранов и всего прибора в целом является то, что не существует ни одного прямого луча прохождения радиоактивной частицы, который бы миновал защитные слои экранов. Поскольку данные экраны являются съёмными и сменными, то методика проведения эксперимента подразумевает сравнение радиационного фона в окрестности прибора без защитных экранов и с установленными экранами для разных направлений потока нейтронов внутри станции. В процессе проведения эксперимента с аппаратурой БТН-М2 предполагается последующая доставка на РС МКС второй серии экранов с другими вариантами защитных материалов, разработанными на основе результатов эксперимента с первой серией экранов. В итоге выполнения эксперимента будут найдены оптимальные комбинации состава замедляющих и поглощающих нейтроны материалов для их последующего применения на борту пилотируемых космических аппаратов в дальнем космосе.

Основные характеристики НА БТН-М2 приведены в таблице 5.1.

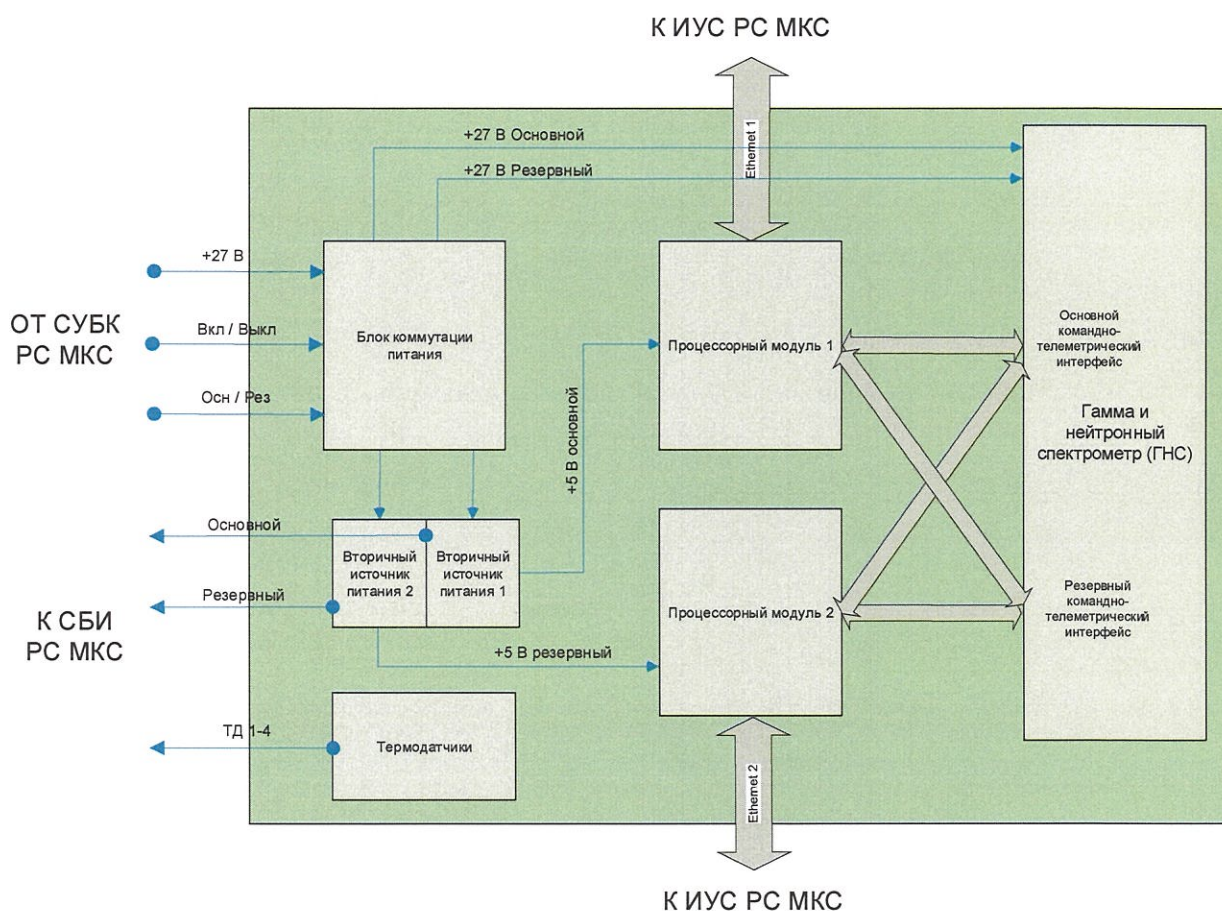
**Таблица 5.1** Основные характеристики научной аппаратуры БТН-М2

Габаритные размеры	266×450×480 мм
Масса	не более 42 кг (вместе с защитными экранами)
Потребляемая мощность	не более 15 Вт
Напряжение питания	15–50 В
Пусковой ток	не более 700 мА
Рабочий температурный диапазон	–40...+50 °С
Командно-телеметрический интерфейс	Ethernet 10/100 mbit



Объём телеметрической информации	не более 4 Мбайт/сут
Количество команд	не более 5 команд/сут
Объём внутренней памяти	2 Гбайт
Место установки	ПГО 1 МЛМ РС МКС, УРМ-В, узкая модуль-полка
Радиационная стойкость	не менее 5 крад
Назначенный ресурс	не менее 35 000 ч
Вероятность безотказной работы	не менее 0,9

Электроника НА БТН-М2 по конструкции представляет из себя дублированное устройство с двумя полукомплектами, один из которых находится в холодном резерве (см. рисунок 5.2).



**Рисунок 5.2** Блок-схема электроники НА БТН-М2

Подача первичного питания (+27 В) и переключение полукомплектов электроники производится подачей релейных команд от системы управления бортовым комплексом (СУБК). Подтверждение работы первого или второго полукомплекта соответственно, а

также мониторинг тепловых режимов прибора проводится системой бортовых измерений (СБИ) РС МКС. Обмен командной и телеметрической информацией реализован с помощью резервированного интерфейса Ethernet 10/100 Мбит. Для переключения на резервный полукомплект электроники прибора необходимо физическое переключение интерфейсного кабеля на резервный разъём средствами экипажа МКС.

Командование прибором БТН-М2 осуществляется с помощью информационно-управляющей системы (ИУС) РС МКС посылками фиксированного формата с частотой посылок не чаще одной команды в секунду; все команды подразделяются на команды для детекторного блока ГНС и для интерфейсных процессорных модулей (ПМ), производящих обработку информации.

Начало работы штатного образца аппаратуры (ШО) НА БТН-М2 на борту МКС запланировано на 2024 г.

Результаты работы сообщены научному сообществу (см. список источников, п. 5.35).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2023 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 2023 году было продолжено изучение небесных тел Солнечной системы, в том числе и с учетом перспектив их народно-хозяйственного освоения.

В связи с началом практической реализации отечественной лунной программы основное внимание было сосредоточено на научно-информационном сопровождении первой российской лунной миссии «Луна-25». Опубликованы описание и анализ программы научных исследований указанной миссии, непосредственный план научных исследований, рассмотрены состав и задачи комплекса научной аппаратуры КА «Луна-25» и наземного научного комплекса ННК-ЛГ, дана характеристика планируемых научных результатов миссии. Рассмотрены результаты испытаний лунного манипуляторного комплекса ЛМК в термовакуумной камере АО НПО «Молния», в ходе которых подтверждено, что температуры хранения/работы ЛМК могут составлять до + 85°C без ущерба для работоспособности.

Проанализированы корреляции между оценками содержания воды в верхнем метровом подповерхностном слое реголита по данным прибора ЛЕНД и топографической шероховатостью южных полярных регионов Луны. Результаты показали, что водяной лед, вероятно, играет важную роль в шероховатости поверхности на масштабе десятка метров и даже может оказывать на нее подавляющее воздействие.

В части исследований Марса проведено изучение распределения хлора по глубине в грунте Марса с использованием каталога данных о концентрации воды и хлора вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити». Установлено, что распределение хлора в кратере Гейл состоит из двух компонентов - тонкого поверхностного слоя, характеризующегося более высокой концентрацией хлора, и подповерхностного слоя, для которого характерна более низкая концентрация хлора. Высказано утверждение, что первый компонент обусловлен эоловыми отложениями или продуктами их изменений, а второй предположительно сформировался в ходе активности грунтовых вод, имевших место в прошлые эпохи истории кратера Гейл.

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 и прибора БТН-М1 на борту МКС. По данным изменений последнего установлено, что максимальная переменность мощности нейтронной компоненты радиационной дозы фиксируется при пролете северных и южных высокоширотных областей в окрестности магнитных полюсов Земли, а максимальная абсолютная величина дозы (в 50–100 раз выше, чем на экваторе) наблюдается при пролёте ЮАМА.

Проведен анализ нейтронной компоненты радиационного фона на Марсе в кратере Гейл. Результат анализа демонстрирует, что пребывание космонавтов на поверхности Марса без специальной защиты от радиации несет в себе значительный риск для их здоровья. Предложено при проектировании будущих обитаемых форпостов на Марсе использовать в том числе естественные укрытия (лавовые пещеры), расположенных в районах с высоким содержанием воды, с учетом того, что соблюдение указанного условия обеспечивает понижение потока быстрых нейтронов, а с ним и нейтронной компоненты радиационной дозы.

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 17 статей, из которых 15 опубликованы и 2 приняты к публикации (см. список источников).

Из вышеуказанных публикаций 1 подготовлена в периодическое издание, имеющие квартиль Q1, 5 – Q2, 3 – Q4. 3 публикации осуществлены в журналах, не имеющих квартиля и 5 публикаций осуществлено в сборниках материалов.

В рамках международной программы по изучению космических гамма-всплесков IPN разослано 23 циркуляра о новых гамма-всплесках, зарегистрированных российскими приборами ХЕИД на орбите вокруг Марса и МГИС на межпланетной орбите.

О полученных результатах было сделано 14 докладов на научных конференциях.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список подготовленных в 2023 г. работ:

Всего подготовлено научных публикаций в 2023 г: 56 (из них опубликовано 52, приняты к печати 2)

Статьи в зарубежных изданиях: 8 (из них 2 выполнены при поддержке РФФ);

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 6;

Публикации в сборниках и материалах конференций: 5;

Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 7;

Доклады и циркуляры: 37

### 1 Статьи в зарубежных изданиях

- 1.1 Altieri F., Frigeri A., Lavagna M., Gall A.L., Nikiforov S.Y., Stoker C., Ciarletti V., De Sanctis M.C., Josset J.-L., Mitrofanov I., Sefton-Nash E., Vago J.L. Investigating the Oxia Planum subsurface with the ExoMars rover and drill, *Advances in Space Research*, *Advances in Space Research*, Volume 71, Issue 11, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.044> Q2
- 1.2 Dachev T., Litvak M., Benton E., Ploc O., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Koleva R., Jordanova M., Bankov N., Mitev M., Mitrofanov I., Golovin D., Mokrousov M., Sanin A., Tretyakov V., Shurshakov V., Benghin V., The neutron dose equivalent rate measurements by R3DR/R2 spectrometers on the international space station, *Life Sciences in Space Research*, Volume 39, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2023.01.001> Q2
- 1.3 Li Y., Basilevsky A.T., Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Fang L.G., Analysis of the relation of hydrogen distribution and topographic roughness in the lunar south polar region, *Planetary and Space Science*, Volume 238, 2023, 105797, ISSN 0032-0633, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105797> Q2
- 1.4 Litvak, M. L., Mitrofanov, I. G., Gellert, R., Djachkova, M. V., Lisov, D. I., Vasavada, A. R., & Czarnecki, S. Depth distribution of chlorine at Gale crater, Mars, as derived from the DAN and APXS experiments onboard the Curiosity rover. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128, e2022JE007694. <https://doi.org/10.1029/2022JE007694> Q1
- 1.5 Martinez Sierra, L., Jun, I., Ehresmann, B., Zeitlin, C., Guo, J., Litvak, M., Harshman, K., Hassler, D., Mitrofanov, I., Matthiä, D., Loffler, S.. (2023). Unfolding the Neutron Flux

- Spectrum on the Surface of Mars Using the MSL-RAD and Odyssey-HEND Data. Space Weather. 21. 10.1029/2022SW003344. <http://dx.doi.org/10.1029/2022SW003344> Q2
- 1.6 Semkova J., Koleva R., Benghin V., Krastev K., Matviichuk Y., Tomov B., Maltchev S., Dachev T., Bankov N., Mitrofanov I., Malakhov A., Golovin D., Litvak M., Sanin A., Kozyrev A., Mokrousov M., Nikiforov S., Lisov D., Anikin A., Shurshakov V., Drobyshev S., Gopalswamy N. Observation of the radiation environment and solar energetic particle events in Mars orbit in May 2018- June 2022, Life Sciences in Space Research, Volume 39, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2023.03.006> Q2
- 2 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах
- 2.1 Базилевский А.Т., Санин А.Б. др. Анализ концентраций водорода в тектонически деформированном ударном кратере в районе южного полюса Луны, *Астрономический вестник*, статья принята в печать, (переводная версия: Basilevsky A.T., Sanin A.B. et al. Impact crater with of tectonic deformations in south polar region of the Moon. *Solar System Research*. (In Press)) Q4
- 2.2 Калашников Д.В., Митрофанов И.Г. Гигантский ледник на Марсе. *Земля и Вселенная*, 2023, № 3, С. 13-22, <https://doi.org/10.7868/S0044394823030027>
- 2.3 Лозников. В.М. Монте-Карло исследование средних спектров мощности GRBs, *Космические исследования*, статья принята в печать, (переводная версия: Loznikov V.M. Monte Carlo study of the average power density spectra of Gamma-Ray Bursts, *Cosmic Res*, (In Press)) Q4;
- 2.4 Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Санин А.Б., Семкова Й.В., Дачев Ц.П. Оценка нейтронной компоненты радиационного фона в кратере Гейл на Марсе. *Астрономический вестник*, 2023, Т. 57, № 3, стр. 199-208 <https://doi.org/10.31857/S0320930X23030076> (переводная версия: Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L., Sanin, A.B., Semkova, I.V. & Dachev Ts.P. Estimation of the Neutron Component of the Radiation Background in the Gale Crater on Mars. *Solar System Research*, 57, 191–199 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0038094623030073> ), Q4
- 2.5 Митрофанов И.Г., Дьячкова М.В., Калашников Д.В., Лисов Д.И., Литвак М.Л., Никифоров С.Ю. Эксперимент ДАН: термоядерный синтез для нейтронного зондирования Марса. *Земля и Вселенная*, 2023, № 3, С. 23-41, <https://doi.org/10.7868/S0044394823030039>



- 2.6 Яковлев В.А., Литвак М.Л., Козлова Т.О., Докучаев И.В., Зверев Р.С. Луна-25. Лунный манипуляторный комплекс. Робототехника и техническая кибернетика, 2023, Т. 11, № 1, DOI 10.31776/RTSJ.11109
- 3 Публикации в сборниках и материалах конференций
- 3.1 Аникин А. А., Мокроусов М. И., Митрофанов И.Г., Головин Д. В., Козырев А.С., Литвак М. Л., Никифоров С.Ю., Санин А.Б., Тимошенко Г.Н., Швецов В. Н., Павлик Е.Е. Испытания детектора из высокочистого германия в составе лабораторного макета космического гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами на протонном пучке фазотрона ОИЯИ // XX Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 12–14 апреля 2023 г. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского. М., 2023, С. 16-23, DOI: 10.21046/KMU-2023-16-24 <https://kmu.cosmos.ru/docs/2023/KMU-2023-Proceedings-v2.pdf>
- 3.2 Дьячкова М.В., Никифоров С.Ю., Лисов Д.И., Митрофанов И.Г., Литвак М. Л. Распространенность воды и хлора в геологических районах кратера Гейл на Марсе по данным эксперимента ДАН // XX Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 12–14 апреля 2023 г. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского. М., 2023, С.86-91, DOI: 10.21046/KMU-2023-86-91 <https://kmu.cosmos.ru/docs/2023/KMU-2023-Proceedings-v2.pdf>
- 3.3 Зеленый Л.М., Митрофанов И.Г., Третьяков В.И., Литвак М.Л., Калашников Д.В., Суров А.В., Прохоров В.Г. Научная программа исследований космического аппарата «Луна-25» // Автоматический космический аппарат нового поколения «Луна-25» - от исследования к освоению лунных ресурсов. Авт.-сост. В.В. Ефанов. Под ред. ак. РАН Л.М. Зеленого, д.т.н., проф. В.В. Ефанова, к.т.н. А.Е. Ширшакова. В 2-х т. Т.1. Химки, АО «НПО Лавочкина», 2023. С. 8-28, ISBN 978-5-905646-18-8, 978-5-905646-19-5 (т. 1)
- 3.4 Никифоров С.Ю., Дьячкова М. В., Митрофанов И.Г., Литвак М. Л., Лисов Д. И., Санин А.Б. Каталогизация данных эксперимента ДАН по оценке содержания воды и хлора вдоль пути следования марсохода «Кьюриосити» в кратере Гейл // XX Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, 12–14 апреля 2023 г. Сборник трудов. Под ред.

А.М. Садовского. М., 2023, С. 123-128, DOI: 10.21046/KMU-2023-123-128, <https://kmu.cosmos.ru/docs/2023/KMU-2023-Proceedings-v2.pdf>

3.5 Третьяков В.И., Митрофанов И.Г., Прохоров В.Г. Комплекс научной аппаратуры космического аппарата «Луна-25». Описание, наземные испытания и подготовка к полету // Автоматический космический аппарат нового поколения «Луна-25» - от исследования к освоению лунных ресурсов. Авт.-сост. В.В. Ефанов. Под ред. ак. РАН Л.М. Зеленого, д.т.н., проф. В.В. Ефанова, к.т.н. А.Е. Ширшакова. В 2-х т. Т.1. Химки, АО «НПО Лавочкина», 2023. С. 279-299, ISBN 978-5-905646-18-8, 978-5-905646-19-5 (т. 1)

#### 4 Статьи, выполненные при поддержке РНФ и РФФИ

4.1 Mokrousov, M.I., Mitrofanov, I.G., Anikin, A.A., Golovin D.V., Kozyrev, A.S., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Sanin A.B., Timoshenko G.N., Shvetsov V.N., Pavlik E.E. Laboratory Working Out of a Space Experiment on Gamma Spectrometry of Planetary Matter with a High-Purity Germanium Detector Using the Method of Tagged Charged Particles. Phys. Part. Nuclei Lett. 20, 1016–1029 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1547477123050540> , Q3

4.2 Mitrofanov, I.G., Golovin D.V., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Sanin A.B., Anikin, A.A., Kozyrev, A.S., Mokrousov, M.I., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Pavlik E.E.. On gamma-ray spectrometry of rare earth elements on the moon: Reference data from proton accelerator experiment, Acta Astronautica, Volume 209, 2023, Pages 21-30, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.04.018> , Q1

#### 5 Доклады, тезисы, циркуляры

5.1 .Golovin, D.V.; Mitrofanov, I.M.; Sanin, A.B.; Litvak, M.L.; Djachkova, M.V. Boundaries of Martian Permafrost at North and South Hemisphere, as Seen by FREND Neutron Telescope, 54th Lunar and Planetary Science Conference, held 13-17 March, 2023 at The Woodlands, Texas and virtually. LPI Contribution No. 2806, id.1986, [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023LPICo2806.1986G/PUB\\_PDF](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023LPICo2806.1986G/PUB_PDF)

5.2 Golovin, D.V.; Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Sanin A.B., Shvetsov V.N., Pavlik E.E. The gamma-ray spectroscopy of Rare Earth elements in lunar subsurface, The Fourteenth Moscow Solar System Symposium, 14M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2023, 14MS3-MN-18 [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)



- 5.3 Djachkova, M.V.; Nikiforov, S.Y.; Mitrofanov, I.G.; Litvak, M.L.; Lisov, D.I.; Sanin, A.B. Water and Chlorine Abundances Within Distinct Geological Units in Gale Crater. 54th Lunar and Planetary Science Conference, held 13-17 March, 2023 at The Woodlands, Texas and virtually. LPI Contribution No. 2806, id.2160, [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023LPICo2806.2160D/PUB\\_PDF](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023LPICo2806.2160D/PUB_PDF)
- 5.4 Djachkova, M.V.; Sanin A.B., Elyashev Y.D., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Polyansky I.V., Zubarev A.E. Studies of the floor of Zeeman lunar polar crater with LRO and Luna-25 data, The Fourteenth Moscow Solar System Symposium, 14M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2023, 14MS3-MN-11, [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
- 5.5 Dyachkova, M.V.; Nikiforov, S.Y.; Mitrofanov, I.G.; Litvak, M.L.; Lisov, D.I.; Sanin, A.B. Hydrated minerals in gale crater on Mars: Joint analysis of orbital and surface data. 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, 2-6 October 2023. ID: 79648. <https://iafastro.directory/iac/paper/id/79648/abstract-pdf/IAC-23,A3,3B,5,x79648.brief.pdf>
- 5.6 Kozyrev, A.S.; Bakhtin B.N., Benkhoff J., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Sanin A.B. Three Mercury flybys: observations of neutron and gamma-ray fluxes by MGNS instrument onboard the ESA's BepiColombo mission, The Fourteenth Moscow Solar System Symposium, 14M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2023, 14MS3-MN-01, [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
- 5.7 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230116B (short), GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33200, January 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33200.gcn3>
- 5.8 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230209B, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33323, February 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33323.gcn3>
- 5.9 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230307A (long/very bright), GRB Coordinates Network, Circular Service, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33413, March 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33413.gcn3>
- 5.10 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. Improved IPN localization for GRB 230307A, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33425, March 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33425.gcn3>

- 5.11 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. Further improved IPN localization for GRB 230307A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33461, March 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33461.gcn3>
- 5.12 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230308A (short/bright). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33477, March 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33477.gcn3>
- 5.13 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230304B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33480, March 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33480.gcn3>
- 5.14 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230309A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33484, March 2023, <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/33484.gcn3>
- 5.15 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230418A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33659, April 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.33659....1K/abstract>
- 5.16 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230430A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33718, May 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.33718....1K/abstract>
- 5.17 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. Improved IPN triangulation of GRB 230512A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 33808, May 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.33808....1K/abstract>
- 5.18 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230616A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34046, June 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34046....1K/abstract>
- 5.19 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230625B (ultra-long). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34126, June 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34126....1K/abstract>
- 5.20 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230715D. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34230, July 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34230....1K/abstract>
- 5.21 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230723A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34258, July 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34258....1K/abstract>



- 5.22 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230803A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34330, August 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34330....1K/abstract>
- 5.23 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230815B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34454, August 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34454....1K/abstract>
- 5.24 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230906A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34637, September 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34637....1K/abstract>
- 5.25 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230911D (long). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34669, September 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34669....1K/abstract>
- 5.26 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 230919A (short), GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34752, September 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34752....1K/abstract>
- 5.27 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 231020A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34917, October 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34917....1K/abstract>
- 5.28 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. Fermi GRB 231030B: Global MASTER-Net observations report. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 34918, October 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.34918....1L/abstract>
- 5.29 Kozyrev, A. S.; Golovin, D. V. et al. IPN triangulation of GRB 231205A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 35304, December 2023, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023GCN.35304....1K/abstract>
- 5.30 Lisov, D. I., Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Sanin A.B. In-flight selection of landing site for lunar polar lander, The Fourteenth Moscow Solar System Symposium, 14M-S<sup>3</sup>, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2023, 14MS3-MN-22, [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
- 5.31 Litvak, M.L.; Mitrofanov, I.G.; Gellert, R.; Djachkova, M.V.; Lisa, D. I.; Vasavada, A.R. Using Curiosity DAN and APXS data we examine depth distribution of Cl at Gale and revealed two components: surface Cl (concentration>1%) and shallow Cl (<1%). 54th Lunar and Planetary Science Conference, held 13-17 March, 2023 at The Woodlands, Texas and virtually. LPI Contribution No. 2806, id.1997, [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023LPICo2806.1997L/PUB\\_PDF](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023LPICo2806.1997L/PUB_PDF)

- 5.32 Litvak, M.L.; Mitrofanov I.G., Sanin A.B. The experiment LEND: 14 years observations of lunar neutron albedo, The Fourteenth Moscow Solar System Symposium, 14M-S<sup>3</sup>, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2023, 14MS3-MN-12, [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
- 5.33 Nikiforov, S.Y.; Djachkova, M.V.; Mitrofanov, I.G.; Litvak, M.L.; Lisov, D.I.; Sanin, A.B.; Vasavada, A.R. Catalogization of DAN Data for Water Equivalent Hydrogen and Absorption Equivalent Chlorine Along the First 27 km Part of Traverse of Curiosity. 54th Lunar and Planetary Science Conference, held 13-17 March, 2023 at The Woodlands, Texas and virtually. LPI Contribution No. 2806, id.1931 [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2023LPICo2806.1931N/PUB\\_PDF](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023LPICo2806.1931N/PUB_PDF)
- 5.34 Nikiforov, S.Y.; Dyachkova, M.V., Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L., Lisov, D.I., Sanin, A.B. DAN Catalog of water and chlorine distributions along the traverse of Curiosity rover. 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan, 2-6 October 2023. IAC-23,A3,IPB,7,x79620. <https://iafastro.directory/iac/paper/id/79620/ext/appendix/IAC-23,A3,IPB,7,x79620.pdf>
- 5.35 Sanin, A.B.; Mitrofanov I.G., Litvak M.L. On the neutron emission from the south polar region of the Moon, The Fourteenth Moscow Solar System Symposium, 14M-S<sup>3</sup>, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2023, 14MS3-MN-19, [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
- 5.36 Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Головин Д.В., Пеков А.Н., Мокроусов М.И. Эксперимент «БТН-нейтрон»: наблюдение за нейтронной компонентой радиационного фона в окрестности МКС, Наука на МКС: Третья международная конференция, посвящённая 25-летию Международной космической станции, ИКИ РАН, Москва, 20–23 ноября 2023 г., <https://iss-science.cosmos.ru/docs/2023/nauka-na-mks-v4.pdf>
- 5.37 Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г., Аникин А.А., Головин Д.В., Карпушкина Н.Е., Козырев А.С., Литвак М.Л., Пеков А.Н., Санин А.Б., Третьяков В.И. Второй этап космического эксперимента «БТН-нейтрон» на борту российского сегмента международной космической станции: научная аппаратура БТН-М2, Наука на МКС: Третья международная конференция, посвящённая 25-летию Международной космической станции, ИКИ РАН, Москва, 20–23 ноября 2023 г., <https://iss-science.cosmos.ru/docs/2023/nauka-na-mks-v4.pdf>