

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

УДК 520.2/4:523.3/4:520.6.04/08 523.3/4 520.876:523.3/4

Рег. № НИОТКР АААА-А18-118012290370-6

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ИКИ РАН,

Член-корреспондент РАН

А.А. Петрукович

« 20 » декабря 2019 г.

М.п.



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)

по теме

ОСВОЕНИЕ

0028-2019-0003

Научный руководитель

заведующий отделом 63 ИКИ РАН,

д.ф.-м.н.

И.Г. Митрофанов

Москва 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



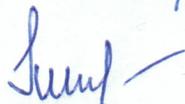
(И.Г. Митрофанов)

подпись, дата

(введение, заключение, раздел 1)

13/12/19

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



(М.Л. Литвак)

подпись, дата

(разделы 2, 3, 5)

13.12.2019

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



(А.Б. Санин)

подпись, дата

(раздел 2)

13.12.2019

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



(А.С. Козырев)

подпись, дата

(раздел 4)

13.12.2019

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



(М.И. Мокроусов)

подпись, дата

(раздел 5)

13.12.19.

научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН



(С.Ю. Никифоров)

подпись, дата

(раздел 3)

13.12.19

младший научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН



(М.В. Дьячкова)

подпись, дата

(раздел 3)

13.12.2019

ведущий специалист
отдела 63 ИКИ РАН



(Д.В. Калашников)

подпись, дата

(введение,

13.12.2019

заключение, разделы 1, 2, 3, 5)

РЕФЕРАТ

Отчет – 62 стр., 16 рис., 3 табл., 34 источн.

ЯДЕРНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ, ЛУНА, МАРС, ВЕНЕРА, МЕРКУРИЙ, КРАТЕР ГЕЙЛ, ПРИБОР ДАН, ГАММА-ВСПЛЕСКИ, РЕГОЛИТ, ГЕОЛОГИЯ МАРСА, НЕЙТРОН, ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ, ГАММА – И НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР, МЕЧЕННЫЕ НЕЙТРОНЫ, ВОДА, ПРИБОР МГНС, ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ЛУНОХОД, МАРСОХОД, ГРУНТОЗАБОРНОЕ УСТРОЙСТВО, ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ, РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Важнейшие результаты за 2019 год.....	7
1 Изучение космического гамма- и нейтронного излучения; оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел солнечной системы; исследование радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий	9
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	11
2.1 Метод моделирования переноса нейтрона с поверхности на орбиту с учетом время жизни нейтрона и гравитационного поля планеты и его практическое применение для анализа экспериментальных данных прибора ЛЕНД на борту космического аппарата НАСА «ЛРО»	11
2.2 Возможные оптимальные конфигурации гамма- и нейтронных спектрометров, предназначенных для установки на перспективные отечественные луноходы	18
2.3. Глубинные грунтозаборные устройства для будущих отечественных посадочных миссий на полярную Луну	26
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	35
3.1. Построение профиля пространственной переменности массовой доли воды в веществе кратера Гейл вдоль всей трассы движения марсохода «Кьюриосити»	35
3.2 Обнаружение пространственной корреляции повышенного содержания воды в метровом слое грунта кратера Гейл с присутствием на поверхности гидратированных минералов на основании сопоставления полученных данных прибора ДАН с данными ИК-спектрометра CRISM на борту искусственного спутника Марса MRO	38
4 Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы	42
5 Разработка перспективных научных приборов	

на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению	48
Заключение.....	54
Список использованных источников	56
Приложение. Список работ, опубликованных в 2019 году	61

ВВЕДЕНИЕ

Институт космических исследований Российской академии наук проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в соответствии с государственным заданием ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ по следующим научным направлениям.

– Фундаментальные и прикладные научные исследования в области астрофизики и радиоастрономии (номер направления в Программе 16, 14)

– Фундаментальные и прикладные научные исследования в области Физики космической плазмы, энергичных частиц, Солнца и солнечно- земных связей (номер направления в Программе 16, 14)

– Фундаментальные и прикладные научные исследования планет и малых тел Солнечной системы (номер направления в Программе 16, 71)

– Фундаментальные и прикладные научные исследования планеты Земля (номер направления в Программе 79,80)

– Фундаментальные и прикладные научные исследования в области механики, систем управления и информатики (номер направления в Программе 21)

– Развитие исследовательской, конструкторской, опытно-экспериментальной базы научного космического приборостроения и методов экспериментальной физики (номер направления в Программе 16)

Эти направления НИР и ОКР соответствуют следующим направлениям фундаментальных исследований, указанным в Программе фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 03 декабря 2012 г., № 2237-р

№ п/п	Направление фундаментальных исследований	Номер направления в «Программе»
1	Современные проблемы астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, в том числе происхождение, строение и эволюция Вселенной, природа темной материи и темной энергии, исследование Луны и планет, Солнца и солнечно-земных связей, развитие методов и аппаратуры внеатмосферной	16

	астрономии и исследований космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач.	
2	Современные проблемы физики плазмы, включая физику астрофизической плазмы, физику низкотемпературной плазмы и основы её применения в технологических процессах.	14
3	Закономерности формирования минерального, химического и изотопного состава Земли. Космохимия планет и других тел Солнечной системы. Возникновение и эволюция биосферы Земли, биогеохимические циклы и геохимическая роль организмов.	129
4	Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика: инфраструктура пространственных данных и ГИСТехнологии.	138
5	Эволюция окружающей среды и климата под воздействием природных и антропогенных факторов, научные основы рационального природопользования и устойчивого развития; территориальная организация хозяйства и общества.	137
6	Общая механика, навигационные системы, динамика космических тел, транспортных средств и управляемых аппаратов, механика живых систем.	21

Фундаментальные и прикладные научные исследования планет и малых тел Солнечной системы проводятся по теме 0028-2019-0003 ОСВОЕНИЕ

Тема 0028-2019-0003 ОСВОЕНИЕ является частью государственного задания ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ.

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2019 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.

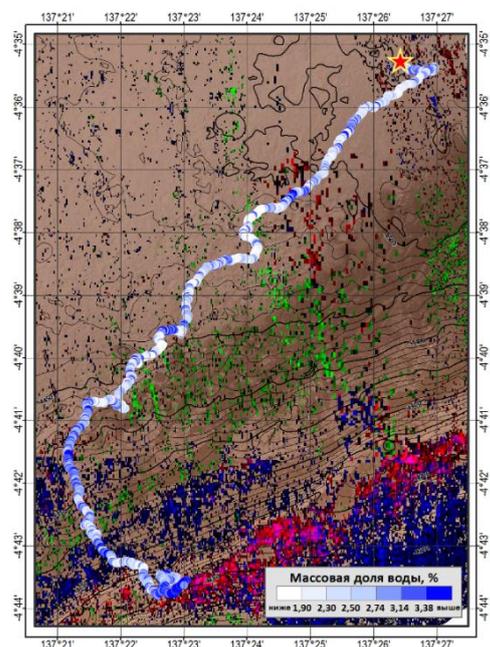
Тема ОСВОЕНИЕ. Исследование Луны, планет и объектов Солнечной системы методами ядерной физики для изучения физической природы этих небесных тел для выяснения условий их освоения.

Гос.рег. № АААА-А18-118012290370-6

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Митрофанов И.Г.

Важнейшие результаты за 2019 год. По данным российского активного нейтронного спектрометра ДАН построен профиль пространственной переменности массовой доли воды в веществе кратера Гейл вдоль трассы движения марсохода НАСА Curiosity. На основании сопоставления полученных данных с данными ИК-спектрометра CRISM на борту искусственного спутника Марса MRO обнаружена пространственная корреляция повышенного содержания воды в метровом слое грунта с присутствием на поверхности гидратированных минералов

Никифоров С.Ю., Дьячкова М.В., Лисов Д.И., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Мокроусов М.И., Санин А.Б.



Для обработки данных измерений российского нейтронного спектрометра ДАН на борту марсохода НАСА Curiosity разработана методика оценки содержания воды в марсианском грунте на основе совместного анализа данных активных измерений в точках остановок и пассивных измерений, проведенных непрерывно как во время движения, так и во время остановок. С помощью этой методики построен непрерывный профиль содержания воды в метровом приповерхностном слое грунта кратера Гейл вдоль всей трассы движения марсохода от точки посадки до его положения на конец 2019 года (см. рисунок¹). Получена оценка средней массовой доли воды 2,6 %, обнаружены локальные области с предельно высокой и низкой концентрациями воды, 6,3 % и 0,4 % соответственно.

¹ Звездочкой обозначено место посадки. На фоне рельефа дна кратера цветными вкраплениями показаны области распространенности гидратированных минералов по данным спектрометра CRISM. Красный и ярко-розовый цвета соответствует филосиликатам, зеленый - моногидратированным сульфатам, синий - полигидратированным сульфатам. Уровни рельефа местности проведены через каждые 10 м.

Проведено сопоставление данных прибора ДАН о содержании воды в приповерхностном слое вещества с данными прибора CRISM на борту орбитального аппарата MRO о присутствии на поверхности кратера гидратированных минералов. Установлено, что области, на поверхности которых обнаружены полигидратированные сульфаты и полисиликаты, также имеют повышенное содержание воды в приповерхностном слое толщиной около 1 метра. Этот результат подтверждает гипотезу о присутствии жидкой воды на поверхности Марса в течении ранних эпох его геологической истории и позволяет проследить особенности формирования и эволюции поверхности кратера Гейл на всем протяжении его существования.

Публикации:

Nikiforov S.Y., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Lisov D.I., Djachkova M.V., Jun I, Tate C.G. and Sanin A.B. Assessment of water content in martian soil along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument, *Icarus*, submitted for publication;

Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Lisov D.I., Litvak M.L., and Sanin A.B. Testing correspondence between areas with hydrated minerals, as observed by CRISM onboard MRO, and spots of enhanced subsurface water content, as found by DAN along the traverse of Curiosity, *Icarus*, submitted for publication.

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 2019 году были продолжены исследования космического радиационного фона в различных областях Солнечной системы на основе анализа данных измерений следующих космических экспериментов:

- ХЕНД на борту марсианского искусственного спутника НАСА «Марс Одиссей»;
- БТН-М1 на Российском сегменте Международной космической станции;
- ЛЕНД на борту лунного искусственного спутника НАСА «ЛРО»;
- МГНС на борту межпланетного космического аппарата ЕКА «БепиКоломбо».

Был измерен профиль долгопериодической переменности потока галактических космических лучей (ГКЛ) на околомарсианской орбите, который был сопоставлен с результатами измерений ГКЛ на наземном нейтронном мониторе «Оулу». Наблюдаемое увеличение потока ГКЛ во внутренней части Солнечной системы вызвано минимумом текущего 24-го цикла солнечной активности.

Продолжались исследования исторических солнечных вспышек на основе наблюдений в различных диапазонах электромагнитного излучения с бортов космических аппаратов в различных точках Солнечной системы. В частности, была изучена мощная солнечная вспышка 1 мая 2013 года, которая сопровождалась корональным выбросом вещества со средней скоростью около 400 км/сек. Совместный анализ данных измерений этой вспышки приборами космической обсерватории RHESSI и прибором ХЕНД показал, что область корональной эжекции вещества разогревается потоками нетепловых электронов с энергиями свыше 20 кэВ из внутренних областей солнечной короны.

Продолжались исследования нейтронной компоненты радиационного фона на поверхности Марса на основе анализа данных измерений российского прибора ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити». Был выполнен совместный анализ данных измерений приборов ДАН и REMS с учетом состава марсианского грунта в районе расположения марсохода.

Данные, полученные отечественным прибором ХЕНД, установленным на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей», и обработанные в отделе 63 ИКИ РАН были, наряду с другими данными межпланетной сети наблюдений гамма-всплесков (ИПН),

были использованы для определения положения их источников на небесной сфере. Были определены небесные координаты источников для семи гамма-всплесков, среди которых был исключительно яркий и продолжительный гамма-всплеск GRB 190129B¹.

Данные прибора ХЕНД также анализировались для поиска эффекта гравитационного линзирования гамма-всплесков. Был исследован 2301 случай гамма-всплесков, зарегистрированных в период с 1994 по 2017 год прибором «Конус-ВИНД» и учтенных в ИПН. В ходе исследования из 2646150 пар гамма-всплесков выявлено методом «слепого» поиска (по всем парам всплесков в выборке) 6 пар из 9 гамма-всплесков, которые можно было бы использовать в качестве доказательства линзирования и не выявлено ни одной такой пары методом «целевого» (между парами, в которых один всплеск имеет как спектроскопическое красное смещение, так и идентификацию промежуточной системы, измеренную одним или несколькими более низкими спектроскопическими красными смещениями) поиска (см. рисунок 1.1).

GRB1/GRB2 year, month, day, seconds	Observed by ^a	Joint Probability P_j	Time Delay, d	Fluence Ratio Later Burst/ earlier burst	GCN Circular References
19950704_11431/20051012_43209	U,Y,K/K,R,I	5.9×10^{-6}	3753	0.45	...
19960924_42119/20020303_82040	U,B,T,K/U,K	3.3×10^{-6}	1986	0.093	...
20000821_33589/20041007_07328	U,K/O,K,R,I	2.1×10^{-5}	1507	1.7	...
19950114_47434/20151021_68368	U,T,K/K,I,F	2.4×10^{-5}	7585	1.1	1
19990312_69909/20020303_82040	U,K/U,K	6.6×10^{-4}	1087	0.96	...
19950114_47434/19950704_11431	U,T,K/U,Y,K	7.1×10^{-3}	170	1.9	...

Note.

^a Spacecraft abbreviations: B—Compton Gamma-Ray Observatory BATSE, F—Fermi GBM, I—INTEGRAL SPI-ACS, K—Wind-Konus, O—Mars Odyssey, R—RHESSI, T—Wind TGRS, U—Ulysses, Y—Yohkoh HXS.

Reference. (1) Veres & Meegan (2015).

Рисунок 1.1 Шесть пар гамма-всплесков – кандидатов на использование в качестве доказательства эффекта гравитационного линзирования²

Идентификация пар всплесков проводилась путем сравнения кривых блеска и локализации и сравнения энергетических спектров.

Признано, что ни одна из выявленных пар не является достаточно убедительной, чтобы претендовать на обнаружение с достаточной уверенностью. Сделан вывод, что сценарий, в котором большая часть гамма-всплесков линзирована, крайне маловероятен.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 4, 6, 16) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 24, 25).

¹ GRB Coordinates Network, Circular Service, № 23808, #1, (2019)

² Hurley, K.; Tsvetkova, A. E. et al. A Search for Gravitationally Lensed Gamma-Ray Bursts in the Data of the Interplanetary Network and Konus-Wind, The Astrophysical Journal, 871:121 (13pp), 2019 January 20

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

2.1 Метод моделирования переноса нейтрона с поверхности на орбиту с учетом время жизни нейтрона и гравитационного поля планеты и его практическое применение для анализа экспериментальных данных прибора ЛЕНД на борту космического аппарата НАСА «ЛРО»

Эксперименты по космической ядерной планетологии играют важную роль в изучении состава поверхности планет и распределения летучих веществ. При этом, для определения концентрации летучих веществ в грунте планеты обычно необходимо выполнить модельно-зависимую интерпретацию экспериментальных данных. Используемая модель должна детально описывать условия проведения эксперимента и параметры окружающей среды, влияющие на производство и перенос нейтронов, а также учитывать такой параметр, как конечное время жизни нейтрона. Численная модель этих процессов создаётся на основе существующего в настоящее время разнообразного программного обеспечения, позволяющего методом Монте-Карло моделировать ядерно-физические процессы в задачах со сложной геометрией, где требуется учёт времени и широкого диапазона энергий рассматриваемых частиц. Однако, такое программное обеспечение обычно не включает в себя или включает в очень упрощенном виде описание гравитационного поля, необходимого для моделирования распространения нейтронов от поверхности планеты до орбиты космического аппарата с нейтронными детекторами на борту.

В ходе проведенной работы в 2019 году был предложен метод, позволяющий осуществить моделирование переноса нейтрона с поверхности на орбиту и учитывающий, как время жизни нейтрона, так и гравитационное поле планеты. Правильное рассмотрение гравитационных эффектов может иметь важное значение как для обработки данных существующих нейтронных спектрометров, так и для разработки будущих приборов. Это важно для лунных исследований, где обилие водорода в приповерхностном слое грунта невелико и даже незначительные изменения лунного потока нейтронов должны быть

правильно интерпретированы, чтобы исключить все эффекты, кроме вызванных водородом. Предложенный метод позволяет изучить влияние силы тяжести и конечного времени жизни нейтрона на спектральное и угловое распределения потока нейтронов на разных высотах орбиты космического корабля. Этот метод был использован для анализа экспериментальных данных прибора ЛЕНД на борту космического аппарата НАСА «ЛРО». Основной целью эксперимента ЛЕНД является картографирование концентрации водородсодержащих соединений в грунте Луны. Использование метода имело своей целью оценить, как включение конечного времени жизни нейтрона и гравитационного поля Луны в численную модель эксперимента может повлиять на интерпретацию измерений нейтронного потока от Луны, выполненных нейтронными детекторами прибора ЛЕНД.

Для моделирования потока нейтронов с Луны был использован однородный железистый анортозитный состав лунного реголита, соответствующий высокогорным и полярным районам с содержанием водорода 100 пропромилле и температурой 100 К. Спектры потоков нейтронов, смоделированные для высот в 30 км, 200 км и 3000 км, показаны на рисунке 2.1.

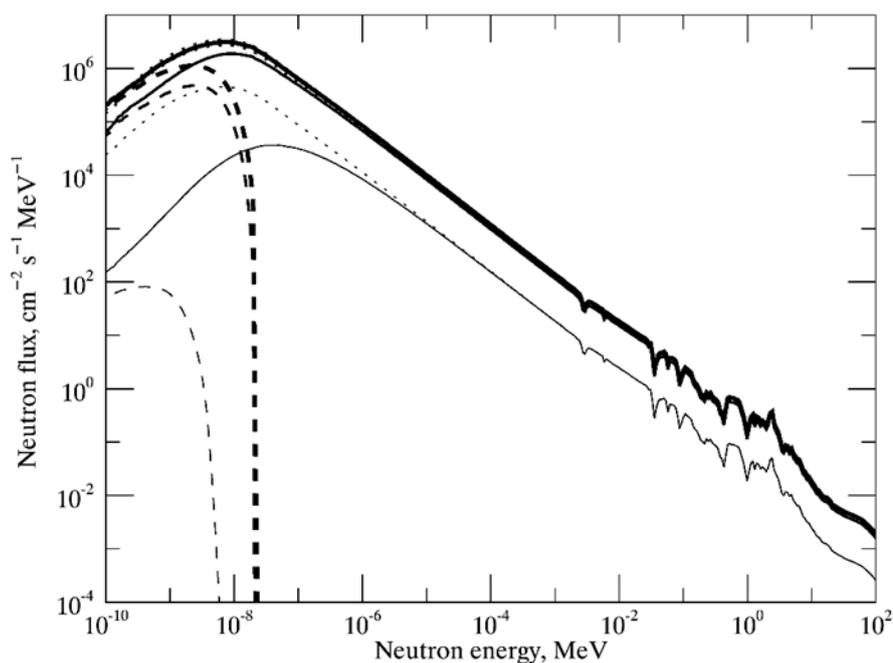


Рисунок 2.1 Спектры потоков нейтронов на высотах 30 км (толстые линии), 200 км (линии средней толщины) и 3000 км (тонкие линии) над поверхностью Луны. Спектры восходящих потоков показаны сплошными линиями, а спектры нисходящих потоков — пунктирными линиями. Суммарный поток нейтронов на выбранной высоте, интегрированный по всем направлениям, представляет собой сумму сплошных и пунктирных линий. Спектры потоков нейтронов, не подверженных влиянию гравитации и конечного времени жизни нейтронов, на этих высотах показаны для сравнения пунктирными линиями

Диапазон высот 30-200 км является обычным для лунных орбитальных аппаратов. Космический аппарат НАСА «ЛРО» в настоящее время находится на эллиптической орбите с апоаписом около 200 км. Была также добавлена высота 3000 км, которой КА «ЛРО» достигал, находясь на переходной эллиптической орбите, и которая хорошо демонстрирует рассматриваемые эффекты гравитации и конечного времени жизни нейтрона. Разная амплитуда спектров в высокоэнергетической области обусловлена геометрическим фактором увеличения площади сферы, через которую вычисляется поток нейтронов на заданной высоте орбиты. В дополнение к восходящему потоку нейтронов существует дополнительная составляющая нисходящего потока нейтронов в диапазоне тепловой энергии (показана пунктирными линиями), так как все нейтроны, исходящие с лунной поверхности с энергией меньше E_e движутся по эллиптическим орбитам и могут дважды пересечь заданную высоту. Эта дополнительная составляющая имеет почти такую же амплитуду, как и восходящий поток нейтронов с энергией $<10^{-3}$ эВ на малых высотах, поскольку время полета этих нейтронов слишком мало, чтобы процесс распада мог играть существенную роль. Нейтроны с более высокими энергиями имеют более вытянутые эллиптические орбиты и значительная часть таких нейтронов может распасться за время движения по своей траектории до повторного пересечения заданной высоты. Для восходящих нейтронов процесс распада также незначителен на малых высотах. Именно по этой причине существует лишь крайне незначительная разница между восходящим спектром потока нейтронов, показанным толстой сплошной линией, и спектром потока нейтронов, рассчитанным без учета рассматриваемых эффектов гравитации и времени жизни, показанного толстой пунктирной линией.

Как процесс распада, так и гравитация играют все более значительную роль с увеличением высоты как для восходящих, так и для нисходящих потоков. Сравнивая высоты 30 км и 200 км, можно увидеть разницу формы спектров (толстые и средние линии) в диапазоне энергии до 10^{-1} эВ. Это различие возникает главным образом из-за конечного времени жизни нейтронов. На высоте 3000 км восходящий поток нейтронов с энергиями до 10 эВ отличается от потока, моделируемого без учета рассматриваемых эффектов. Очевидно также, что эти эффекты пренебрежимо малы для высокоэнергетических нейтронов, которые быстро движутся по параболическим и гиперболическим траекториям. Предложенный метод учета эффектов гравитации и времени жизни нейтронов был применен к анализу экспериментальных данных, полученных с помощью российского нейтронного телескопа ЛЕНД, работающего на борту КА НАСА «ЛРО». Данный прибор состоит из девяти детекторов для измерения потоков тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов. Четыре коллимированных детектора эпитепловых нейтронов (CSETN1 – 4)

имеют высокую чувствительность и узкое поле зрения (FOV), формируемое коллиматором. Эти детекторы основаны на больших пропорциональных счетчиках, наполненных ^3He и защищенных кадмиевым экраном со стороны открытого поля зрения прибора. Коллиматоры из бора и полиэтилена поглощают эпитепловые нейтроны, приходящие не из поля зрения.

Снаружи коллиматора расположены три детектора тепловых нейтронов (STN1 – 3) и один детектор эпитепловых нейтронов (SETN). Эти четыре детектора основаны на одинаковых пропорциональных счетчиках. Отличие детектора SETN от остальных заключается в наличие кадмиевой оболочки вокруг счетчика. Детекторы STN1 и STN3 объединены в так называемый «Доплеровский фильтр», основанный на сопоставлении скорости регистрируемых тепловых нейтронов с орбитальной скоростью КА. Детекторы STN2 и SETN измеряют локальное поле тепловых и эпитепловых нейтронов вокруг космического аппарата. Регистрация нейтронов в гелиевых газонаполненных счетчиках происходит благодаря реакции нейтронного захвата ядрами ^3He .

Спектральное и зенитное угловые распределения потоков нейтронов от поверхности Луны были смоделированы для лунного реголита с описанными выше характеристиками. Перенос каждого конкретного нейтрона осуществлялся в соответствии с выражениями, описывающими распространение нейтронов в гравитационном поле¹. Скорость счета нейтронов в детекторах прибора ЛЕНД моделировалась с использованием полученных по предложенной методике спектрального и зенитного угловых распределений на высоте орбиты космического аппарата «глобальной» системе координат Луны, где КА движется с постоянной скоростью по круговой орбите. В результате моделирования получены высотные зависимости нормированной скорости счета нейтронов детекторами. Соответствующие кривые показаны на рисунке 2.2. Амплитуда высотной зависимости скорости счета в коллимированных детекторах CSETN1-4 является наименьшей среди амплитуд зависимостей скорости счета в других детекторах от высоты. Эти детекторы имеют наиболее узкое поле зрения (FOV), что приводит к тому, что наибольшая доля скорости счета генерируется потоком нейтронов с малыми зенитными углами. Уменьшение этого потока с увеличением высоты орбиты частично компенсируется увеличением площади проекции поля зрения на лунную поверхность. Кроме того, конечное время жизни нейтронов играет существенную роль для эпитермальных нейтронов с энергиями от 0,4 эВ до ~500 эВ только на высотах более 1000 км. Этим обусловлено описанное поведение

¹ См. A.B. Sanin, I.G. Mitrofanov, B.N. Bakhtin, M.L. Litvak. On the account of the Moon's gravitational field in LEND measurements // Planetary and Space Science, Available online 12 August 2019, 104720

скорости счета детекторов CSETN. Детектор SETN также чувствителен к эпитепральным нейтронам, но он имеет почти всенаправленное поле зрения. Скорость счета нейтронов этим детектором сильнее зависит от высоты и обусловлена общим уменьшением потока нейтронов и с увеличением высоты орбиты, а также уменьшением видимого углового размера Луны. Учет силы тяжести и конечного времени жизни нейтронов дает только небольшую поправку для этого детектора. Детектор STN3 чувствителен и к тепловым, и к эпитепловым нейтронам и его FOV также является практически всенаправленным. Его чувствительность к тепловым нейтронам приводит к небольшому увеличению скорости счета на малых высотах орбит КА за счет наличия нисходящего потока нейтронов, движущихся по эллиптическим орбитам. Однако, с увеличением высоты орбиты КА начинает играть существенную роль общее снижение скорости счета за счет конечного времени жизни нейтронов. Эти эффекты наиболее значимы для разности скоростей счета детекторов STN1 и STN2, поскольку она зависит только от потока тепловых нейтронов, наиболее подверженных рассмотренным эффектам. Из рисунка 2.2 видно, что эффектами гравитации и распада нейтронов можно пренебречь при обработке экспериментальных данных коллимированных детекторов CSETN1-4 и всенаправленного эпитеплогового детектора SETN, полученных на орбите КА «ЛПО» с высотами менее 100 км.

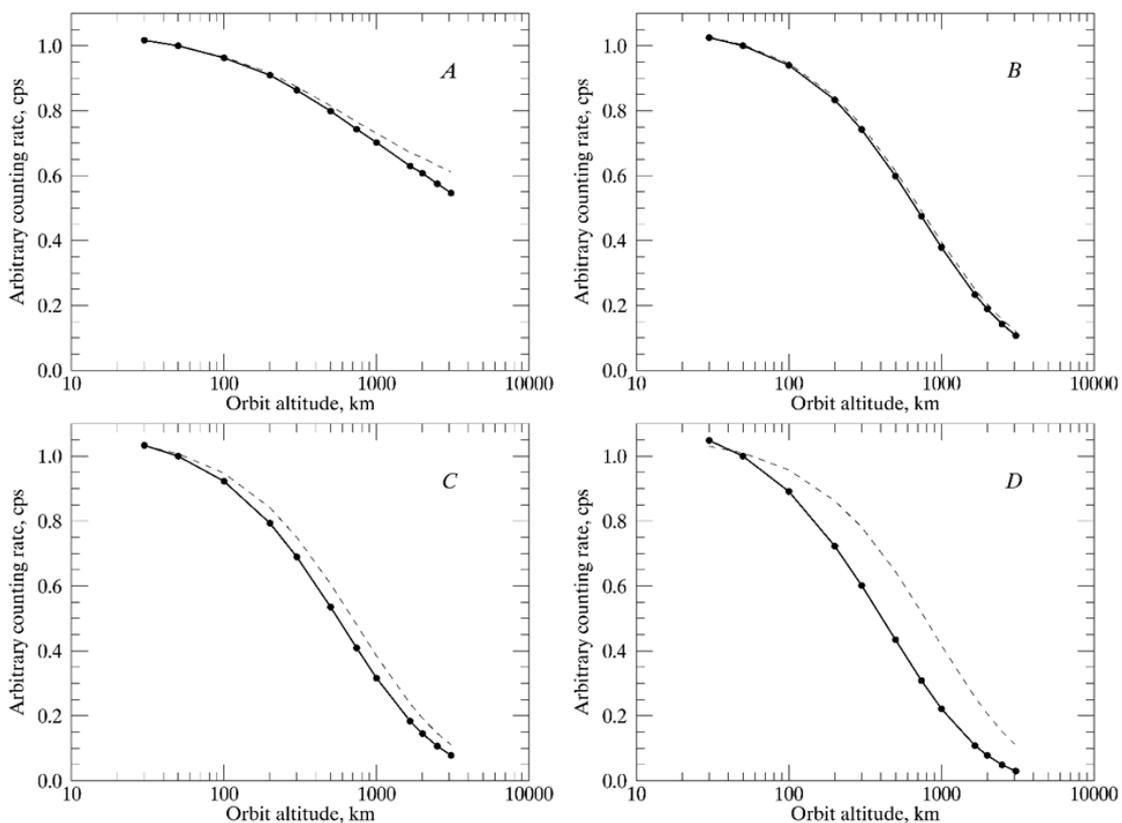


Рисунок 2.2 Высотные зависимости нормированной скорости счета нейтронов детекторами прибора ЛЕНД: А - сумма CSETN 1-4; В-SETN; С-STN3; D – разница между STN1 и STN2. Сплошные кривые показывают зависимость высоты, рассчитанную с учетом силы гравитации и времени жизни нейтронов. Пунктирные кривые показывают эти зависимости

без учета силы гравитации и времени жизни нейтрона. Все скорости счета нормируются на скорость счета нейтронов соответствующим детектором на высоте 50 км, рассчитанной с учетом рассматриваемых эффектов

Однако, эти эффекты следует учитывать при оценке скорости счета на более высоких орбитах. Также эти эффекты необходимо учитывать при обработке данных детектора тепловых нейтронов STN3 и разности скоростей счета детекторов STN1 и STN2, поскольку эти данные содержат информацию о потоках нейтронов с малой скоростью, орбиты которых под действием силы тяжести подвержены большому отклонению от прямолинейной траектории и вероятность распада для этих нейтронов велика.

Одной из основных задач эксперимента LEND является исследование количества воды в лунном реголите с пространственным разрешением до 10 км. Для решения этой задачи были обработаны данные, собранные детекторами CSETN. Водородный эквивалент воды (WEH) был получен из параметра подавления сигнала – отношения скорости счета нейтронов, измеренной над лунным реголитом с неизвестным WEH, к скорости счета, измеренной над областью с 50 пропромиле водорода (WEH=0,045процент). Ранее метод вычисления WEH основан на зависимости параметра подавления от WEH, рассчитанной без учета силы гравитации и времени жизни нейтронов. Теперь, используя подход, описанный здесь выше, была найдена аналогичную зависимость подавления от WEH (и обратная зависимость), с учетом силы гравитации и времени жизни нейтронов. Соответствующие кривые, рассчитанные для детекторов CSETN, SETN и STN3, показаны на рисунках 2.3 и 2.4.

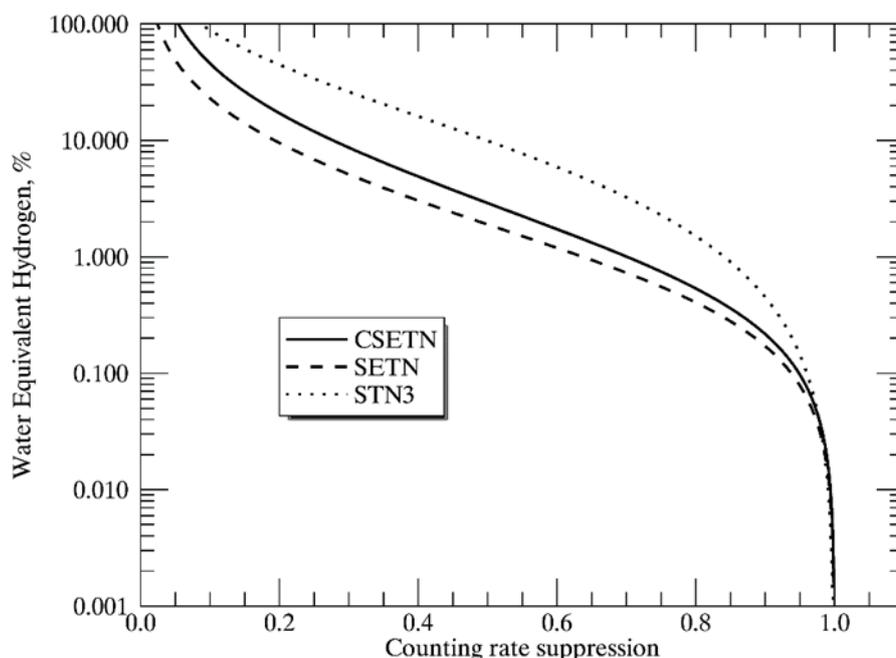


Рисунок 2.3 Величина подавление скорости счета нейтронов детекторами CSETN (сплошная линия), SETN (пунктирная линия) и STN3 (пунктирная линия) как функция

количества водорода, гомогенно распределенного в лунном реголите (обозначается здесь параметром водородного эквивалента - WEN).

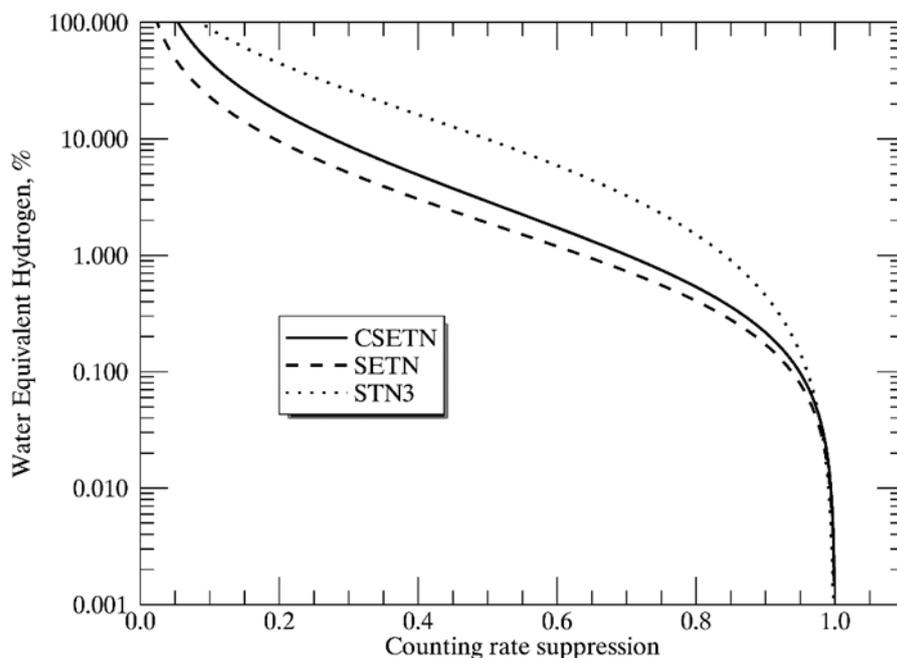


Рисунок 2.4 Водородный эквивалент воды (WEN) однородно распределённой в лунном реголите как функция подавления скорости счета нейтронов, измеренной детекторами CSETN (сплошная линия), SETN (пунктирная линия) и STN3 (пунктирная линия).

Таким образом, применение указанного выше метода позволяет сделать вывод о том, что влияние эффектов гравитации и конечного времени жизни нейтронов не является критичным для результатов, полученных прибором ЛЕНД, но в будущем будет полезно учитывать влияние указанных эффектов для более точной оценки значений WEN. Кроме того, эти эффекты должны быть тщательно рассмотрены для марсианских орбитальных нейтронных детекторов, таких как ХЭНД на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей» и ФРЕНД российско-европейского проекта «ЭкзоМарс», работающих на более высоких по сравнению с КА «ЛРО» орбитах – около 400 км.

2.2 Возможные оптимальные конфигурации гамма- и нейтронных спектрометров, предназначенных для установки на перспективные отечественные луноходы

Гамма- и нейтронные спектрометры часто используются в космических экспериментах для получения информации о химическом составе поверхности планет и малых тел Солнечной системы. В основном, за исключением миссии НАСА «Марсианская

научная лаборатория», эти приборы установлены (были установлены) на орбитальные космические аппараты, в задачи которых входит (входило) глобальное картирование элементного состава и содержания подповерхностной воды/водяного льда.

В настоящее время с высоким приоритетом рассматриваются исследования локальных окружающих условий на самой поверхности и проведение комплексных (в том числе с забором и анализом образцов грунта) измерений для сопоставления с данными приборов, установленных на орбитальных космических аппаратах. Поэтому сейчас активно обсуждаются и планируются различные посадочные миссии к Луне, Марсу и другим объектам Солнечной системы. Некоторые из этих проектов уже реализуются, как, например, вышеупомянутая «Марсианская научная лаборатория», другие находятся на завершающей стадии разработки. К таким миссиям относятся совместный проект ЕКА и Роскосмоса «ЭкзоМарс-2020», марсоход НАСА «Марс 2020» или лунные посадочные миссии, предлагаемые космическими агентствами разных стран.

Нейтронное и гамма-излучение планет и их спутников возникает в результате бомбардировки их поверхности высокоэнергетичными заряженными частицами галактических космических лучей (ГКЛ), если этому не препятствует магнитное поле и толстая атмосфера планеты. Заряженные частицы (прежде всего протоны и альфа-частицы) взаимодействуют с ядрами основных порообразующих элементов и производят нейтроны высоких энергий. Нейтроны распространяются в грунте и вступают в реакции с ядрами основных порообразующих элементов. В результате высокоэнергетичные нейтроны замедляются вплоть до тепловых энергий, а некоторая их часть выходит из поверхности грунта, образуя нейтронное альbedo планеты. Спектр выходящих нейтронов зависит от содержания воды в грунте, так как водород является самым эффективным замедлителем быстрых нейтронов. Поэтому по вариациям нейтронного потока в разных энергетических диапазонах можно определить содержание воды и водяного льда, которые, как правило, являются основными водородосодержащими химическими соединениями.

Взаимодействие нейтронов с ядрами вещества по каналам неупругого рассеяния (быстрые нейтроны) и радиационного захвата (тепловые и эпитепловые нейтроны) приводит к возбуждению ядер, которое снимается излучением моноэнергетических гамма-квантов, характерных для данного элемента. В результате поверхность излучает гамма-спектр с большим количеством ядерных линий. Присутствие в спектре определенных гамма-линий и их интенсивность являются уникальной особенностью данного типа поверхности и напрямую отражает ее химический состав. Наблюдение такого спектра с помощью гамма-спектрометра позволяет построить глобальную карту вариаций элементного состава, если это орбитальные наблюдения, или детально изучать локальную

окрестность места посадки с борта посадочной станции или планетохода. Комплекс наблюдений, основанный на измерении естественного нейтронного и гамма-фона называется пассивной гамма-спектроскопией поверхности планет.

Гамма- и нейтронное излучение исследуемой поверхности может быть также сгенерировано искусственным образом, для чего используют специальные источники облучения. Одним из таких источников является нейтронный генератор. Он может производить очень интенсивные импульсы или непрерывный поток нейтронов высокой энергии на основе реакций дейтерий – тритий (D-T) или дейтерий – дейтерий (D-D).

В таком подходе быстрые нейтроны не рождаются в грунте за счет ГКЛ, а вбрасываются в него извне. За счет высокой интенсивности нейтронного облучения, недоступной в пассивных методах, удается на порядки улучшить статистику отсчетов в нейтронных и гамма-детекторах и существенно сократить время, необходимое для выполнения измерений с заданной точностью. Кроме этого, возникает временная развертка, показывающая, как меняется временной профиль нейтронного гамма-излучения поверхности после начала ее облучения высокоэнергетичными нейтронами. Особенности на этом профиле могут указывать на неоднородность подповерхностных слоев. Это существенно расширяет возможности диагностики, показывающей, как различные химические элементы распределены по глубине.

Активные методы нейтронной и гамма-спектроскопии прошли апробацию на Земле, где они обычно используются в геологии, безопасности, транспорте, медицине и других областях. Они также неоднократно предлагались для космического эксперимента. Частичная верификация уже была выполнена в марсианских условиях. Первый активный нейтронный спектрометр для поиска подповерхностной воды успешно реализован на борту марсохода НАСА «Кьюриосити».

Будущие отечественные посадочные миссии по изучению и освоению Луны, безусловно, потребуют, во-первых, мобильности исследовательских средств, которую будут призваны обеспечить луноходы, во-вторых – быстрого обнаружения критически важных для освоения лунных ресурсов, и, прежде всего, воды, что могут обеспечить гамма- и нейтронные спектрометры.

В ходе проделанной работы были выработаны рекомендации по возможным оптимальным конфигурациям гамма- и нейтронных спектрометров, предназначенных для установки на перспективные отечественные луноходы. В качестве конкретного примера был рассмотрен гамма- и нейтронный спектрометр, предложенный для российской посадочной миссии «Луна-Грунт» («Луна-28»), в составе которой предусмотрен луноход малого или среднего класса.

В основу работы было положено сопоставление следующих факторов: научных задач, которые призвана решать гамма- и нейтронная спектроскопия на поверхности Луны в рамках общих научных задач лунохода; ресурсов по энергопотреблению, габаритам и массе, которых потребует установка определенной конфигурации гамма- и нейтронных спектрометров на борт лунохода; степени разработки такой конфигурации на настоящий момент.

Основными задачами гамма- и нейтронной спектроскопии на поверхности Луны являются:

1. поиск подповерхностного водяного льда в окрестности места посадки: гамма- и нейтронный спектрометр должен обеспечить измерение среднего содержания воды/водяного льда в подстилающей поверхности на глубину до 0,5 – 1 м вдоль трассы движения лунохода, должна быть обеспечена быстрая идентификация локальных мест на лунной поверхности, где среднее содержание водорода может достигать не менее 500 пропромилле или 0,5 процента по массовой доле водного эквивалента;

2. поиск слоистых отложений водяного льда под поверхностью: гамма- и нейтронный спектрометр должен обеспечить обнаружение водородосодержащего слоя (500 пропромилле), находящего на глубине до 0,5 м - эти исследования могут быть произведены на остановках лунохода, причем последние в первую очередь должны осуществляться в локальных районах, обнаруженных в ходе движения лунохода (см. п. 1);

3. определение содержания в подповерхностном слое грунта некоторых химических элементов, являющихся эффективными поглотителями тепловых нейтронов (хлор, железо, бор, различные редкоземельные элементы, например, гадолиний и самарий): данные с гамма- и нейтронного спектрометра должны быть использованы для поиска вариаций среднего сечения поглощения тепловых нейтронов, чтобы выявить наличие повышенного или пониженного содержания нейтронных поглотителей;

4. определение валового элементного состава подповерхностного слоя на глубину до 0,5 м по основным породообразующим элементам, таким как O, Na, Mg, Al, Si, K, Ti и Fe: гамма- и нейтронный спектрометр должен обеспечить измерения в приповерхностном слое на глубину до 0,5 м средней концентрации железа, алюминия, магния с точностью ± 1 процента, кремния с точностью $\pm 0,5$ процента, титана и натрия с точностью $\pm 0,1$ процента, калия с точностью $\pm 0,05$ процента, и тория – с точностью 1 пропромилле;

5. оценка неоднородности распределения содержания различных химических элементов в лунном грунте по глубине: активное нейтронное зондирование подстилающей поверхности позволяет изучать временную структуру ее гамма-отклика, возникшего в результате такого зондирования, при этом излучение с более глубоких слоев приходит позже, поэтому изучая особенности на временном профиле излучения в различных гамма-линиях, можно судить о возможной неоднородности химического состава на глубину до 0,5 – 1 м.

Конфигурация гамма- и нейтронной спектрометрической научной аппаратуры может быть оптимизирована исходя из указанных выше научных задач, имеющихся на борту лунохода ресурсов по массе и энергопотреблению и габаритам, уровню разработки приборов-прототипов. На текущем этапе планирования миссии «Луна-Грунт» оценка массы лунохода колеблется в диапазоне от 30 до 150 кг в зависимости от того, как будет реализован космический комплекс. Это означает, что масса всего комплекса научной аппаратуры лунохода может составлять от 5 до 25 кг. Таким образом, масса отдельного прибора, даже имеющего высокий приоритет, не будет превышать 1,5 – 10 кг. В таблице 1 представлены различные конфигурации нейтронных и гамма-спектрометров, которые попадают в этот диапазон, и указаны научные задачи, решение которых они смогут обеспечить в соответствии с разрешенной массой.

Таблица 1 Различные конфигурации гамма- и нейтронного спектрометра

Конфигурация	Масса/ Энергопотребление	Научные задачи	Уровень разработки
№1. Пассивный нейтронный спектрометр. Малогабаритный нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ³ He счетчиков.	Масса: 1.7 кг Энергопотребление: 4.5 Вт Размеры: 43x204x210 мм	Полностью решает научную задачу (1) и частично научные задачи (2) и (3)	Очень высокий. Существует готовый летный образец АДРОН-РМ, созданный для марсохода проекта «ЭкзоМарс-2020», а также блок детекторов прибора ДАН, работающего на борту марсохода НАСА «Кьюриосити»

Конфигурация	Масса/ Энергопотребление	Научные задачи	Уровень разработки
<p>№2. Активный нейтронный спектрометр. Нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ³He счетчиков (НС) и блока импульсного нейтронного генератора (ИНГ)</p>	<p>Масса: 4.2 кг Энергопотребление: 18Вт Размеры: 43x204x210 мм (НС) 331x125x45 мм (ИНГ)</p>	<p>Полностью решает научные задачи (1)-(3) за гораздо меньшее время по сравнению с пассивным нейтронным спектрометром</p>	<p>Очень высокий. Существует летный прототип ДАН, много лет работающий на борту марсохода «Кьюриосити»</p>
<p>№3. Пассивный нейтронный и гамма-спектрометр. Малогабаритный нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ³He счетчиков и гамма-спектрометр на основе</p>	<p>Масса: 3.5 кг Энергопотребление: 6 Вт Размеры: 260x217x135 мм</p>	<p>Полностью решает научные задачи (1), (3), (4) и частично научную задачу (2)</p>	<p>Очень высокий. Существует летный образец МГНС, работающий сейчас на борту космического аппарата ЕКА «Бепи Колombo»</p>

Конфигурация	Масса/ Энергопотребление	Научные задачи	Уровень разработки
сцинтилляционного детектора CeBr_3 с размером 2x2 или 3x3 дюйма			
<p>№4. Активный нейтронный и гамма-спектрометр.</p> <p>Нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ^3He счетчиков, гамма-спектрометра на основе сцинтилляционного детектора CeBr_3 с размером 2x2 или 3x3 дюйма (НГС) и блока импульсного нейтронного генератора (ИНГ)</p>	<p>Масса: 7.0 кг Энергопотребление: 20 Вт Размеры: 260x217x135 мм (НГС) 331x125x45 мм (ИНГ)</p>	<p>Полностью решает научные задачи (1) - (4) и частично научную задачу (5) за гораздо меньшее время по сравнению с пассивным гамма- и нейтронным спектрометром</p>	<p>Высокий.</p> <p>Существует летный прототип АДРОН-ЛР, разработанный для лунных посадочных миссий «Луна-25» и «Луна-27» и прошедший все наземные испытания</p>
<p>№5. Нейтронный и гамма-спектрометр на</p>	<p>Масса: 10.0 кг Энергопотребление: <50 Вт</p>	<p>Полностью решает научные задачи (1) - (5)</p>	<p>Низкий.</p> <p>Существуют промышленные прототипы, которые</p>

Конфигурация	Масса/ Энергопотребление	Научные задачи	Уровень разработки
<p>основе меченных нейтронов. Нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ³He счетчиков, гамма-спектрометра на основе сцинтилляционного детектора CeBr₃ с размером 2x2 или 3x3 дюйма (НГС) и блока нейтронного генератора с функцией меченых нейтронов (МНГ)</p>			<p>используются в различных отраслях народного хозяйства. Они требуют существенной оптимизации в соответствии с требованиями космического эксперимента.</p>

Из сравнения представленных вариантов следует, что в зависимости от доступных ресурсов на борту лунохода и научных приоритетов всегда можно подобрать соответствующую конфигурацию гамма- и нейтронного спектрометра. Для малого лунохода подойдет компактный пассивный нейтронный спектрометр весом менее 2 кг. Он позволит отслеживать среднее содержание воды/водяного льда вдоль трассы движения лунохода. Для лунохода среднего класса весом около 100 кг оптимальной конфигурацией является активный гамма- и нейтронный спектрометр весом 6-7 кг. В этом случае может быть решен широкий спектр задач, начиная с поиска залежей водяного льда на разной глубине и заканчивая анализом химического состава приповерхностных слоев лунного грунта. Наконец в качестве инновационных технологий на перспективу, с учетом

имеющегося времени до старта лунной миссии с тяжелым луноходом, можно рассмотреть использование гамма- и нейтронного спектрометра, созданного с использованием метода меченых нейтронов. В этом случае можно построить трехмерную картину распределения основных породообразующих элементов в верхних слоях лунного грунта.

2.3. Глубинные грунтозаборные устройства для будущих отечественных посадочных миссий на полярную Луну

При планировании будущих автоматических лунных миссий с наиболее высоким приоритетом рассматривается разработка глубинных грунтозаборных устройств (ГГЗУ), позволяющих извлекать с разной глубины, хранить и транспортировать пробы лунного вещества для их упаковки перед доставки на Землю или для анализа *in situ* бортовым оборудованием.

Российская лунная программа предполагает, что за Российской Федерацией должны быть закреплены наиболее привлекательные плацдармы на Луне с высокими энергетическим и ресурсным потенциалами для обеспечения возможности создания на них в будущем Лунной базы. Реализация такого подхода сначала предусматривает исследование Луны с помощью автоматических станций, которые должны поступательно решать поставленные задачи, переходя от научно-исследовательских запросов к промышленно-технологическим, чтобы служить трамплином для подготовки пилотируемых миссий. Сейчас эта идеология реализуется в текущей Федеральной космической программе (ФКП) до 2025 года и будет продолжена в следующей ФКП на период с 2026 по 2035 годы.

На первом этапе российской лунной программы основная роль отводится посадочным миссиям «Луна-25», «Луна-27», «Луна-28», «Луна-29», которые должны быть реализованы последовательно друг за другом с усложнением поставленных задач и используемых технологий. В их научные задачи входит изучение минералогического, химического, изотопного состава лунного реголита, а также поиск летучих соединений (в том числе водяного льда и органических соединений) в приповерхностном слое реголита полярных областей Луны. В каждой из этих миссий предусмотрено взятие образцов грунта с различных глубин, как с помощью манипуляторов, так и с применением полноценного глубинного грунтозаборного устройства (ГГЗУ) и доставка их на борт космического аппарата для анализа разносторонними методами с помощью бортовых научных аналитических приборов.

Успешная реализация первых российских миссий требует использования современных технологий бурения и извлечения образцов грунта, но адаптированных к лунным условиям, что может использоваться в дальнейшем для создания технологий добычи и извлечения лунных полезных ископаемых.

Проведена работа по анализу существующих лунных ГЗУ, (сравнительные данные о созданных и создаваемых в настоящий момент лунных грунтозаборных устройствах приведены в таблице 2), основных научных задач ГЗУ в будущих отечественных лунных посадочных миссиях и вытекающих из них технических требований к ГЗУ и вариантах их реализации.

Таблица 2 Созданные/создаваемые ГЗУ для лунных посадочных миссий

Название космического аппарата	«Луна - 16, 20»	«Луна - 24»	«Resource Prospector»	«Луна 27»/ProSEED
Тип бурения	колонковое	колонковое	цельный бур	цельный бур
Режим внедрения	Ударно – вращательный	Ударно – вращательный	Ударно – вращательный	Вращательный
Способ очистки скважины	шнек	шнек	Шнек + многократный забор с разных глубин	Шнек + многократный забор с разных глубин
Забор с разных глубин	Однократное бурение с забором всей стратиграфичес кой колонки	Однократное бурение с забором всей стратиграфичес кой колонки	Дискретный забор каждые 10 см	Дискретный забор каждые 30- 50 см
Способ забора	Гибкий грунтонос с забором всей стратиграфичес кой колонки	Гибкий грунтонос с забором всей стратиграфичес кой колонки	На витках шнека в конце буровой штанги оптимизирован ных под забор пробы	Комбинированный: Внутри бурового инструмента На витках выдвижного шнека

Название космического аппарата	«Луна - 16, 20»	«Луна - 24»	«Resource Prospector»	«Луна 27»/ProSEED
Способ передачи пробы	Автоматическая упаковка всей колонки и возврат на Землю	Автоматическая упаковка всей колонки и возврат на Землю	Очистка шнека щеточным механизмом в приемное устройство	Комбинированный: Непосредственно в приемное окно НА Очистка шнека щеточным механизмом в приемное устройство манипулятора
Устройство раскрытия/выноса	нет	нет	да	да
Кол-во скважин	1	1	многократно	многократно
Усилие прижатия	80 – 120 Н	<400 Н	100 Н	<650 Н
Скорость бурения	56 мм/мин	150 мм/мин	1 м за час	Несколько см в минуту
Максимальный размер	690 мм	3200 мм	1800 мм	2500 мм
Глубина	417 мм	2800 мм	1000 мм	900 – 1000 мм
Диаметр бура	26 мм	28 мм	25.4 мм	25 мм
Объем пробы	101 г	170 г	12 см ³	Две пробы <1 см ³ и 4-5 см ³
Мощность	140 Вт	500 Вт	500 Вт	100-200 Вт
Вращательный механизм	508 об/мин	до 220 об/мин	120 об/мин	До 300 об/мин ?
Ударный механизм	1524 уд/мин	600 уд/мин	1160 уд/мин	нет

Название космического аппарата	«Луна - 16, 20»	«Луна - 24»	«Resource Prospector»	«Луна 27»/ProSEED
Масса	13,6 кг	54 кг	20 кг	31 кг
Рабочий диапазон температур	Нет данных*	Нет данных	-60°C, +50°C	-50°C, +50°C

* Известно, что первое включение ГЗУ «Луна-16» произошло при температуре -120°C, будущих лунных посадочных полярных миссий.

Будущие отечественные посадочные миссии по своему назначению могут быть разделены на несколько классов.

К первому классу относятся космические аппараты типа «Луна-25» и «Луна-27». Это стационарная посадочная платформа, которая обеспечивает мониторинг окружающей обстановки (поля заряженных и нейтральных частиц, пылевая, микрометеоритная и радиационная обстановки), проводит элементный, минералогический, изотопный анализ образцов близлежащего грунта, а также выполняет измерения его тепловых, механических и электромагнитных свойств на разной глубине.

Ко второму классу относятся космические аппараты типа «Луна-28». Это также стационарная платформа, но ее основное предназначение – забрать стратиграфическую колонку или стратиграфический набор образцов грунта с глубины до 2 метров максимально малоинвазивным способом, чтобы сохранить исходные свойства грунта (прежде всего состав летучих веществ) и доставить образцы на Землю. Кроме самой посадочной платформы в состав космического аппарата входит ГЗУ и капсуляционно-транспортное устройство для герметичной упаковки образцов их загрузки в спускаемую капсулу возвратного аппарата, стартующего с поверхности с образцами внутри. Жизненный цикл посадочной платформы составляет не более одного лунного дня и в программе исследований, как правило, не предусмотрена сложная процедура анализа образцов (возможен только их предварительный скрининг) и, в связи с этим, для этого класса миссий рассматривается упрощенный комплекс научной аппаратуры. Основные научные приборы планируется устанавливать на небольшом луноходе, который сможет отъехать в сторону и выжить после старта с Луны возвратного модуля.

К третьему классу относится миссия с луноходом среднего класса массой 200 – 400 кг оснащенный облегченной ГЗУ (порядка 15 кг). В его задачи входит исследование

большой территории на расстояния до нескольких десятков километров с проведением первичной геологоразведки вдоль трассы движения. Такой проект подразумевает установку на луноход специализированного комплекса научной аппаратуры, позволяющего проводить дистанционный анализ подстилающей поверхности на глубину до 0,5-1 м, и выбирать перспективные места остановки лунохода для проведения глубинного бурения, взятия образцов и их анализа на борту лунохода, например, с помощью хроматографического комплекса и масс-спектрометров. Часть образцов может сохраняться на борту лунохода, чтобы последующие миссии могли их забрать и вернуть на Землю.

К четвертому классу можно отнести миссии с тяжелыми аппаратами, которые сегодня еще находятся в самой начальной стадии концептуальной проработки, но скорее всего будут предназначены для подготовки и отработки высадки космонавтов и тяжелых луноходов на поверхность Луны, а в дальнейшем - для проведения серьезных геологоразведочных работ. Исходя из накладываемых ограничений на каждый класс автоматических миссий, скорее всего, необходимо разработать несколько модификаций ГГЗУ, адаптированных под конкретные научные и технологические требования. Анализируя имеющиеся на сегодняшний момент разработки (см. таблицу 2) и ограничения условий на лунной поверхности можно выделить два способа взятия образцов грунта, которые могут быть реализованы в той или иной модификации ГГЗУ.

В первом способе отбор точечных проб производится на поверхности из стратиграфической колонки реголита, изъятый при колонковом способе бурения, с использованием или без использования гибкого тракта (грунтоноса). Без грунтоноса стратиграфическая колонка забирается в полость трубы шнека бурового инструмента, имеющей технологические отверстия.

Чтобы свести вероятность заклинивания бурового инструмента к минимуму, используется гибкий грунтонос. Конструктивно данный способ отличается от простого колонкового наличием внутренней полой трубы, где в межстеночном пространстве уложен гибкий грунтонос из специального текстильного материала (см. рисунок 2.5).

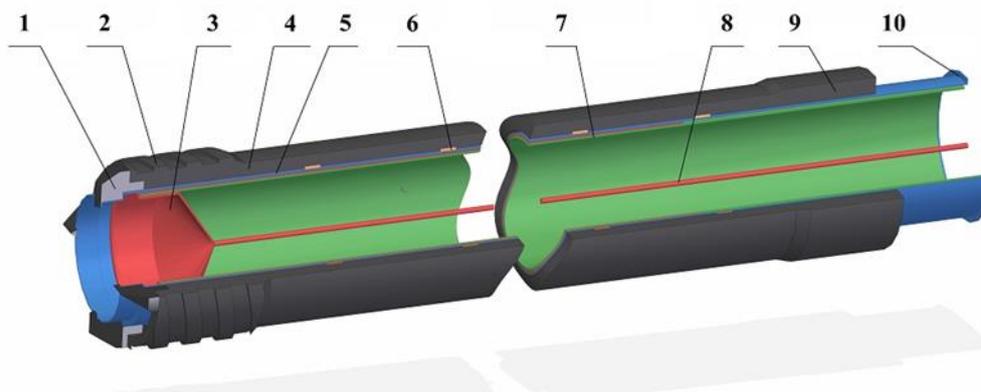


Рисунок 2.5 Схема реализации первого способа отбора грунта (1 – резец, 2 – шнек, 3 – гибкий грунтонос, 4 – штанга буровая, 5 – наружная труба грунтоноса, 6 – подшипник, 7 – внутренняя труба грунтоноса, 8 – трос грунтоноса, 9 – соединение с приводом бурового инструмента, 10 – фланец крепления к корпусу привода бурового инструмента)

При прохождении скважины привод грунтоноса равномерно тянет его основание, что позволяет подхватывать и забирать внутрь колонку с грунтом. Это даёт возможность проводить бурение на глубины более 2 м.

После внедрения бурового инструмента в процессе извлечения гибкого грунтоноса на поверхность допускается отбор, анализ и упаковка точеных проб грунта. Это возможно реализовать при помощи специального устройства точечного отбора и манипуляторного комплекса. Отбор проб осуществляется в процессе изъятия бурового инструмента из скважины с остановкой для взятия одиночной пробы с заданной глубины. Для реализации этого способа на корпусе ГЗУ установлено устройство отбора пробы, которое протыкает гибкий грунтонос (он может состоять из нескольких самозатягивающихся шторок, которые пробоотборник раздвигает при входе), забирает и выдавливает порцию грунта в приемное устройство манипуляторного комплекса, которое подводится с другой стороны бурового инструмента напротив приемного устройства.

Таким образом колонковое бурение, реализованное в подобном устройстве, позволяет одновременно забирать стратиграфическую колонку вещества и проводить исследование точечных проб грунта, изъятых с разной глубины. В наибольшей степени это подходит для буровых устройств, предназначенных для посадочных миссий с последующим возвратом лунного вещества на Землю. В такой реализации можно обеспечить большую глубину бурения, сохранить стратиграфию вещества, отдельно отобрать и запаковать самостоятельные «точечные» пробы вещества с сохранением летучих веществ. Основные недостатки таких устройств – достаточно высокая сложность исполнения, требующая, для достижения высокой надежности, как и всей аппаратуры

автоматических космических аппаратов, значительных наземных обработок, и невозможность установки на луноходы из-за высокой массы ГЗУ и ограничений по бурению нескольких скважин.

Во втором способе отбор проб осуществляется шнековым транспортёром. Для этой конфигурации ГЗУ буровой инструмент выполнен в виде шнека, что обеспечивает проходку с невысоким энергопотреблением на глубины более 1 метра с малой вероятностью заклинивания. При таком способе бурения буровой шлам, выносится на поверхность или уплотняется в стенки скважины. Взятие грунта осуществляется устройством, расположенным в наконечнике бурового инструмента. Оно представляет собой малый шнековый транспортёр, управляемый системой из двух приводов, позволяя независимо отбирать пробы грунта с любой глубины на «нетронутой» части скважины (дно скважины, где еще не происходило основное бурение), при этом с контролем прилагаемого усилия и температуры (см. рисунок 2.6).

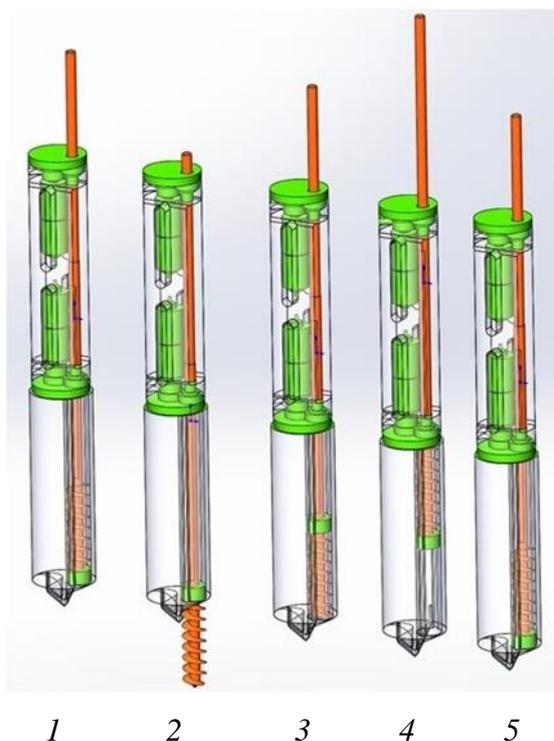


Рисунок 2.6 Схема реализации второго способа отбора грунта (1 – проходка основной скважины (максимальные энергозатраты); 2 – внедрение шнекового пробоотборника (минимальные энергозатраты); 3 – втягивание шнека с отобранной пробой; 4 – перегрузка в приёмное устройство путём освобождения шнековой полости. При вращении шнекового пробоотборника через специальную шайбу (показана зеленым цветом) грунт счищается со шнека и высыпается обратно в полость; 5 – очистка полости пробоотборника от оставшихся фрагментов грунта)

В ходе бурения основные энергозатраты идут на проходку скважины до нужной глубины, после чего используется выдвижной шнековый транспортёр для внедрения в дно скважины. Образец грунта захватывается на его винтовой поверхности и втягивается

вместе со шнеком. Чтобы доставить образец на поверхность необходимо извлечь буровой инструмент из скважины и перед выгрузкой совместить его законцовку с приемным устройством аналитического прибора или передающим устройством, таким как приемник манипуляторного комплекса. Таким образом, представленный способ также позволяет отбирать пробы с разной глубины, но для этого требуется выемка всего бурового инструмента из уже пробуренной скважины, что увеличивает время доставки образца до аналитических приборов, снижает вероятность сохранения летучих и также возрастает вероятность обрушения стенок скважины при извлечении инструмента и может привести к невозможности продолжить бурение в этой скважине.

Ещё одним отрицательным аспектом является использование приводов в наконечнике инструмента, что повышает вероятность отказа в условиях больших отрицательных температур. В тоже время основными преимуществами являются: существенно меньшая сложность устройства, чем в аппаратуре для колонкового бурения, малая масса ГГЗУ, возможность реализовать многократное бурение в нескольких скважинах, размельченная проба реголита, снятая с винтовой поверхности шнека. Поэтому такая модификация ГГЗУ рассматривается, как наиболее предпочтительная для установки на небольшие посадочные платформы типа «Луна-27» и на средние луноходы, с той целью, чтобы в ходе таких миссий был обеспечен криогенный забор грунта с глубины не менее 1 метра.

Также основным вопросом является вопрос компоновки ГГЗУ, как достаточно большого и сложного узла, непосредственно встраиваемого в конструкцию посадочного аппарата или лунохода.

Предлагаются следующие общие компоновочные решения для лунных буровых устройств: подачу бурового инструмента по оси желательно реализовать на системе тросов исходя из большой глубины погружения, так же система тросов благодаря своей упругости сыграет роль пружинного аккумулятора усилий при возникновении проблем с проходкой без резких перегрузок двигателей и редукторов; приводы исполнительных механизмов необходимо разнести группами на подвижных и статичных частях ГГЗУ исходя из сложности обеспечения теплового режима, а также технологических ограничений по прокладке кабелей к динамическим узлам; каждое компоновочное решение должно предусматривать реализацию обоих предпочтительных способов изъятия проб, описанных выше.

Таким образом на основании вышеизложенного предпочтительными для отдельных классов будущих отечественных лунных посадочных миссий представляются следующие варианты ГГЗУ.

1) Для класса средних посадочных платформ типа «Луна-27» требуется ГГЗУ с полной массой не более 25 кг, регулируемым потреблением не более 200 Вт, прижимным усилием не более 300Н, выполненное в виде единой облегченной фермы, снабженной устройством выноса и поворота, использующее ударно-вращательный принцип бурения на глубину в диапазоне 1 – 2 м, оснащенное внешним шнеком для проходки скважины и внутренним шнеком для забора грунта и допускающее взаимодействие с приемными устройствами манипуляторного комплекса для выгрузки образцов грунта. Внутренний шнек должен иметь механизм очистки, позволяющий счищать налипший грунт в окно приемного устройства. Законцовка бурового инструмента должна быть снабжена датчиками для анализа механических свойств грунта и контроля за температурой забираемого образца. Объем забираемого образца обычно должен составлять от нескольких кубических сантиметров до 10 см³. ГГЗУ должно иметь собственную систему терморегулирования и быть термоизолировано от конструкции КА.

2) Для класса средних луноходов по сравнению с посадочной платформой конструкция ГГЗУ упрощается в части отказа от механизма перемещения и возможно механизма выноса. Требования по многократному бурению здесь обеспечиваются за счет бурения на разных остановках лунохода. Из-за уменьшения массы глубина бурения также уменьшается до 1-1,5 м, что по-прежнему позволяет достичь глубин, где могли сохраниться летучие вещества. Полная масса ГГЗУ для мобильных платформ не должна превышать 15 кг.

3) Для более тяжелого класса посадочных платформ, в первую очередь предназначенных не столько для забора грунта и его анализа на борту, сколько для его возврата на Землю, наиболее подходящим решением является ГГЗУ колонкового типа, снабженное внутренним гибким грунтоносом, и в обязательном порядке допускающее взятие не только стратиграфической колонки, но и отдельных проб с разной глубины в процессе передачи колонки грунта из скважины на борт космического аппарата. ГГЗУ в этом случае может иметь массу до 35 кг и обеспечивать бурение на глубины более 2 метров. Отбор «точечных» проб подразумевает не только их передачу в аналитические приборы на выборочный скрининг, но и герметичную упаковку или капсулирование для отправки на Землю.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 11, 13, 14,) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 23, 26).

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

3.1. Построение профиля пространственной переменности массовой доли воды в веществе кратера Гейл вдоль всей трассы движения марсохода «Кьюриосити»

В рамках обработки данных измерений российского нейтронного спектрометра ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити» разработана методика оценки содержания воды в марсианском грунте вдоль трассы движения на основе совместного анализа данных активных измерений (с использованием активного нейтронного зондирования поверхности с помощью нейтронного генератора), проведенных в точках стоянок, и пассивных измерений (измерение естественного нейтронного альбеда поверхности), проведенных непрерывно как во время движения, так и на стоянках. На этой основе построены профили переменности содержания воды в грунте с пространственным разрешением 3 метра вдоль всей трассы продвижения марсохода от точки посадки до точки положения марсохода на дату 2 ноября 2018 г.

По данным активных измерений было обработано более 760 измерений содержания воды и хлора в грунте для более чем 660 стоянок вдоль трассы движения марсохода. Показано, что для 464 исследованных стоянок (70% от их полного числа) данные измерений хорошо описываются однородной моделью, согласно которой грунт имеет однородный состав по глубине и включает три основных компонента: основную породу с массовой долей ξ_0 , для которой доли основных породообразующих элементов соответствует среднему составу марсианского реголита, воду с массовой долей ξ_w и так называемый «эквивалентный хлор» с массовой долей ξ_{Cl} . В соответствии с нормировкой, $\xi_0 + \xi_w + \xi_{Cl} = 1$. По исследованным стоянкам средняя доля воды и хлора $\langle \xi \rangle$ и дисперсия $D(\xi)$ их значений соответственно равны $\langle \xi_w \rangle = 2,56$, $D(\xi_w) = 0,44$ и $\langle \xi_{Cl} \rangle = 1,02$, $D(\xi_{Cl}) = 0,15$.

Что касается пассивных данных, то для них было введен безразмерный параметр $F_{дан}$ равный отношению темпов счета в тепловом и эпитепловом нейтронных детекторах прибора ДАН. Предложенный метод оценки массовой доли воды в грунте по данным пассивных наблюдений использует предположение, что основными причинами пространственной переменности параметра $F_{дан}$ являются вариации массовых долей воды

или хлора. Вместе с тем, очевидно, что только по одному измеренному значению параметра $F_{\text{дан}}$ невозможно определить сразу две неизвестные величины. Для этого необходимо иметь дополнительное соотношение, которое связывает между собой все три величины: наблюдаемый параметр $F_{\text{дан}}$ и две оценки массовых долей воды и «хлора», ξ_w и ξ_{Cl} . Такое соотношение можно найти благодаря тому, что для 464 активных измерений вдоль трассы имеются оценки ξ_w и ξ_{Cl} . Все активные измерения были разбиты на 10 подгрупп по ~ 50 измерений, для каждой из которых оценки массовых долей хлора ξ_{Cl} соответствовали 10 интервалам их значений от 0 до 2,45 % (Таблица 3).

Таблица 3 Эмпирические соотношения между значениями массовых долей воды ξ_w по данным активных измерений и значений параметра $F_{\text{дан}}$ для 10 групп измерений, соответствующих различным значениям массовых долей хлора до данным активных измерений

№	Интервал значений массовой доли хлора	Коэффициенты корреляции между ξ_w и $F_{\text{дан}}$	Параметры A_i	Параметры B_i
1	0,0 – 0,59	0,86	(1,07±0,09)	-(1,55±0,27)
2	0,59 – 0,69	0,88	(0,92±0,06)	-(0,77±0,21)
3	0,69 – 0,81	0,86	(1,03±0,07)	-(0,94±0,21)
4	0,81 – 0,88	0,84	(0,88±0,07)	-(0,44±0,22)
5	0,88 – 0,98	0,75	(1,08±0,09)	-(0,92±0,30)
6	0,98 – 1,08	0,85	(1,01±0,06)	-(0,61±0,19)
7	1,08 – 1,21	0,86	(1,14±0,08)	-(0,91±0,25)
8	1,21 – 1,34	0,93	(1,19±0,05)	-(0,90±0,15)
9	1,34 – 1,63	0,83	(1,29±0,10)	-(0,92±0,29)
10	1,63 – 2,45	0,87	(1,38±0,11)	-(0,84±0,29)

Для всех групп $i = 1 - 10$ наблюдается очень высокая степень корреляции между значениями ξ_w и $F_{\text{дан}}$, коэффициенты корреляции составляют от 0,75 до 0,93. Поэтому для каждой группы i была построена линейная регрессия, аппроксимирующая зависимость ξ_w от $F_{\text{дан}}$:

$$\xi_w = A_i \cdot F_{\text{дан}} + B_i$$

Это соотношение позволяет использовать данные пассивных измерений потока нейтронов в любой точке на трассе марсохода (поскольку пассивные данные непрерывны вдоль всей трассы) для оценок локального содержания воды в грунте в этой точке. Очевидно, что для этого требуется знание массовой доли хлора ξCl . Ее можно задать на основе данных активных измерений или определить из данных других экспериментов, приводящихся на борту марсохода (например, APXS).

Используя этот подход было показано, что оценка средней массовой доли воды вдоль трассы движения марсохода составила 2,6 процента. При этом были обнаружены локальные области, в которых содержание воды достигает предельно высоких и предельно низких значений. Так максимальное значение массовой доли воды составляет $(6,34 \pm 0,68)$ процента, и оно было измерено на отметке 18417 метров участка пути марсохода за сол 1985. Эта отметка соответствует области Vera Rubin Ridge (см. рисунок 3.1).

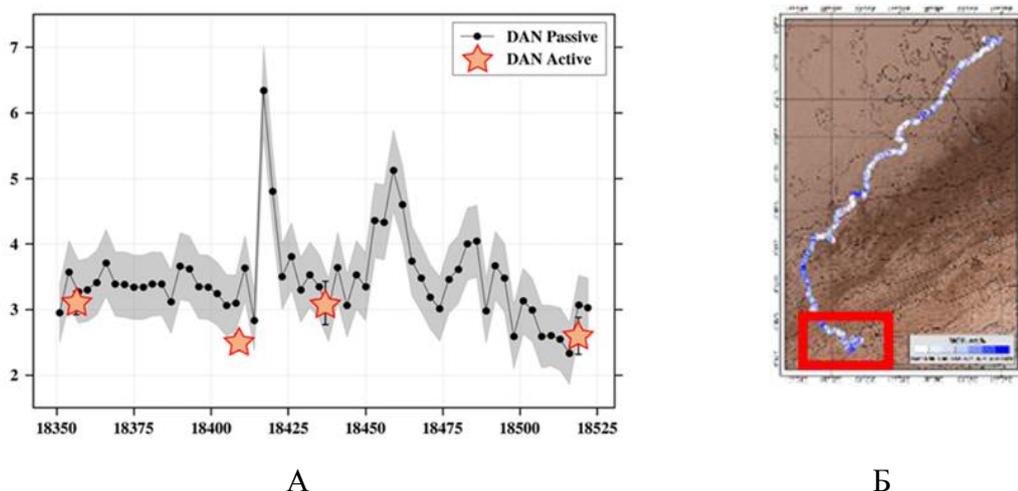
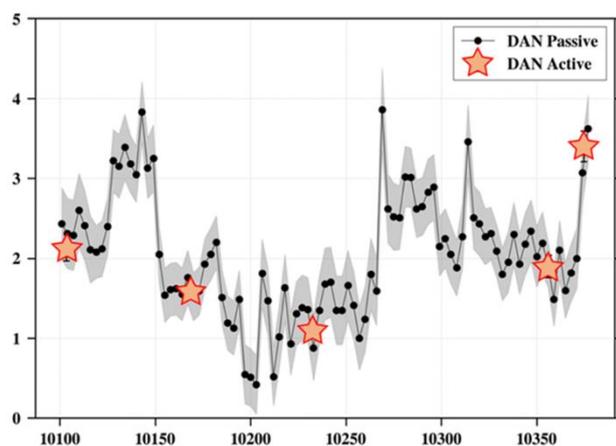
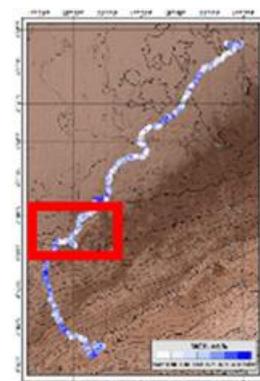


Рисунок 3.1 А: Результаты измерений прибора ДАН за солы 1950 – 1989 (18350 – 18525 м пути марсохода «Кюриосити»). Вертикальная шкала соответствует массовой доле обнаруженной воды в процентах, горизонтальная шкала - пути в метрах; Б – локализация указанных измерений на общей карте движения марсохода

Минимальное значение массовой доли воды (около нуля) было измерено на отметке 10203 метра участка пути марсохода за сол 957 и составило 0,4%. Эта отметка соответствует участку пути от Pahump Hills до Logan Pass (см. рисунок 3.2).



А



Б

Рисунок 3.2 А: Результаты измерений прибора ДАН за соли 952 – 957 (10100 – 14000 м пути марсохода «Кьюриосити»). Вертикальная шкала соответствует массовой доле обнаруженной воды в процентах, горизонтальная шкала - пути в метрах; Б – локализация указанных измерений на общей карте движения марсохода

3.2 Обнаружение пространственной корреляции повышенного содержания воды в метровом слое грунта кратера Гейл с присутствием на поверхности гидратированных минералов на основании сопоставления полученных данных прибора ДАН с данными ИК-спектрометра CRISM на борту искусственного спутника Марса MRO

Обработанные данные пассивных измерений (см. выше подраздел 3.1.) было решено сопоставить с данными спектрометра CRISM, установленного на борту космического аппарата НАСА «MRO». Указанный спектрометр ведёт съёмку в видимом и ближнем ИК-диапазоне (длина волны 362...3920 нм). Входящие в состав минералов, формирующих поверхность Марса, железо, оксиды, карбонаты и т. д. имеют характерные признаки в видимом и ИК-диапазоне и распознаются им достаточно точно. В качестве источника данных были рассмотрены спектральные изображения, специально подготовленные командой CRISM для картографирования места посадки марсохода «Кьюриосити». По результатам целевой спектральной съёмки были сформированы четыре мозаичных набора данных (FM2, MAF, HYD, ALT), созданные на основе спектрального отклика поверхности, позволяющего идентифицировать различные минералы. Для создания этих изображений были отобраны данные с высоким пространственным разрешением (около 20 м), не содержащие повышенного уровня шума и непрозрачности атмосферы. Высокое значение каждого параметра, нанесенного на карту поверхности в окрестности кратера Гейл, указывает на относительно сильную спектральную особенность и соответственно на повышенное содержание данного типа минерала в данном месте. И наоборот, низкое значение указывает на относительно слабую особенность или её

отсутствие, а значит и отсутствие данного минерала. При этом необходимо учитывать, что спектральная вариация в кратере Гейл, как правило, гораздо менее выражена, чем в некоторых других регионах Марса (например, в Долине Мавра, Долинах Маринера), и региональные «сильные» спектральные особенности в кратере Гейл не могут быть приравнены к сильным особенностям из такого региона.

Для совместного анализа были выбраны данные пассивных измерений прибора ДАН, так как они равномерно покрывают все участки траектории движения марсохода, что существенно упрощает сопоставление с данными CRISM, в качестве которых были отобраны карты распределения спектральных параметров HYD и ALT в окрестности кратера Гейл. Фактически эти карты содержат информацию о пространственном распределении гидратированных минералов, таких как филлосиликаты (в основном, Ферримагнетиты), а также моно- (кизерит) и полигидратированные (гексагидрит) Mg-сульфаты. Эти минералы являются основными индикаторами водных процессов, происходивших как локально в кратере Гейл, так и глобально на планете на рубеже нойского и гесперийского периодов геологической истории Марса. Для формирования как филлосиликатов, так и гидратированных сульфатов, необходима водная среда. Филлосиликаты могут образовываться как на поверхности в результате выветривания коренных мафических пород (например, оливина) в слабосоленой или щелочной среде, так и под поверхностью в результате гидротермальной активности, которая могла явиться результатом образования кратера Гейл вследствие удара метеорита. Образование сульфатов в результате осаждения в кислой водной среде при доминирующей роли испарения — поверхностный процесс.

Для каждой группы минералов (филлосиликаты, моно- и полигидратированные сульфаты), были отобраны участки трассы марсохода, которые прошли через области повышенного содержания данной группы минералов. Для участков трассы, соответствующих каждой группе минералов, было построено распределение значений массовой доли воды по данным прибора ДАН. Также по данным этого прибора было построено так называемое «реперное распределение» значений воды, соответствующее оценкам для всех участков пути, где не было обнаружено никаких минералов.

Тест на наличие корреляции между повышенным содержанием на поверхности грунта отдельного минерала и повышенной или пониженной массовой долей воды в верхнем слое грунта проводился на основе прямого сравнения двух распределений для значений воды: тестируемого распределения, соответствующего участкам трассы для областей с повышенным содержанием данной группы минералов, и реперного распределения. Сравнение распределений проводилось на основе критерия Пирсона, при

этом реперное распределение нормировалось на полную статистику тестируемого распределения.

Результаты теста показали, что для филлосиликатов области их повышенной распространённости не проявляют каких-либо признаков значительного среднего повышения или понижения массовой доли воды в грунте. Несмотря на то, что дисперсия массовой доли воды в случае филлосиликатов отличается от аналогичной величины для реперного распределения, значение параметра χ -квадрата, полученное при сравнении тестируемого и реперного распределений, указывает что эффект недостаточно сильно выражен: вероятность совпадения распределений составляет 2 процента.

Средняя величина массовой доли воды для моногидратированных сульфатов, 2,45 процента, заметно ниже аналогичной величины для реперного распределения, 2,60 процента, а её дисперсия практически не отличается от дисперсии массовой доли воды реперного распределения, 0,34 и 0,36 соответственно. Тест по χ -квadrату не выявил различий между двумя распределениями: вероятность их совпадения составляет почти 20 процентов.

Наличие статистически значимого эффекта корреляции между содержанием воды в грунте и минерала на поверхности обнаружено для полигидратированных сульфатов. В этом случае распределение значений воды для участков их повышенного содержания существенно отличается от реперного распределения. Это различие заметно проявляется в оценках средних значений и дисперсии, и также возможность совпадения тестируемого

и реперного распределений опровергается тестом на основе критерия χ -квадрата: вероятность их принадлежности одной генеральной совокупности составляет всего $1,59 \cdot 10^{-8}$ процент.

Таким образом, в районах на дне кратера Гейл, на поверхности которых присутствуют полигидратированные сульфаты, в приповерхностном слое грунта толщиной около 1 м наблюдается увеличение массовой доли воды до значений около среднего значения 2,86 процента при том, что в других районах среднее значение составляет 2,60 процента.

На основании проведённого кросс-анализа данных пассивных измерений прибора ДАН по содержанию массовой доли воды в грунте вдоль трассы марсохода «Кьюриосити» в кратере Гейл и совокупности данных спектрометра CRISM с борта аппарата MRO, отражающих распространение гидратированных/гидроксилированных минералов на поверхности этого кратера, было обнаружено повышение средней массовой доли воды для поверхности, содержащей полигидратированные сульфаты, относительно поверхности, не содержащей гидратированных/гидроксилированных минералов. Данное повышение тем

больше, чем выраженное спектральная особенность минерала на поверхности. Аналогичного значимого смещения для моногидратированных сульфатов и филлосиликатов обнаружено не было. Следовательно, полигидратированные сульфаты в составе осадочных пород, слагающих поверхность кратера Гейл, имеют значительную толщину, которая достаточна для определения прибором ДАН в рамках измерений в пассивном режиме, особенно в сравнении с толщиной слоёв филлосиликатов и моногидратированных сульфатов.

Значительная толщина слоя осадочных пород, содержащего полигидратированные сульфаты, предполагает длительные процессы испарения воды. Этот результат подтверждает гипотезу о присутствии жидкой воды на поверхности Марса в течении ранних эпох его геологической истории и позволяет проследить особенности формирования и эволюции поверхности кратера Гейл на всем протяжении его существования.

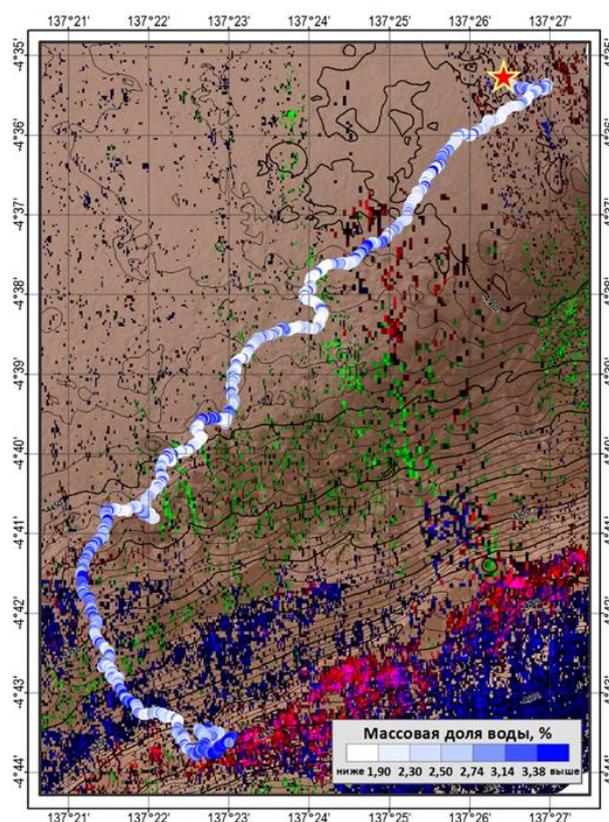


Рисунок 3.3 Измерения прибором ДАН массовой доли воды в грунте марсианского кратера Гейл вдоль трассы движения марсохода Кюриосити с пространственным разрешением 3 метра. Звездой обозначено место посадки миссии. На фоне рельефа дна кратера цветными вкраплениями показаны области распространения гидратированных минералов на поверхности по данным спектрометра CRISM, установленного на борту MRO. Красный и ярко-розовый цвета соответствует филлосиликатам, зеленый - моногидратированным сульфатам, синий - полигидратированным сульфатам. Горизонталы проведены через 10 м

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1, 2, 3, 5, 9, 18, 19) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 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

Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр (МГНС) - это научный прибор, разработанный для изучения элементарного состава подповерхностной части Меркурия путем измерения нейтронного и гамма-излучения планеты. МГНС измеряет потоки нейтронов в широком диапазоне энергий от тепловой энергии до 10 МэВ и гамма-излучения в диапазоне энергий от 300 кэВ до 10 МэВ с энергетическим разрешением около 5% на энергии 662 кэВ и 2% на энергии 8 МэВ. Для достижения такого хорошего энергетического разрешения для сцинтилляционного детектора гамма-излучения, применяется инновационный кристалл CeBr_3 .

В ходе длительного перелета космического аппарата «БепиКоломбо» к Меркурию планируется, что прибор МГНС будет работать практически непрерывно для выполнения измерений потоков нейтронов и гамма-лучей для достижения двух основных целей исследований.

Первая цель - мониторинг локального радиационного фона нейтронного и гамма-излучения космического аппарата, который образуется в результате бомбардировки энергичными частицами галактических космических лучей. Эти данные будут учтены на этапе картографирования поверхности Меркурия. Детальное знание радиационного фона от космического аппарата во время перелета поможет получить данные для нейтронного и гамма-излучения планеты на этапе картографирования. Такая информация является важной, поскольку в состав верхнего слоя планеты входят элементы, которые присутствуют в материалах космического аппарата, например, Mg, Na, O и др. На рисунке 4.1 представлен фоновый гамма-спектр космического аппарата, измеренный в первый год перелета к Меркурию.

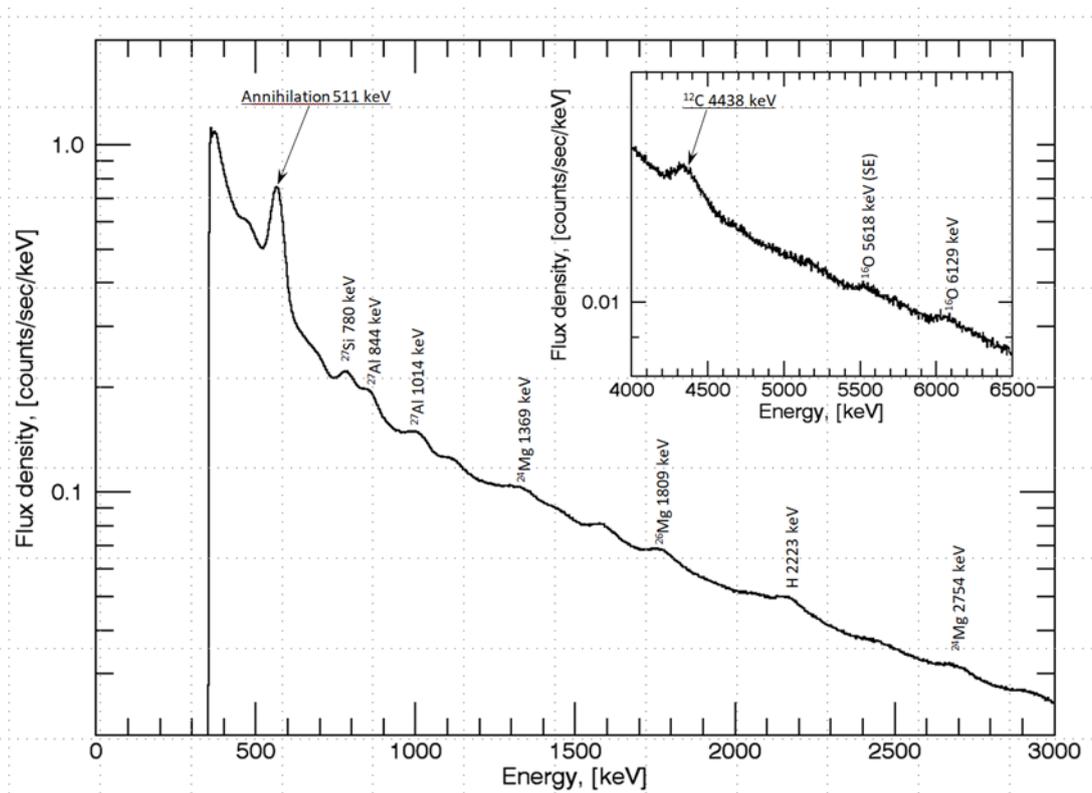


Рисунок 4.1 Гамма-спектр, зарегистрированный прибором МГНС, от космического аппарата БепиКоломбо на этапе перелета к Меркурию. Полное время накопления гамма-спектра составляет 8750 минуты

На рисунке 4.1 видно, что ядерные гамма-линии от Al, Mg и O хорошо выражены в спектре. Ожидается, что ядерные гамма-линии от этих элементов также будут обнаружены в гамма-спектре излучения поверхности Меркурия, который будет получен на этапе картографирования.

Вторая цель эксперимента МГНС на этапе перелета к Меркурию - участие в программе межпланетной сети (IPN) по локализации источников космических гамма-всплесков. Точность локализации методом межпланетной триангуляции обратно пропорциональна расстоянию между космическими аппаратами, которые одновременно зарегистрировали гамма-всплеск. До запуска БепиКоломбо, в межпланетную сеть IPN входила группа космических аппаратов, работающих на околоземной орбите (например, «Konus Wind», «Fermi GBM», «INTEGRAL», «Insight HXMT») и космический аппарат «Mars Odyssey», который работает на орбите вокруг Марса. Эксперимент МГНС, находясь на траектории перелета и орбите Меркурия дополняет сеть IPN еще одной точкой в межпланетном пространстве, которая потенциально увеличит точность локализации космических гамма-всплесков. В течение первых 8 месяцев непрерывной работы МГНС зарегистрировал 8 космических гамма-всплесков (GRB190415A, GRB190501A,

GRB190530A, GRB190611B, GRB190620A, GRB190727B, GRB191125A и GRB191202A). По умолчанию профиль гамма-излучения регистрируется с временным разрешением 20 секунд. Такого временного разрешения недостаточно для регистрации коротких гамма-всплесков, и с 14 ноября 2019 года оперативный центр миссии «БепиКоломбо» выделил ресурсы космического аппарата и наземных станций слежения для обеспечения непрерывной работы прибора МГНС с временным разрешением 1 сек с потенциальной возможностью дальнейшего уменьшения до разрешения 0,125 сек. Пример регистрации гамма-всплеска прибором МГНС представлен на рисунке 4.2.

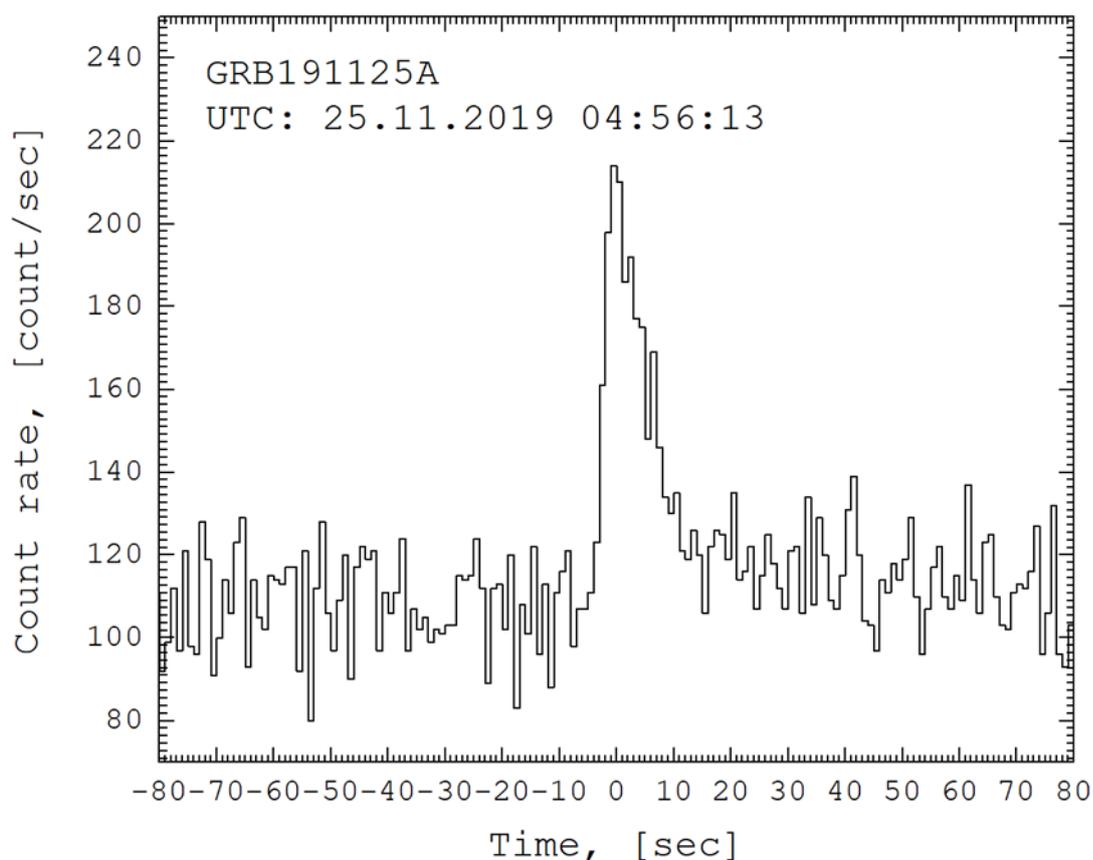


Рисунок 4.2 Временной профиль космического гамма-всплеска GRB191125A, зарегистрированного гамма-спектрометром прибора МГНС с временным разрешением 1 секунда

Гамма-излучение солнечных вспышек также представляет интерес с точки зрения регистрации прибором МГНС. Солнечные вспышки представляют собой процесс нестационарный и анизотропный, поэтому возможность наблюдать их с разных направлений в Солнечной системе имеет важное значение для дальнейшего понимания их развития и распространения. Солнечный цикл в настоящее время находится в области своего минимума, и прибор МГНС не зарегистрировал событий от солнечных вспышек в

течение первого года перелета к Меркурию. Этап перелета продлится достаточно долго, и ожидается, что в будущем такие события будут зарегистрированы.

Прибор МГНС также будет проводить специальные сеансы измерений во время гравитационных маневров, во время которых космический аппарат БепиКоломбо будет приближаться к поверхности Земли, Венеры и Меркурия. Целью таких сеансов измерений является регистрация вторичного нейтронного и гамма-излучения от верхних слоев атмосферы Земли и Венеры и поверхности Меркурия. Другой целью является проверка расчетной модели локального фона космического аппарата с использованием данных, измеренных на различных траекторных фазах пролета около Земли, Венеры и Меркурия. Пролеты на низкой высоте (такие как 700-километровый пролет около Венеры и три 200-километровых пролета около Меркурия) были бы наиболее полезны для таких проверок, когда космический аппарат будет максимально затенен планетой от галактических космических лучей. Измерения полей нейтронного и гамма-излучения при пролете около Земли позволяют исследовать взаимодействие солнечного ветра с земной магнитосферой, а также исследовать фон нейтронного и гамма-излучения космического аппарата при его прохождении через радиационные пояса Земли.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 8, 10).

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 2019 году были продолжены ранее начатые работы в области разработки новых образцов ядерно-космических приборов и новых детекторных сборок для перспективных космических миссий.

Проведено лабораторное моделирование наземных исследований грунта для отработки гамма-спектрометрических измерений на поверхности Марса. Основной целью было изучение пригодности метода меченых нейтронов для обнаружения неоднородностей в подповерхностном слое грунта под марсоходом. Была проанализирована возможность определения слоистой структуры грунта, в которой подповерхностные слои могут быть обогащены некоторыми химическими элементами или, наоборот, испытывают их дефицит.

Для наблюдений посредством метода меченых нейтронов использовалась измерительная установка (см. рисунок 5.1), состоящая из гамма-спектрометра и нейтронного генератора, оснащенного позиционно-чувствительным альфа-детектором.

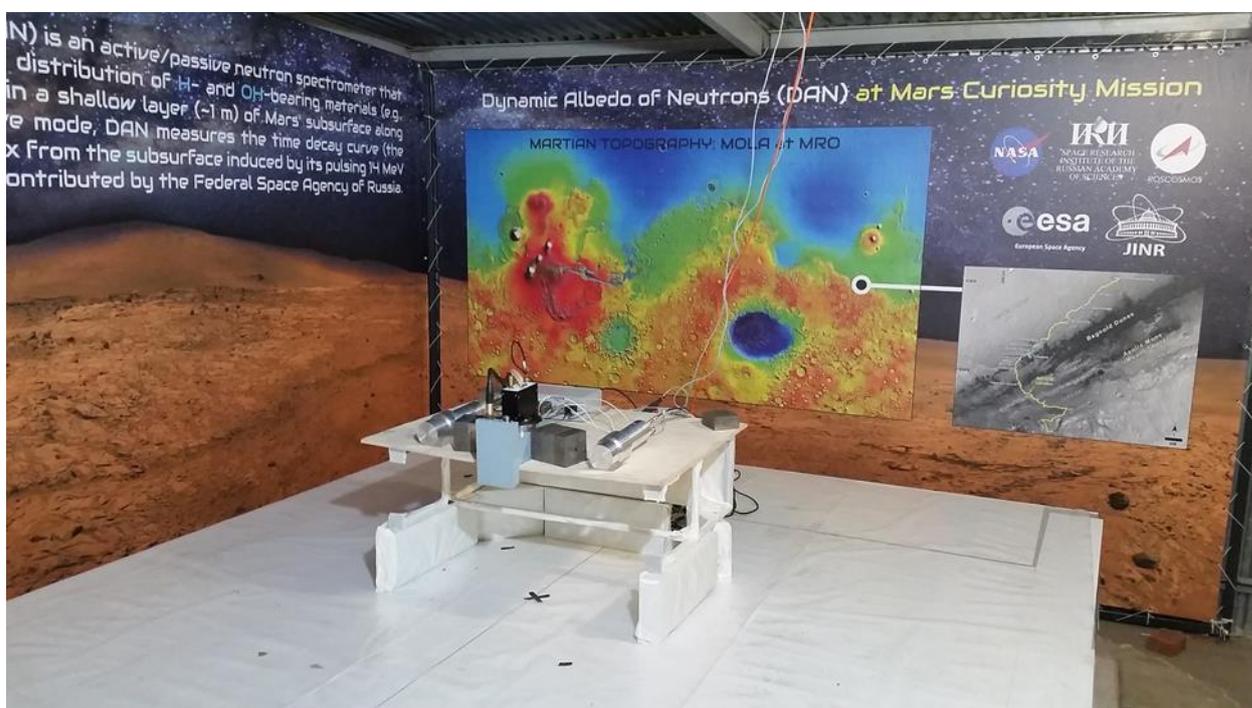


Рисунок 5.1 Фотография мишени-аналога планетного вещества с размещенным на ней измерительным оборудованием

Для исследований использовался импульсный нейтронный генератор ИНГ-27 разработки Всероссийского научно-исследовательского института им. Н.Л. Духова (ВНИИА). Он

оснащен 9-ти пиксельным кремниевым альфа-детектором, расположенным в 63 мм от тритиевой мишени. Габариты нейтронного генератора – 130×280×230 мм, вес - примерно 8 кг. Он генерирует нейтронное излучение интенсивностью в диапазоне от 10^6 до 10^8 нейтронов/секунду. Для детектирования гамма-излучения использовался гамма-спектрометр на основе сцинтилляционного кристалла бромида лантана $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\text{Ø} \times L = 76 \times 76$ мм производства компании «Сен-Гобен». Спектральное разрешение данного измерительного прибора составляет примерно 3% для энергии 662 кэВ.

Наблюдения проводились в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна, Россия, на разработанной Лабораторией нейтронной физики указанного института специальной установке для проведения испытаний с нейтронными генераторами и гамма-спектрометрами (см. рисунок 5.1). В ней используется мишень-аналог планетного грунта размером 3,21 м х 3,83 м и толщиной более 60 см, который представляет собой многослойную структуру из силикатного стекла, богатого железом и алюминием материала, а также поливинилхлорида (материала с высокой концентрацией хлора). В исследованиях использовалась конфигурация мишени, которую в первом приближении можно считать усредненным аналогом грунта приполярных районов Марса с большим содержанием водяного льда. Для имитации подповерхностного слоя льда в опытный мишень-аналог, на глубину примерно 12 см, был добавлен полиэтиленовый слой толщиной 5 см. Это похоже на структуру грунта из северного приполярного района Марса, который был исследован посадочным аппаратом НАСА Phoenix в 2008 году.

Полиэтилен по своему составу значительно отличается от среднего состава использованной мишени-аналога планетного вещества. Основной целью данных испытаний было смоделировать гамма-спектрометрические измерения на борту посадочного модуля с применением метода меченых нейтронов; понять, каким образом этот метод может помочь в обнаружении неоднородностей имитируемого грунта, найти слой полиэтилена и определить глубину, на которой он был найден.

Измерительная установка была размещена на специальной механической раме на высоте 50 см от модели планетного вещества. Нейтронный генератор был установлен на расстоянии 30 см от гамма-спектрометра. Все эти размеры повторяют вероятную конфигурацию и размещение активного гамма-спектрометра на борту марсохода.

Все измерения заняли несколько часов и включали как временные, так и спектральные данные. Измерительная установка синхронизировала время регистрации альфа-частиц в многопиксельном детекторе и регистрацию гамма-квантов в сцинтилляторе. Для определения траектории полета альфа-частиц и нейтронов в определенном телесном угле в регистрации были задействованы конкретные пиксели альфа-детектора. В этих

испытаниях был выбран телесный угол, перекрывающий участок поверхности под нейтронным генератором с размерами 25 x 25 см.

Временная задержка, измеренная между регистрацией альфа-частиц и гамма-квантов, представляет собой суммарное время, необходимое нейтрону для того, чтобы долететь до заданной точки внутри грунта, где происходит реакция неупругого рассеяния нейтрона на ядрах основных породообразующих элементов, и времени, за которое гамма-квант, произведенный в результате этой реакции, достигнет сцинтиллятора. Чем больше глубина на которой произошло взаимодействие нейтрона – тем больше временные задержки. Самое интенсивное гамма-излучение соответствует моменту времени, когда нейтроны только достигают поверхности грунта, поскольку вероятность взаимодействия нейтронов с ростом глубины падает. После регистрации альфа-частиц измерительная установка записывает спектры гамма-излучения в последовательных временных окнах продолжительностью 1 нс. С учетом скорости нейтронов с энергией 14 мэВ это приблизительно соответствует пятисантиметровому диапазону на вертикальной оси между НГ и поверхностью мишени-аналога планетного грунта. Из этого следует, что для выбранной схемы испытаний первый информативный гамма-спектр записывается с задержкой 11-12 нс после регистрации альфа-частиц. Задержка включает 10 нс, необходимые быстрым нейтронам для того, чтобы долететь до поверхности, и 2 нс, необходимые гамма-квантам для их пролёта в противоположном направлении и попадания в детектор.

Были проанализированы все зарегистрированные гамма-спектры (измеренные спектрометром на кристалле $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$) в разных временных окнах. Каждый спектр имеет свой уникальный набор линий гамма-излучения, образованного базовыми элементами грунта O, Na, Mg, Al, Si, Fe, O, C в результате неупругих реакций с быстрыми нейтронами. Наибольший интерес для изучения представляли гамма-линии кремния, кислорода и углерода.

Проведенные испытания отражают идеальный случай для проверки гипотезы, в соответствии с которой методы меченых нейтронов позволяют обнаружить сильную неоднородность в элементном составе на глубине от 10 до 30 см. В мишени-аналоге грунта неоднородность была смоделирована за счет заглубленного слоя полиэтилена, а именно большой концентрации углерода и полного отсутствия оксида кремния в этом слое. Он почти полностью состоит из углерода (массовая доля 85%), что гораздо больше, чем в измерениях карбонатов, выходы на поверхность которых наблюдают в некоторых марсианских кратерах (до 40% по массовой доле). Кроме того, в этом слое отсутствует оксид кремния. Другие пласты над и под полиэтиленом по своему среднему составу

соответствуют марсианскому грунту, в котором концентрация углерода составляет менее 0,5 %, а оксида кремния – примерно 57 %. Таким образом, в ходе испытаний проверялось, во-первых, заметны ли в измеренном спектре с временным окном длительностью 1 нс повышенная концентрация углерода и дефицит кремния, во-вторых, позволяет ли временной анализ правильно определить глубину, на которой находится полиэтиленовый слой.

Были определены пики гамма-квантов от кремния, кислорода и углерода в каждом спектре, рассчитана площадь пиков, установлена статистическая погрешность и прослежено, как эти пики меняются со временем. Площадь пика пропорциональна элементному составу, а ее статистически значимые вариации могут говорить об изменениях в распространенности кремния и углерода в зависимости от глубины. Для обнаружения таких вариаций при обработке данных отбирались пики, в которых был вычтен фон.

Пики кислорода в набранном гамма-спектре образуются в результате взаимодействий с быстрыми нейтронами, преимущественно от реакций неупругого рассеяния. В наблюдаемых спектрах линии наиболее интенсивного гамма-излучения отмечаются для следующих энергий: 7115 кэВ, 6915 кэВ, 6604 кэВ, 6128 кэВ, 5618 кэВ, 5269 кэВ, 5107 кэВ, 4758 кэВ, 4438 кэВ, 4247 кэВ, 3854 кэВ, 3692 кэВ, 3090 кэВ, 2742 кэВ. Многие из них хорошо видны в измеренных гамма-спектрах, представленных на рисунках 5.2 и 5.3.

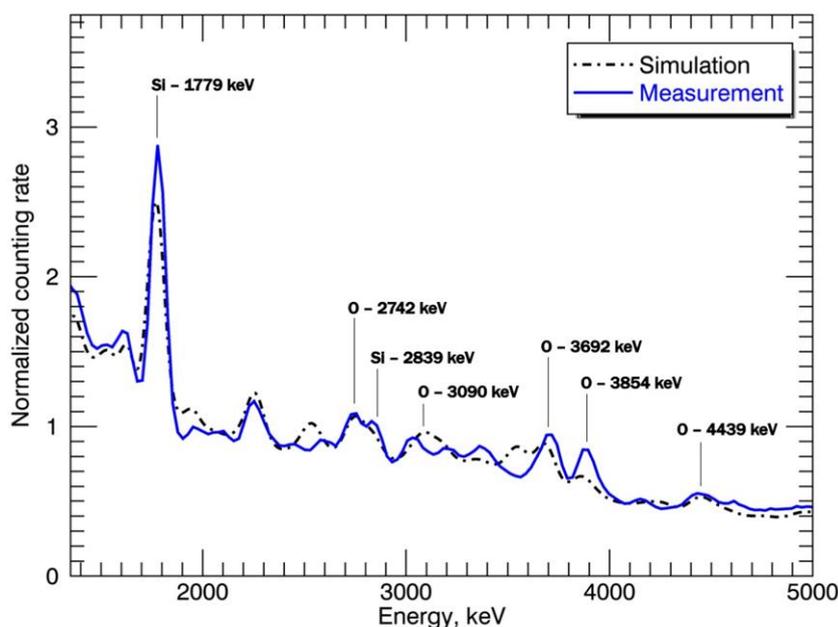


Рисунок 5.2 Суммарный спектр, полученный во временном окне, синхронизированном с поступлением фотонов из верхнего (обогащенного SiO₂) слоя имитатора грунта. Представлены результаты измерений (синяя линия) и численного моделирования (штрихпунктирная линия), нормированные относительно друг друга

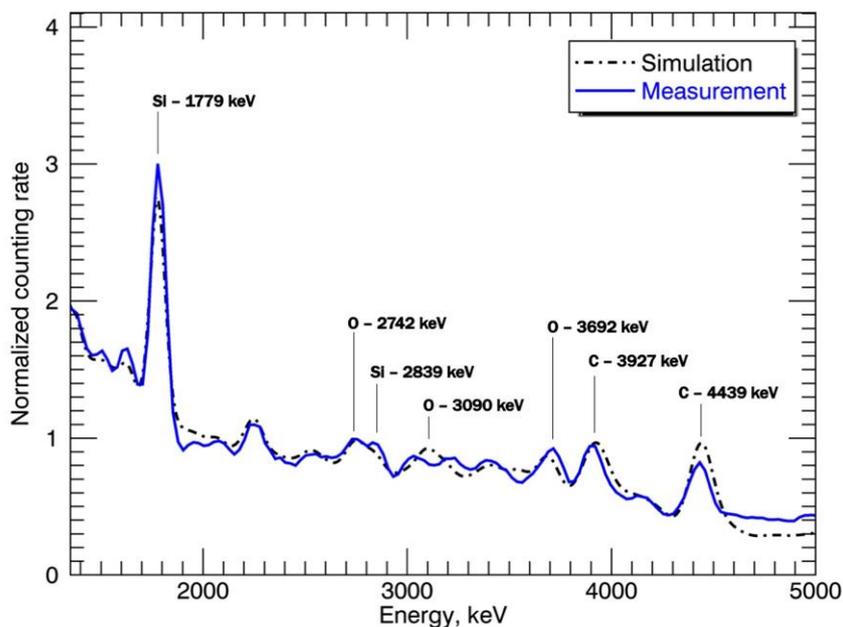


Рисунок 5.3 Суммарный спектр, полученный во временном окне, синхронизированном с поступлением фотонов из полиэтиленового слоя, расположенного внутри имитатора грунта. Представлены результаты измерений (синяя линия) и численного моделирования (штрихпунктирная линия), нормированные относительно друг друга

Кремний является вторым по распространенности элементом после кислорода. В использованной мишени-аналоге его объемная концентрация равна примерно 27 %. При облучении мишени-аналога потоком быстрых нейтронов возникают неупругие гамма-линии на энергиях 1779 кэВ и 2839 кэВ (эта линия гамма-излучения в 10 раз слабее линии с энергией 1779 кэВ). Все они наблюдаются в измеренных и имитируемых спектрах, показанных на рисунках 5.2 и 5.3.

В отличие от кислорода и кремния, углерод присутствует в марсианском поверхностном слое в малых количествах. Полагают, что он связывается с металлами и кислородом в карбонаты, которые практически не присутствуют на поверхности, а находятся, в основном на глубине. С помощью гамма-спектрометрии можно обнаружить углерод по двум сильным гамма-пикам на энергиях 4439 кэВ и 3927 кэВ. Это хорошо видно на измеренных и моделируемых спектрах гамма-излучения, представленных на рисунке 5.3. Для правильного определения микроконцентрации углерода из этих гамма-пиков надо точно вычесть фон, а также провести анализ соседних гамма-пиков, формируемых другими породообразующими элементами в данном энергетическом диапазоне. Например, такую же гамму-линию дает кислород в реакции $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma(4.44 \text{ MeV})$. Эти хорошо видно на рисунке 5.2, на котором суммарные спектры показаны для верхнего слоя модели-аналога грунта с пренебрежительно малой концентрацией углерода.

На рисунках 5.2 и 5.3 представлены гамма-спектры, суммированные в двух разных временных окнах. Первое окно было выбрано из условия, что испускаемые нейтроны должны долететь до поверхностного слоя модели (не глубже 10-12 см), производя в результате реакций неупругого рассеивания мгновенное гамма-излучение, которое регистрирует гамма-спектрометр. С учетом того, что верхний слой геометрически расположен над полиэтиленом и преимущественно состоит из оксида кремния, его измеренный спектр показывает доминирование гамма-пиков кремния и кислорода. На рисунке 5.2 видны гамма-пики кремния и кислорода, полученные с высокой степенью достоверности для энергий 1779 кэВ, 2839 кэВ, 2742 кэВ, 3692 кэВ, 3854 кэВ и 4439 кэВ. Линии углерода здесь отсутствуют. Это подтверждают и измерения и численные расчеты.

Второе временное окно было синхронизировано с выходом нейтронов, которые смогли проникнуть на большую глубину внутри мишени-аналога планетного грунта, и вступили во взаимодействие с тонким полиэтиленовым слоем. В этом случае зарегистрированный интегрированный спектр должен показать наличие интенсивных углеродных пиков. Это предположение подтверждают как измеренный, так и смоделированный спектры демонстрирующие интенсивные пики на энергиях 3927 кэВ и 4439 кэВ. Пики кислорода и кремния демонстрируют снижение интенсивности, но все равно заметны. Происходит это из-за того, что толщина полиэтиленового слоя не достаточно велика для идеальной синхронизации выхода гамма-квантов только из данного слоя и полного исключения распространения квантов из соседних слоев, богатых оксидом кремния.

Проведенные испытания и численное моделирование показали, что измерения спектров гамма-излучения в коротких временных окнах, синхронизированных с нейтронным выходом, позволяют с высокой степенью достоверности разделить сигналы с поверхности и от более глубоких слоев облучаемого грунта и тем самым обнаружить неоднородности на заданной глубине: в нашем случае это повышенная концентрация углерода и недостаток кремния. Временной анализ дает оценку глубины, где возникает неоднородность, которая совпадает с фактическим расположением полиэтилена внутри модели грунта.

Таким образом, анализ всех полученных данных позволяет сделать вывод, что измерительная установка на основе метода меченых нейтронов способна исследовать подповерхность с вертикальным разрешением примерно 5 см и позволяет обнаруживать значительные изменения (в несколько раз) концентраций некоторых породообразующих элементов при условии, что они имеют большие сечения неупругого рассеяния.

В настоящее время можно предварительно определить ресурсы, которые понадобятся для проведения таких экспериментов в космосе. Предполагаемая общая масса измерительной установки будет примерно 15 кг (нейтронный генератор и гамма-спектрометр), энергоемкость – примерно 50 Вт, а время наблюдений будет составлять часы. Последнее нужно для того, чтобы набрать достаточную статистику отсчетов в разных временных окнах для получения пиков гамма-излучения.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2019 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

Наиболее важными результатами стало построение по данным российского активного нейтронного спектрометра ДАН профиля пространственной переменности массовой доли воды в веществе кратера Гейл вдоль трассы движения марсохода НАСА Curiosity. На основании сопоставления полученных данных с данными ИК-спектрометра CRISM на борту искусственного спутника Марса MRO была обнаружена пространственная корреляция повышенного содержания воды в метровом слое грунта с присутствием на поверхности гидратированных минералов. Значительная толщина слоя осадочных пород, содержащего полигидратированные сульфаты, предполагает длительные процессы испарения воды. Этот результат подтверждает гипотезу о присутствии жидкой воды на поверхности Марса в течении ранних эпох его геологической истории и позволяет проследить особенности формирования и эволюции поверхности кратера Гейл на всем протяжении его существования.

Значительные результаты были достигнуты и по другим направлениям.

Так, в ходе проведенной работы был предложен метод, позволяющий осуществить моделирование переноса нейтрона с поверхности на орбиту и учитывающий как время жизни нейтрона, так и гравитационное поле планеты. Предложенный метод позволил изучить влияние силы тяжести и конечного времени жизни нейтрона на спектральное и угловое распределения потока нейтронов на разных высотах орбиты космического корабля. Этот метод был использован для анализа экспериментальных данных прибора ЛЕНД на борту космического аппарата НАСА LRO с целью оценить, как включение конечного времени жизни нейтрона и гравитационного поля Луны в численную модель эксперимента может повлиять на интерпретацию измерений нейтронного потока от Луны, выполненных нейтронными детекторами прибора LEND. Установлено, что влияние эффектов гравитации и конечного времени жизни нейтронов не является критичным для результатов, полученных прибором ЛЕНД, но в будущем будет полезно учитывать влияние указанных эффектов для более точной оценки полученных значений водородного эквивалента воды. Кроме того, эти эффекты должны быть тщательно рассмотрены для марсианских

орбитальных нейтронных детекторов, таких как ХЭНД на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей» и ФРЕНД российско-европейского проекта «ЭкзоМарс», работающих на более высоких по сравнению с LRO орбитах – около 400 км.

Были проведены наземные отработки с прототипом активного космического гамма-спектрометра, основанного на методе меченных нейтронов, и протестированы методы построения 3-D модели элементного состава подстилающей поверхности под космическим аппаратом. В рамках этого метода подстилающая поверхность под луноходом или марсоходом облучалась потоком быстрых нейтронов, произведенных нейтронным генератором за счет реакции $D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n$. Во время нейтронного облучения регистрировалось время и направление вылета альфа-частицы, что автоматически означает регистрацию времени и направления вылета нейтрона и позволяет пометить его. Таким образом можно отобрать только те нейтроны, которые облучают небольшой участок поверхности под космическим аппаратом, а времяпролетная методика позволяет уточнить, с какой глубины в гамма-детектор пришел гамма-квант, образовавшийся в результате реакции неупругого рассеяния нейтрона на ядрах порообразующих элементов.

Проведенной работой экспериментально подтверждена возможность изучения слоистой структуры грунта посредством предложенной методики. В частности, первые опыты показали, что можно достоверно обнаружить тонкий подповерхностный углеродосодержащий слой на глубине 10-20 см (что, например, важно для поиска подповерхностных залежей карбонатов на Марсе) и обедненные слои с пониженным содержанием кремния.

Также продолжены работы по другим направлениям темы.

В рамках исследований по теме ОСВОЕНИЕ подготовлено 19 статей и иных печатных материалов, из них 9 опубликованы и 10 поступили в редакции (см. список источников).

Из вышеуказанных 19 публикаций 10 осуществлено в периодических изданиях (из них в имеющих квартиль Q1 – 10 публикаций, квартиль Q2 – 2 публикации, квартиль Q3 – 2 публикации, квартиль ниже Q4 – 1 публикация) и 4 публикации в сборниках материалов.

О полученных результатах было сделано 15 докладов на научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список публикаций, подготовленных по теме «Освоение» в 2019 году:

Всего научных публикаций: 19, из них:

Статьи в зарубежных изданиях: 12

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 3

Публикации в сборниках и материалах конференций: 4

Статьи в научно-популярных изданиях: 0

Другие издания: 0

Доклады на научных конференциях: 15

1 Статьи в зарубежных изданиях

1. Czarnecki S., Hardgrove C., Gasda P.J., Gabriel T.S.J., Starr M., Rice M., Frydenvang J., Wiens R. C., Rapin W., Nikiforov S., Lisov D., Litvak M., Calef F., Gengl H., Newsom H., Thompson L., Nowicki S. Description of a silicic volcanoclastic layer in Gale crater, Mars using active neutron interrogation, *Journal of Geophysical Research: Planets*, submitted for publication. (Q1)
2. Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Lisov D.I., Litvak M.L., and Sanin A.B. Testing correspondence between areas with hydrated minerals, as observed by CRISM onboard MRO, and spots of enhanced subsurface water content, as found by DAN along the traverse of Curiosity, Icarus, submitted for publication. (Q1)
3. Gabriel T.S.J., Hardgrove C., Achilles C.N., Rampe E.B., Rapin W.N., Nowicki S., Czarnecki S., Thompson L., Nikiforov S., Litvak M., Mitrofanov I. Water-rich, fracture-associated alteration halos in Gale crater, Mars, *Journal of Geophysical Research: Planets*, submitted for publication. (Q1)
4. Hurley, K.; Tsvetkova, A. E.; Svinkin, D. S.; Aptekar, R. L.; Frederiks, D. D.; Golenetskii, S. V.; Kokomov, A. A.; Kozlova, A. V.; Lysenko, A. L.; Ulanov, M. V.; Cline, T. L.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Boynton, W.; Harshman, K.; Fellows, C.; Starr, R.; Rau, A., von Kienlin, A.; Zhang, X. A Search for Gravitationally Lensed Gamma-Ray Bursts in the Data of the Interplanetary Network and Konus-Wind, *The Astrophysical Journal*, 871:121 (13pp), 2019 January 20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf645> (Q1)
5. Kerner H., Hardgrove C., Czarnecki S., Gabriel T.S.J., Mitrofanov I.G, Litvak M., Lisov D., Sanin A.B. Analysis of active neutron measurements from the Mars Science Laboratory Dynamic Albedo of Neutrons instrument: Intrinsic variability, outliers, and implications for future investigations, *Journal of Geophysical Research: Planets*, submitted for publication. (Q1)

6. Lastufka E., Krucker S., Zimovets I., Nizamov B., White S., Masuda S., Golovin D., Litvak M., Mitrofanov I., Sanin A. Multiwavelength Stereoscopic Observation of the 2013 May 1 Solar Flare and CME, *The Astrophysical Journal*, 886:9 (12pp), 2019 November 20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4a0a> (Q1)
7. Litvak M.L., Barmakov Y.N., Belichenko S.G., Bogolubov E.P., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Nosov A.V., Perkhov A., Samoshin A.V., Sanin A.B., Sholeninov S.E., Shvetsov V.N., Yurkov D.I., Zontikov A. O., Zverev V.I. 3-D Imaging of subsurface structure in planetary missions, *Nuclear instruments and methods*, submitted for publication. (Q1)
8. Mangano V.,..., Kozyrev A., Mitrofanov I. at all, BepiColombo cruise and flyby science, *Space Science Review*, special issue, submitted for publication. (Q1)
9. Nikiforov S.Y., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Lisov D.I., Djachkova M.V., Jun I, Tate C.G. and Sanin A.B. Assessment of water content in martian soil along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument, *Icarus*, submitted for publication. (Q1)
10. Rothery D. A., Massironi M., ... Kozyrev A., Mitrofanov I. at all, Rationale for BepiColombo studies of Mercury's surface and composition, *Space Science Review* special issue, submitted for publication. (Q1)
11. Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Bakhtin B.N., Litvak M.L. On the account of the Moon's gravitational field in LEND measurements, *Planetary and Space Science*, Volume 179, December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104720> (Q2)
12. Shkevov, R.; Erokhin, N. S.; Loznikov, V. M.; Zolnikova, N. N.; Mikhailovskaya, L. A. Alpha particle energy gain analysis for resonant wave-particle interactions in the heliosphere periphery, *AIP Conference Proceedings*, Volume 2075, Issue 1, id.110007. <https://doi.org/10.1063/1.5091258> (-)

2 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

13. Литвак М. Л., Головин Д. В., Дьячкова М. В., Калашников Д.В., Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Третьяков В.И. Гамма- и нейтронные спектрометры, предназначенные для установки на борту лунохода, *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, статья направлена в редакцию. (Q3)
14. Литвак М.Л., Носов А. В., Козлова Т.О., Михальский В.И., Перхов А.С., Третьяков В.И. Глубинные грунтозаборные устройства для будущих российских полярных миссий, *Астрономический вестник, Исследования Солнечной системы*, статья направлена в редакцию. (Q3)
15. Лозников В.М., Ерохин Н.С. Оценка переменности потока суммы электронов и позитронов космических лучей, *Физика плазмы*, 2019, том 45, №10, с. 903-912 <https://doi.org/10.1134/S0367292119090051> (Q2)

3 Публикации в сборниках и материалах конференций

16. Dachev T., Semkova J., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Bankov N., Koleva R., Jordanova M., Shurshakov V., Benghin V., Ivanova O., Zelenyi L., Mitrofanov I., Malakhov A., Mokrousov M., Tretyakov V., Saganti P., Holland D., Okuyama K.-i., Fajardo I., Zanini A., Verneto S., Colazo M., Caruso D., Rabolli M., Ciancio V. Bulgarian participation in future interplanetary missions. Fifteen Scientific Conference with International Participation, SPACE, ECOLOGY, SAFETY, 6-8 November 2019, Sofia, Bulgaria. Sofia, 2019. S. 11-22.
17. Аникин А. А., Митрофанов И.Г., Санин А. Б., Никифоров С.Ю., Головин Д. В., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Тимошенко Г. Н., Швецов. В. Н. Перспективный прибор «Космический гамма-спектрометр с мечеными заряженными частицами» (КГС-МЗЧ) для изучения Луны, Марса и других небесных тел Солнечной системы методами ядерной физики. XVI конференция молодых учёных. Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского, М., 2019. С. 5-10. DOI: 10.21046/KMU-2019-5-10
18. Дьячкова М. В., Никифоров С.Ю., Лисов Д. И., Митрофанов И.Г., Литвак М. Л., Санин А. Б. Сопоставление данных эксперимента ДАН о распространённости воды в грунте кратера Гейл вдоль трассы марсохода Curiosity с данными эксперимента CRISM на борту марсианского спутника MRO. XVI конференция молодых учёных. Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского, М., 2019. С. 24-33. DOI: 10.21046/KMU-2019-24-33
19. Никифоров С.Ю., Митрофанов И.Г., Литвак М. Л., Аникин А. А., Головин Д. В., Дьячкова М. В., Козырев А.С., Лисов Д. И., Малахов А. В., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Третьяков В. И. Нейтронный детектор АДРОН-РМ для миссии «ЭкзоМарс-2020». XVI конференция молодых учёных. Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского, М., 2019. С. 114-120. DOI: 10.21046/KMU-2019-114-120

4. Доклады на научных конференциях

20. Djachkova, Maya; Mitrofanov, Igor; Litvak, Maxim; Lisov, Denis; Nikiforov, Sergei; Sanin, Anton. Subsurface water content in Gale crater from DAN measurements and its correlation with mineral abundance on the surface // 21st EGU General Assembly, EGU2019, Proceedings from the conference held 7-12 April, 2019 in Vienna, Austria, id.16622.
21. M.V. Djachkova, I.G. Mitrofanov, S.Y. Nikiforov, M.L. Litvak, D.I. Lisov, A.B. Sanin. Subsurface water content in Gale crater from DAN measurements and its correlation with mineral abundance on the surface // The Tenth Moscow Solar System Symposium 2019, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7-11, 10MS3-MS-08.
22. M.V. Djachkova, I.G. Mitrofanov, M.L. Litvak, S.Y. Nikiforov, D.I. Lisov, A.S. Sanin. Correlation of DAN passive observations with mineral abundances along the MSL traverse

- // October 2019 MSL Science Team Meeting, Beckman Institute Auditorium, Caltech, Pasadena, October 16-17 2019.
23. M.L. Litvak, I.G. Mitrofanov, V.I. Tretyakov, «The Nearest Perspectives for Lunokhod 2.0», The Tenth Moscow Solar System Symposium (10M-S3), IKI RAS, 7-11 October, 2019.
 24. L.M. Martinez-Sierra, I. Jun, I.G. Mitrofanov, M.L. Litvak, M.V. Djachkova, S.Y. Nikiforov, D.I. Lisov, A.S. Sanin. Galactic Cosmic Ray induced neutron environment as observed by DAN passive mode. // October 2019 MSL Science Team Meeting, Beckman Institute Auditorium, Caltech, Pasadena, October 16-17 2019.
 25. L.M. Martinez-Sierra, I. Jun, B. Ehresmann, D. Hassler, M.L. Litvak, A.C. Martin, J. Martín-Torres, I.G. Mitrofanov, J.E. Moersch, C. Tate, C. Zeitlin, M.-P. Zorzano. Galactic Cosmic Ray induced neutron environment at the surface of Mars as seen by MSL DAN instrument // Lunar and Planetary Science Conference 50, The Woadlands, USA, 18-22 March 2019, LPI Contrib. No. 2923.
 26. I.G. Mitrofanov et al., «The Concept of Luna-28 Mission for Polar Soil Return», The Tenth Moscow Solar System Symposium (10M-S3), IKI RAS, 7-11 October, 2019.
 27. I.G. Mitrofanov, M.L. Litvak, S.Y. Nikiforov, M.V. Djachkova, D.I. Lisov, A.S. Sanin. Status of DAN observations, after 7 years of operations // October 2019 MSL Science Team Meeting, Beckman Institute Auditorium, Caltech, Pasadena, October 16-17 2019.
 28. S.Y. Nikiforov, I.G. Mitrofanov, M.L. Litvak, M.V. Djachkova, D.I. Lisov, A.S. Sanin. Analysis of the water distribution in Martian subsurface estimated by passive measurements with the DAN instrument onboard NASA/MSL // The Tenth Moscow Solar System Symposium 2019, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7-11, 10MS3-MS-07.
 29. Nikiforov, Sergey; Mitrofanov, Igor; Litvak, Maxim; Sanin, Anton; Lisov, Denis; Djachkova, Maya. Water distribution in martian subsurface using of the passive neutron method: from DAN to ADRON-RM on ExoMars 2020 // 21st EGU General Assembly, EGU2019, Proceedings from the conference held 7-12 April, 2019 in Vienna, Austria, id.16282.
 30. S.Y. Nikiforov, I.G. Mitrofanov, M.L. Litvak, M.V. Djachkova, D.I. Lisov, A.S. Sanin. Assessment of water content in martian soil along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument // October 2019 MSL Science Team Meeting, Beckman Institute Auditorium, Caltech, Pasadena, October 16-17 2019.
 31. C. G. Tate, J. Moersch, I. Mitrofanov, M. Litvak, P. Bellutta, W.V. Boynton, N. Cagle, B. Ehresmann, F. Fedosov, D. Golovin, C. Hardgrove, K. Harshman, D. M. Hassler, I. Jun, A.S. Kozyrev, D. Lisov, A. Malakhov, M. Mischna, S. Nikiforov, A.B. Sanin, R. Starr, A. Vostrukhin, C. Zeitlin. Mars Science Laboratory Dynamic Albedo of Neutrons Passive Mode Data and Results from sols 753 to 1292: Pahrump Hills to Naukluft Plateau // Lunar and Planetary Science Conference 50, The Woadlands, USA, 18-22 March 2019, LPI Contrib. No. 2163.
 32. Travis S. J. Gabriel, Craig Hardgrove, Cherie Achilles, Elizabeth B Rampe, Sean Czarnecki, William Rapin, Suzanne Nowicki, Lucy M Thompson, Sergei Nikiforov,

Maxim L Litvak, Igor G. Mitrofanov and Jens Frydenvang. Pervasive water-rich, fracture-associated alteration halos in Gale crater, Mars // AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, 9 – 13 December 2019, P43B-08.

33. М. В. Дьячкова, С.Ю. Никифоров, Д. И. Лисов, И.Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, А. Б. Санин. Сопоставление данных эксперимента ДАН о распространённости воды в грунте кратера Гейл вдоль трассы марсохода Curiosity с данными эксперимента CRISM на борту марсианского спутника MRO // XVI конференция молодых учёных Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва.
34. С.Ю. Никифоров, И.Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, А. А. Аникин, Д. В. Головин, М. В. Дьячкова, А.С. Козырев, Д. И. Лисов, А. В. Малахов, М. И. Мокроусов, А. Б. Санин, В. И. Третьяков. Нейтронный детектор АДРОН-РМ для миссии «ЭкзоМарс-2020» // XVI конференция молодых учёных Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва.

Работы, опубликованные в 2019 году¹

1. Аникин А. А., Митрофанов И.Г., Санин А. Б., Никифоров С.Ю., Головин Д. В., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Тимошенко Г. Н., Швецов. В. Н. Перспективный прибор «Космический гамма-спектрометр с мечеными заряженными частицами» (КГС-МЗЧ) для изучения Луны, Марса и других небесных тел Солнечной системы методами ядерной физики. XVI конференция молодых учёных. Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского, М., 2019. С. 5-10. DOI: 10.21046/KMU-2019-5-10 (Освоение, б/к)
2. Дьячкова М. В., Никифоров С.Ю., Лисов Д. И., Митрофанов И.Г., Литвак М. Л., Санин А. Б. Сопоставление данных эксперимента ДАН о распространённости воды в грунте кратера Гейл вдоль трассы марсохода Curiosity с данными эксперимента CRISM на борту марсианского спутника MRO. XVI конференция молодых учёных. Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского, М., 2019. С. 24-33. DOI: 10.21046/KMU-2019-24-33 (Освоение, б/к)
3. Лозников В.М., Ерохин Н.С. Оценка переменности потока суммы электронов и позитронов космических лучей, Физика плазмы, 2019, том 45, №10, с. 903-912 <https://doi.org/10.1134/S0367292119090051> (Освоение, Q2)
4. Никифоров С.Ю., Митрофанов И.Г., Литвак М. Л., Аникин А. А., Головин Д. В., Дьячкова М. В., Козырев А.С., Лисов Д. И., Малахов А. В., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Третьяков В. И. Нейтронный детектор АДРОН-PM для миссии «ЭкзоМарс-2020». XVI конференция молодых учёных. Фундаментальные и прикладные космические исследования 15–17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва. Сборник трудов. Под ред. А.М. Садовского, М., 2019. С. 114-120. DOI: 10.21046/KMU-2019-114-120 (Освоение, б/к)
5. Митрофанов И.Г. Об освоении Луны. Часть 1: Русский космизм, лунная гонка и открытие «новой Луны», Земля и Вселенная, 2019, № 1. <https://doi.org/10.7868/S0044394819010018> (Освоение, б/к)
6. Митрофанов И.Г. Об освоении Луны. Часть 2: Планы и ближайшие перспективы, Земля и Вселенная, 2019, № 4 <https://doi.org/10.7868/S0044394819040029> (Освоение, б/к)
7. Митрофанов И.Г., Малахов А.В., Головин Д.В., Литвак М.Л., Санин А.Б., Мокроусов М.И. // Нейтронное картографирование Марса с высоким пространственным разрешением: первые результаты эксперимента ФРЕНД проекта «Экзомарс» Т. 2: Научное обеспечение реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. Доклады на Общих собраниях тематических и региональных отделений РАН. – М.: Российская академия наук, 2019/ Под ред. академика РАН В.Г. Бондура и члена-корреспондента РАН А.А. Маковского. (Освоение, б/к)

¹ В приложении приведены работы, опубликованные в 2019 году как по теме Освоение, так и по тематике РФНФ, в том числе работы, подготовленные и направленные в печать в 2018 году.

8. Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Санин А. Б., Аникин А. А., Дьячкова М. В., Ильин А. Г., Карпушкина Н. Е., Малахов А. В. Перспективный нейтронный детектор с антисовпадательной защитой, Письма в журнал «Физика элементарных частиц атомного ядра», 2019, том 16, №2 <https://doi.org/10.1134/S1547477119020080> (Освоение, Q3)
9. Dachev T., Semkova J., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Bankov N., Koleva R., Jordanova M., Shurshakov V., Benghin V., Ivanova O., Zelenyi L., Mitrofanov I., Malakhov A., Mokrousov M., Tretyakov V., Saganti P., Holland D., Okuyama K.-i., Fajardo I., Zanini A., Vernetto S., Colazo M., Caruso D., Rabolli M., Ciancio V. Bulgarian participation in future interplanetary missions. Fifteen Scientific Conference with International Participation, SPACE, ECOLOGY, SAFETY, 6-8 November 2019, Sofia, Bulgaria. Sofia, 2019. S. 11-22. (Освоение, б/к)
10. Hurley, K.; Tsvetkova, A. E.; Svinkin, D. S.; Aptekar, R. L.; Frederiks, D. D.; Golenetskii, S. V.; Kokomov, A. A.; Kozlova, A. V.; Lysenko, A. L.; Ulanov, M. V.; Cline, T. L.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Boynton, W.; Harshman, K.; Fellows, C.; Starr, R.; Rau, A., von Kienlin, A.; Zhang, X. A Search for Gravitationally Lensed Gamma-Ray Bursts in the Data of the Interplanetary Network and Konus-Wind, The Astrophysical Journal, 871:121 (13pp), 2019 January 20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf645> (Освоение, Q1)
11. Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Sanin, A. B.; Nikiforov, S. Yu.; Anikin, A. A.; Dyachkova, M. V.; Karpushkina, N. E.; Lisov, D. I.; Litvak, M. L.; Mokrousov, M. I.; Timoshenko, G. N.; Krylov, A. R.; Shvetsov, V. N.; Mitsin, G. V.; Molokanov, A. G. First Results for Laboratory Tests of a Concept of Space Gamma-Spectrometer with Tagged Protons Method at the JINR Particle Accelerator, Physics of Particles and Nuclei Letters, May 2019, Volume 16, Issue 3, <https://doi.org/10.1134/S1547477119030142> (РНФ 18-12-00487, Q3)
12. Lastufka E., Krucker S., Zimovets I., Nizamov B., White S., Masuda S., Golovin D., Litvak M., Mitrofanov I., Sanin A. Multiwavelength Stereoscopic Observation of the 2013 May 1 Solar Flare and CME, The Astrophysical Journal, 886:9 (12pp), 2019 November 20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4a0a> (Освоение, Q1)
13. Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Bakhtin B.N., Litvak M.L. On the account of the Moon's gravitational field in LEND measurements, Planetary and Space Science, Volume 179, December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104720> (Освоение, Q2)
14. Shkevov, R.; Erokhin, N. S.; Loznikov, V. M.; Zolnikova, N. N.; Mikhailovskaya, L. A. Alpha particle energy gain analysis for resonant wave-particle interactions in the heliosphere periphery, AIP Conference Proceedings, Volume 2075, Issue 1, id.110007. <https://doi.org/10.1063/1.5091258> (Освоение, б/к)
15. Tate, C. G., Moersch, J., Mitrofanov, I., Litvak, M., Bellutta, P., Boynton, W. V., Cagle, N., Ehresmann, B., Fedosov, F., Golovin, D., Hardgrove, C., Harshman, K., Hassler, D. M., Jun, I., Kozyrev, A. S., Lisov, D., Malakhov, A., Mischna, M., Nikiforov, S., Sanin, A. B. & 3 others, Mars Science Laboratory Dynamic Albedo of Neutrons passive mode data and results from sols 753 to 1292: Pahrump Hills to Naukluft Plateau, Icarus, 2019, 330, 15 September. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.04.029> (Освоение, Q1)