

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

Пер. № НИОТКР АААА-А18-118012290370-6

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ИКИ РАН,

Член-корреспондент РАН

А.А. Петрукович

2020 г.



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

(промежуточный)

по теме

ОСВОЕНИЕ

0028-2019-0003

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

25/12/20

И.Г. Митрофанов

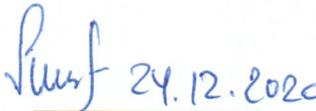
Москва 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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


подпись, дата (И.Г. Митрофанов)
25/12/20 (введение, заключение, раздел 1)

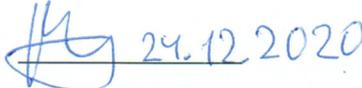
Исполнители:
заведующий лабораторией
отдела 63 ИКИ РАН,
д.ф.-м.н., проф. РАН


подпись, дата (М.Л. Литвак)
24.12.2020 (разделы 2, 3, 5)

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


подпись, дата (А.Б. Санин)
25.12.2020 (раздел 2)

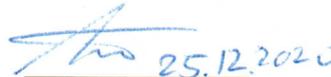
старший научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН
к.ф.-м.н.


подпись, дата (А.С. Козырев)
24.12.2020 (разделы 1, 4)

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


подпись, дата (М.И. Мокроусов)
24.12.2020 (раздел 5)

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


подпись, дата (А.В. Малахов)
25.12.2020 (раздел 5)

младший научный сотрудник
отдела 63 ИКИ РАН


подпись, дата (М.В. Дьячкова)
25.12.2020 (раздел 3)

ведущий специалист
отдела 63 ИКИ РАН


подпись, дата (Д.В. Калашников)
24.12.2020 (введение, заключение,
разделы 1, 2, 3, 4, 5)

РЕФЕРАТ

Отчет – 52 стр., 14 рис., 2 табл., 76 источн.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Важнейшие результаты за 2020 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	17
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	25
4 Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы	31
5 Разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению	33
Заключение.....	37
Список использованных источников	39

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 2020 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.

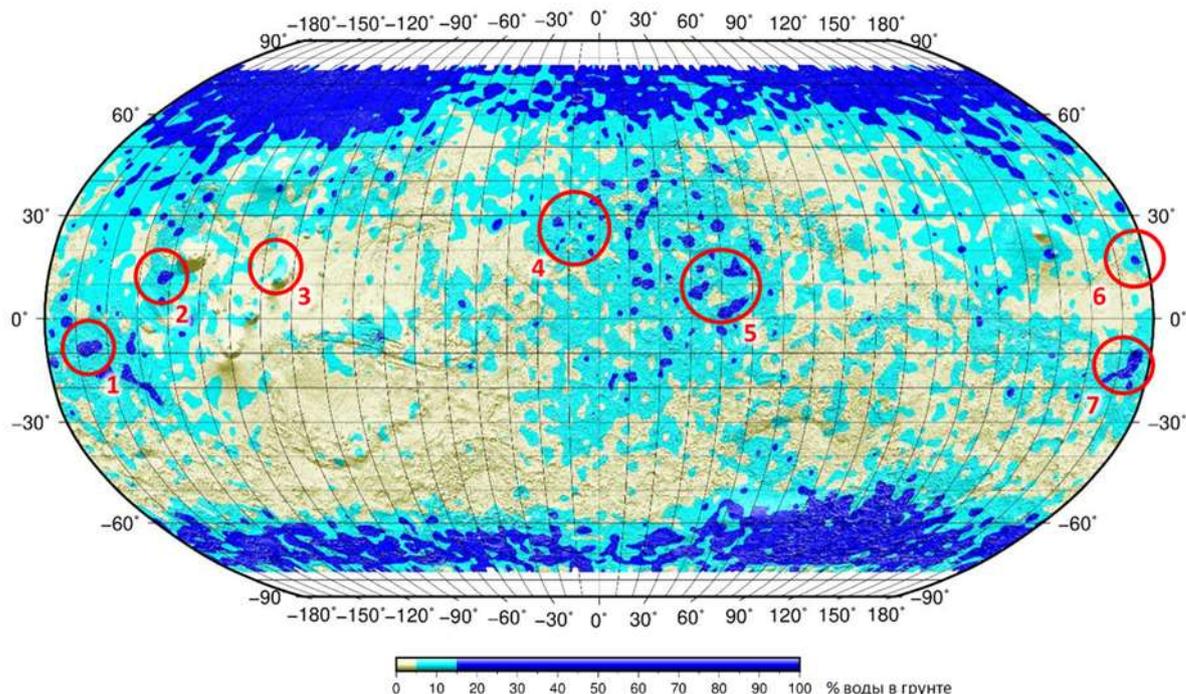
Гос.рег. № АААА-А18-118012290370-6

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

Важнейшие результаты за 2020 год. «Оазисы» льдистой вечной мерзлоты вблизи экватора Марса: нейтронное картографирование планеты по данным прибора ФРЕНД на борту спутника TGO российско-европейского проекта «ЭкзоМарс»

А. В. Малахов, И. Г. Митрофанов, М. Л. Литвак, А. Б. Санин, Д. В. Головин, М. В. Дьячкова, С. Ю. Никифоров, А. А. Аникин, Д. И. Лисов, Н. В. Лукьянов, М. И. Мокроусов

Изучение распространенности воды в приповерхностном слое вещества является одним из главных направлений космических исследований Марса. Нейтронное зондирование Марса с орбиты – один из наиболее эффективных способов измерения количественного содержания воды в приповерхностном грунте, однако пространственное разрешение таких измерений, до сих пор, составляло сотни километров. Это не позволяло отождествлять районы повышенного содержания воды со структурами рельефа. Благодаря высокому пространственному разрешению прибора ФРЕНД, установленному на борту спутника Марса TGO, достигается пространственное разрешение в 60-200 км. За период работы прибора с мая 2018 года получена детальная карта содержания воды в приповерхностном грунте Марса, выявлены локальные «оазисы» (см. рисунок) вблизи экватора, оценка содержания воды в которых достигает десятков процентов по массе. Существование таких «оазисов» крайне важно как с точки зрения выбора мест посадки будущих миссий, так и для понимания роли гидрологических процессов в эволюции Марса.



Результаты опубликованы: Малахов А.В., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Санин А.Б., Головин Д.В., Дьячкова М.В., Никифоров С.Ю., Аникин А.А., Лисов Д.И., Лукьянов Н.В., Мокроусов М.И. «Оазисы» льдистой вечной мерзлоты вблизи экватора Марса: нейтронное картографирование планеты по данным прибора ФРЕНД на борту спутника TGO

российско-европейского проекта “ЭкзоМарс”. Письма в астрономический журнал, 2020, том 46, № 6, с. 435–450, DOI:10.31857/S0320010820060078.

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 2020 году было продолжено изучение космического гамма- и нейтронного излучения и оценка радиационного фона в межпланетном космическом пространстве, на поверхности Луны, Марса и других тел солнечной системы; исследование радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий на основе анализа данных измерений следующих космических приборов:

- БТН-М1, установленного на борту российского сегмента Международной космической станции;
- ХЕНД на борту марсианского искусственного спутника НАСА «Марс Одиссей»;
- МГНС на борту межпланетного космического аппарата ЕКА «БепиКоломбо»;
- ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити».

Так, космический эксперимент «БТН-Нейтрон», в котором используется прибор БТН-М1, направлен на изучение пространственной и временной структуры нейтронного и гамма-фона, генерируемого в верхнем слое земной атмосферы и конструкционных материалах МКС галактическими и солнечными космическими лучами.

Измерения спектральной плотности нейтронного потока имеют важное значение для понимания физики короткопериодических и долгопериодических вариаций космических лучей и распределения частиц в радиационных поясах Земли, наблюдения солнечных событий и для оценки радиационной дозы, которую могут получить космонавты во время длительного пребывания в космосе.

Прибор БТН-М1, в октябре 2006 года установленный и подключенный к служебным системам российского сегмента МКС, задействованным для обеспечения КЭ, работает в научном режиме, с небольшими перерывами на время профилактических работ, начиная с февраля 2007 года. Накопленный с этого времени по настоящий период объем данных позволяет анализировать долгопериодические вариации потока нейтронов в окрестности МКС в ходе 23-го и 24-го солнечных циклов. В 2020 году были исследованы изменения потока нейтронов в диапазоне энергий от 0.4 эВ до 15 МэВ и мощности нейтронной компоненты радиационной дозы при пролете МКС над участками земной поверхности с разными индексами геомагнитного обрезания в период 2008–2020 гг.

В ходе проведенных исследований были выявлены три больших географических зоны с сильно различающимися вариациями нейтронного потока: 1) экваториальный район с высоким индексом геомагнитного обрезания; 2) области в окрестностях магнитных полюсов Земли; 3) область Южно-Атлантической магнитной аномалии (далее – ЮАМА).

В экваториальном районе наблюдаемые вариации за время работы научной аппаратуры БТН-М1 составили не более 10%, что объясняется высоким индексом геомагнитного обрезания, благодаря чему в эту область проникают только самые высокоэнергетичные частицы галактических космических лучей, слабо зависящие от вариаций межпланетного магнитного поля в гелиосфере. Здесь наблюдается самый низкий поток вторичных нейтронов и соответственно самые низкие показатели радиационного фона. Мощность нейтронной компоненты в этих районах составляет всего ~ 0.1 мкЗв/час.

В районах магнитных полюсов индекс геомагнитного обрезания падает ниже 1 ГВ, поэтому здесь существенно возрастает поток заряженных частиц (за счет проникания низкоэнергетичной компоненты галактических космических лучей), а также поток вторичных нейтронов, генерируемых в обшивке МКС. Амплитуда вариаций нейтронного потока и мощности нейтронной компоненты в ходе солнечного цикла составляют здесь до 70%, а нейтронный фон в среднем колеблется в диапазоне 1.3 – 2.0 мкЗв/час.

Наконец, при пролетах над областью ЮАМА наблюдается самый большой поток заряженных частиц за счет их проникновения из внутреннего радиационного пояса. Это приводит к большому потоку вторичных нейтронов, который превышает экваториальные значения дозы больше чем на два порядка.

Определяющую роль в наблюдаемых вариациях играет изменение высоты орбиты станции. Повышение высоты орбиты на несколько десятков километров может привести к увеличению потока вторичных нейтронов до двух раз. В те же моменты, когда высота орбиты постоянна, основной вклад, как и в случае окрестностей магнитных полюсов, вносят вариации потока ГКЛ. По данным эксперимента БТН-Нейтрон было обнаружено, что вариации потока вторичных нейтронов в области ЮАМА между минимумом и максимумом солнечного цикла составляют 1.6 раза. Это привело к тому, что мощность нейтронной дозы возросла с 17 мкЗв/час до 26 мкЗв/час.

Так как существенные вариации потока галактических космических лучей могли значимо изменить нейтронный поток и соответственно величину нейтронной дозы, было проведено сравнение измерений для периодов минимума и максимума солнечной активности. Были выбраны два интервала времени с 1 января 2014 г. по 1 июля 2015 г. и с 1 января 2018 г. по 1 января 2019 г. Первый интервал соответствует минимуму, а второй - максимуму потока ГКЛ и вторичных нейтронов в ходе 24-го солнечного цикла. В целях

оценки вклада пролетов над различными участками поверхности Земли в среднюю дозу, полученную космонавтами за большой период времени пребывания на орбите, для указанных интервалов времени были построены карты (с разрешением 2 на 2 градуса в диапазоне от широт от -51.50 до +51.50, где летает МКС) мощности нейтронной дозы (см. рисунки 1.1, 1.2.).

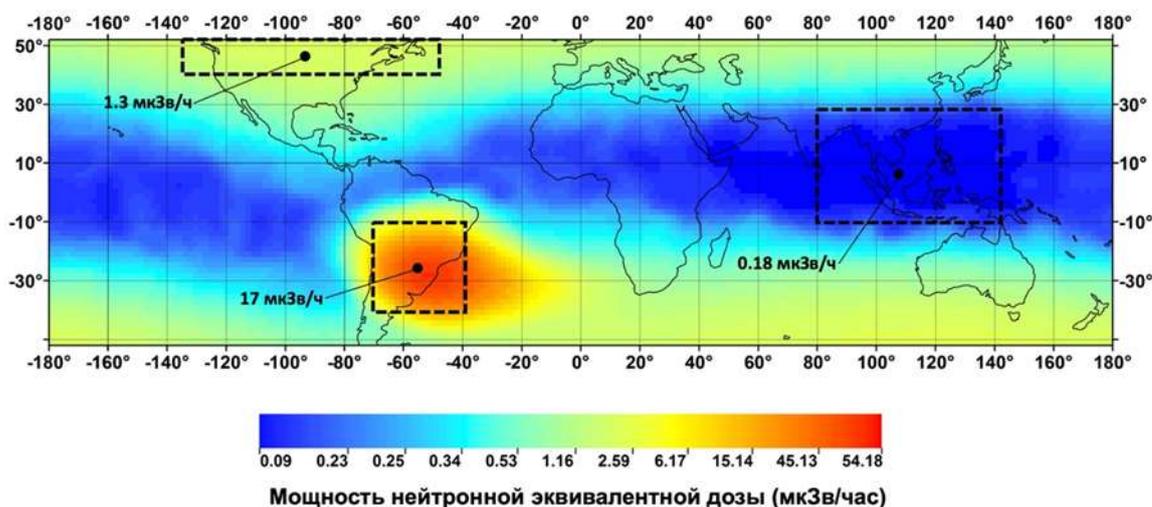


Рисунок 1.1 — Карта мощности нейтронной эквивалентной дозы, полученная по данным эксперимента «БТН-Нейтрон» за период 1 января 2014 г. – 1 июля 2015 г.

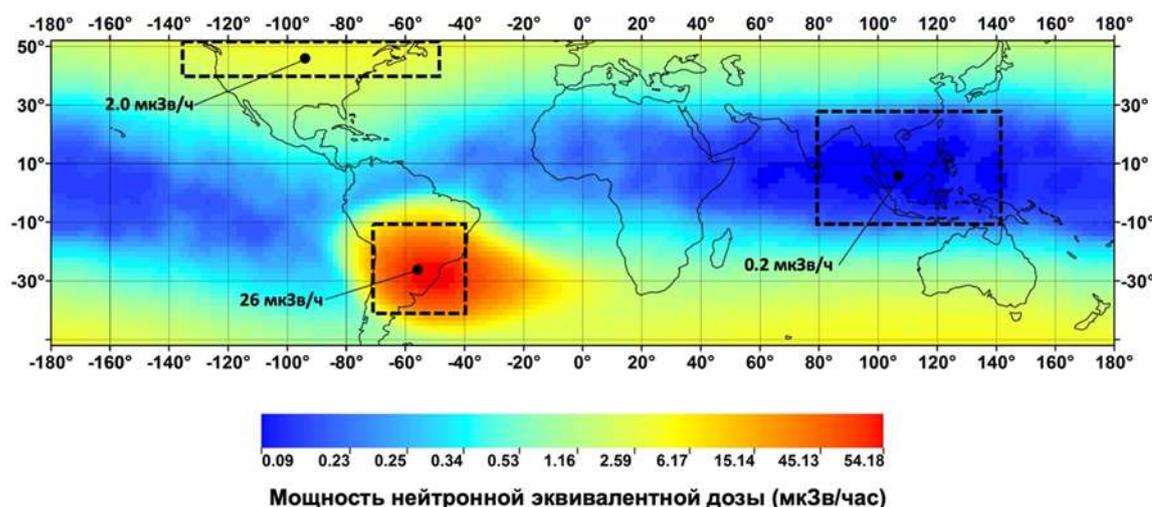


Рисунок 1.2 — Карта мощности нейтронной эквивалентной дозы, полученная по данным эксперимента «БТН-Нейтрон» за период 1 января 2018 г. – 1 января 2019 г.

В результате были получены средние оценки мощности нейтронной дозы для различных областей: экваториальные области с высоким индексом геомагнитного обрезания (10 – 20 ГВ), области вокруг магнитных полюсов Земли с низким индексом геомагнитного обрезания (<1 ГВ) и выделенная область ЮАМА, где из-за локальной особенности напряженности магнитного поля Земли радиационный пояс подходит близко

к поверхности Земли, существенно увеличивая популяцию заряженных частиц (и соответственно вторичных нейтронов) на высотах орбиты МКС (см. Таблицу 1.1).

Таблица 1.1 — Оценки мощности нейтронной компоненты радиационной дозы для максимума и минимума солнечной активности (24-й солнечный цикл) при пролете МКС над различными областями (в скобках показаны измерения болгарского дозиметра R3DR/R3DR2).

Географическая зона	Измерения во время максимума солнечной активности, мкЗв/час	Измерения во время минимума солнечной активности, мкЗв/час
<i>Экваториальные области</i>	0.184±0.002 (0.47±0.047)	0.197±0.002 (0.49±0.049)
<i>Высокоширотные области</i>	1.31±0.01 (3.5±0.35)	2.03±0.02 (5.1±0.51)
<i>ЮАМА</i>	17.0±0.8 (31.1±3.11)	25.9±1.1 (37.1±3.71)
<i>Средняя доза</i>	25.1±0.8, (66.7±6.7)	35.3±1.2 (76.2±7.6)

Особые возможности для верификации и анализа данных, получаемых с помощью прибора БТН-М1, дает их сопоставление с данными прибора ХЕНД установленного на борту КА «Марс Одиссей» и работающего на орбите Марса параллельно с «БТН-Нейтрон». Как известно, детекторный блок прибор БТН-М1 представляет собой второй летный образец прибора ХЕНД. Данные последнего были наложены на профиль наблюдений на борту МКС, при этом было получено как хорошее согласие в долгопериодической переменности (совпадение основных минимумов и максимумов, перепад по амплитуде между ними), так и в большей части мелкомасштабных особенностей (см. Рисунок 1.3).

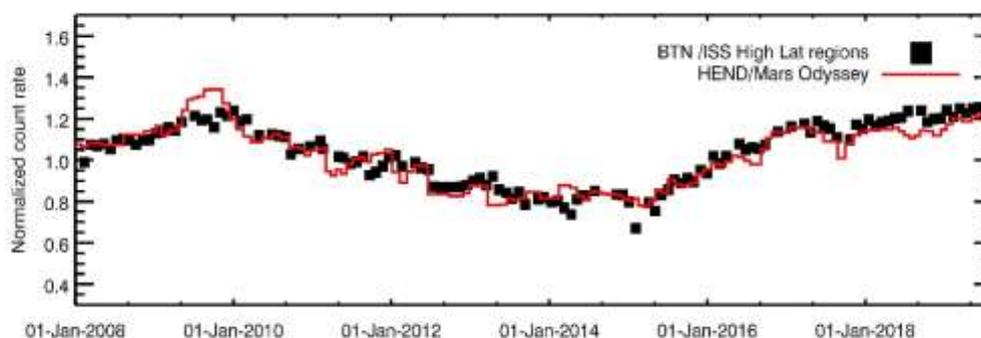


Рисунок 1.3 — Долгопериодические вариации нейтронного потока, измеренные НА «БТН-Нейтрон» при пролете над областями вокруг магнитных полюсов Земли и их сопоставление с данными наблюдений прибора ХЕНД на борту КА «Марс Одиссей».

Одной из основных научных задач космического эксперимента ХЕНД на борту космического аппарата (КА) «Марс Одиссей» является изучение космических гамма-всплесков на основе данных временных профилей. Эксперимент ХЕНД является участником межпланетной сети по локализации источников космических гамма-всплесков на небе (InterPlanetary Network - IPN). Как известно, точность локализации методом межпланетной триангуляции обратно пропорциональна расстоянию между космическими аппаратами, совместно зарегистрировавшими гамма-всплеск, поэтому основное преимущество этого эксперимента - большая удаленность КА «Марс Одиссей» от Земли, которая позволяет локализовать источники космических гамма-всплесков с высокой точностью (до нескольких угловых минут).

15 апреля 2020 г. прибором ХЕНД был зарегистрирован гамма-всплеск GRB200415A, который впоследствии был локализован методом межпланетной триангуляции на основе данных приборов, установленных на КА «Марс Одиссей», «Винд» и «Ферми» (см. рисунок 1.4). Область локализации источника этого гамма-всплеска накладывается на центральную часть близлежащей галактики NGC 253. Вероятность пространственного совпадения всплеска GRB200415A с ближайшей галактикой, составляет примерно 1 к 20000015. Источник гамма-всплеска GRB200415A отождествлён с магнитаром в галактике NGC 253.

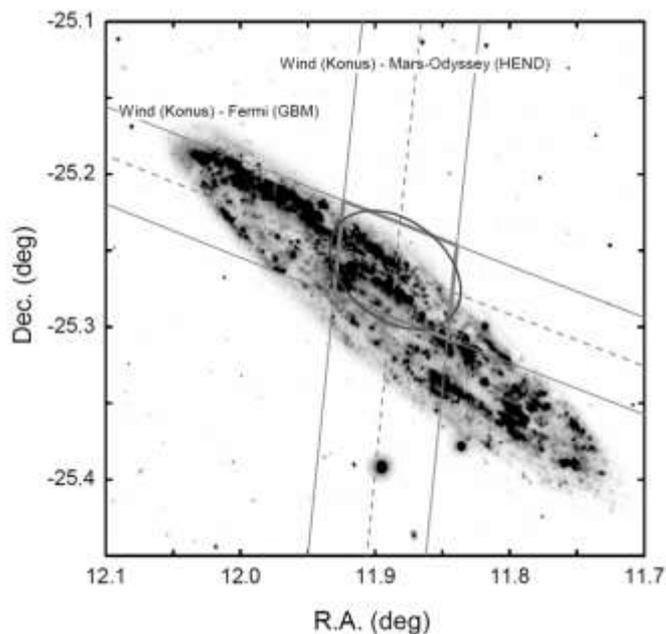


Рисунок 1.4 — Локализация гамма-всплеска GRB200415A межпланетной сетью (IPN), наложенная на изображение галактики NGC253. Локализация выполнена на основе данных космических аппаратов «Винд»-«Одиссей» (4,73 угловых минуты) и «Винд»-«Ферми» (3.58 угловых минуты)

Также была продолжена работа прибора МГНС по локализации источников космических гамма-всплесков. В течение 2020 года МГНС зарегистрировал 42 космических гамма-всплеска (GRB200125B, GRB200130B, GRB200205B, GRB200205C,

GRB200211A, GRB200219A, GRB200219C, GRB200311A,
GRB200313A, GRB200318A, GRB200324A, GRB200326B,
GRB200412B, GRB200415A, GRB200416A, GRB200522A,
GRB200524A, GRB200531A, GRB200605A, GRB200609A,
GRB200615B, GRB200619A, GRB200703A, GRB200703B,
GRB200714A, GRB200716A, GRB200716C, GRB200826B,
GRB200829A, GRB200903B, GRB200903E, GRB200907C,
GRB200914A, GRB200919C, GRB201009A, GRB201013A,
GRB201016A, GRB201103B, GRB201104A, GRB201105A,
GRB201116A, GRB201209AGRXXXXA, GRBXXXXB, GRB190620A)

Пример регистрации гамма-всплеска прибором МГНС представлен на рисунке 1.5.

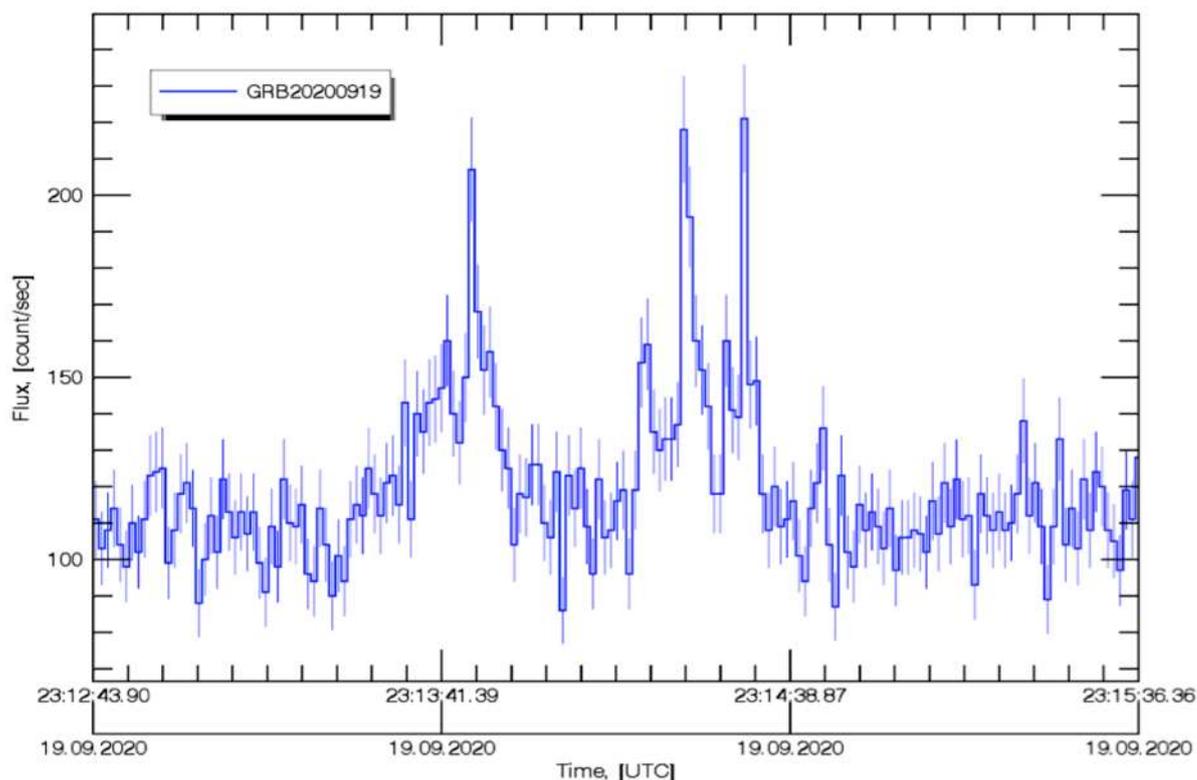


Рисунок 1.5 — Временной профиль космического гамма-всплеска GRB200919C, зарегистрированного с временным разрешением 1 секунда гамма-спектрометром МГНС 19 сентября 2020 года.

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. Однако в 2020 год прибор МГНС событий от солнечных вспышек не зарегистрировал, поскольку Солнце находится в периоде минимума активности в начале нового 25-го солнечного цикла.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.13, 2.4,) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 5.7-5.24, 5.29, 5.47-5.49).

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

Работы, проводившиеся в 2020 г., подтвердили продолжение тенденции, наметившейся в ходе работ по лунной тематике 2019 г. – постепенное смещение акцентов с решения «наблюдательных» задач на решение задач «освоенческих», связанных с предполагаемой непосредственной деятельностью на поверхности Луны, и детализация решений этих задач. Представляется, что это обусловлено приближающимися сроками перехода отечественной лунной программы из стадии подготовки в стадию практической реализации.

Так, если в 2019 г. разрабатывались вопросы грунтозаборных устройств для будущих отечественных миссий (см. подраздел 2.3 отчета по теме ОСВОЕНИЕ за 2019 г.), гамма- и нейтронных спектрометров, предназначенных для установки на перспективные отечественные луноходы (см. подраздел 2.2 отчета по теме ОСВОЕНИЕ за 2019 г.), то в 2020 г. уже разрабатывалась концепция средств обеспечения мобильности этих устройств и приборов на лунной поверхности – луноходов.

Предполагается, что будущие отечественные луноходы, во всяком случае на начальном этапе контактных лунных исследований, будут машинами малого (массой до 30 кг) или среднего (массой до 100 кг) класса, способными решать достаточно широкий спектр научно-исследовательских задач: телевизионной съёмки окрестности мест посадки, посадочных модулей, стартов возвратных модулей, а также работ, проводимых на поверхности другими мобильными устройствами (манипуляторами, грунтозаборными устройствами, пенетраторами и т.п.); сбора и доставки образцов лунного грунта в посадочный и/или возвращаемый модуль; перемещения и установки на лунной поверхности научной аппаратуры; обеспечения транспортировки грузов между несколькими посадочными модулями; мониторинга окружающей (плазменной, пылевой и радиационной) обстановки, в том числе и при стартах/посадках; исследований элементного, изотопного и минералогического состава лунного реголита, ориентированных, прежде всего, на поиск потенциально востребованных лунных ресурсов, требуемых для обеспечения работы будущей лунной базы.

Обеспечить решение вышеуказанных задач должно выполнение ряда требований, предъявляемых к луноходу. Прежде всего, он должен быть способен выполнять задачи в различных, в том числе и сложных условиях лунной поверхности на расстоянии до 30 км от посадочного модуля; иметь: систему управления, допускающую как прямое телеуправление, так и полностью автоматическое управление с использованием системы технического зрения, систему энергообеспечения и терморегулирования, допускающую длительное (до одного года) существование лунохода на поверхности Луны в условиях лунной полярной ночи, многоканальный радиокomплекс, обеспечивающий высокоскоростную (несколько мегабит в секунду) связь с посадочными и орбитальными аппаратами и наземными станциями. Кроме того, луноход должен быть оборудован многофункциональным (копание, перемещение объектов, забора проб) манипулятором, небольшим по размеру и массе грунтозаборным устройством, компактным высокоэффективным комплексом научной аппаратуры. В него войдут стереокамера на штанге и поворотной платформе для визуализации процесса движения как в передней, так и задней зонах лунохода и съёмки панорамы поверхности для построения 3D карты окружающего рельефа; нейтронный детектор для обнаружения водородосодержащих соединений на глубине до 1 м; аналитический прибор для химического и изотопного анализа образцов грунта; инфракрасный спектрометр для изучения минералогического состава подстилающей лунной поверхности; рамановский LIBS¹-спектрометр для дистанционного анализа химического состава поверхности; георадар для электромагнитного зондирования подстилающей поверхности и определения стратиграфической структуры лунного грунта.

Луноход будет иметь четыре открытых металлоэластичных колеса с электродвигателями в каждом. Схема их крепления будет зависеть от общей компоновки лунохода, которая в настоящий момент обсуждается. Рама лунохода будет выполнена в виде термостатируемой платформы с контролем температуры, снизу которой будут находиться крепления колёс и аккумуляторной батареи, а сверху устанавливаться комплекс научной аппаратуры и служебное оборудование самого лунохода. Вся конструкция будет обшита экранно-вакуумной теплоизоляцией, а снаружи будут смонтированы раскрывающиеся солнечные панели, тепловые радиаторы, элементы технического зрения, манипуляторный комплекс (см. Рисунок 2.1).

¹ Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (англ.)



Рисунок 2.1 — Концептуальный внешний вид лунохода.

Предполагаемые технические характеристики лунохода приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Предполагаемые технические характеристики лунохода

Характеристики	Значение/вид
Масса снаряжённая	80–100 кг
Полезная нагрузка	10–20 кг
Габариты (длина×ширина×высота)	600×500×250 см
Преодолеваемый угол подъёма	25°
Колёсная схема	4×4
Тип колеса	открытое металлоэластичное
Тип движителя	колёсный/колесно-шагающий
Тип двигателя (номинальная мощность)	бесколлекторый (10 Вт)
Клиренс	с возможностью регулирования
Механизм поворота	бортовой
Максимальная скорость	0,5–3 км/ч
Производительность солнечных панелей	70 Вт
Номинальное напряжение бортовой сети	12 В
Ёмкость батарей	30–40 А·ч

В целом необходимо отметить, что мобильность на поверхности Луны в реализации будущих посадочных миссий становится одной из приоритетных задач, так как существенно расширяет возможности по забору и переносу образцов грунта, их анализу,

позволяет реализовать автономную исследовательскую работу, обеспечивает возвращение после долгого перерыва к практике использования луноходов и даёт возможность отработать элементы и основные принципы будущей лунной геологоразведки.

Была продолжена работа по выбору места посадки отечественного космического аппарата «Луна-27».

«Луна-27» представляет собой спускаемый аппарат, планируемый к запуску в 2025 году и предназначенный для посадки на Луну на широтах южнее 80° ю.ш. Основной научной целью миссии является изучение реголита и экзосферы южной полярной области Луны, в том числе и поиск водяного льда.

Сами южные приполярные районы Луны представляет собой весьма сложную область как для непосредственной посадки космического аппарата на ее поверхности, так и для обеспечения благоприятных условий для дальнейшего функционирования посадочного модуля и выполнения научных задач миссии.

Основные трудности определяются сложным рельефом местности, обусловленными расположением южной полярной области на краю бассейна Южный полюс-Эйткен, самой крупной ударной системы Луны. Абсолютная высота в пределах всего южного полярного региона меняется от -8000 до 8000 м, а крутизна склонов достигает 80° . Другим фактором являются экстремальные условия освещённости, обусловленные как наклоном оси вращения Луны к плоскости эклиптики, равным $1,54^\circ$, так и указанными выше особенностями рельефа. Большая часть территории получает солнечный свет менее 50% времени, имеются постоянно затененные территории. При этом, однако, имеются районы, освещенными Солнцем значительно более 50% времени.

Выбор оптимального места посадки космического аппарата «Луна-27» выполняется на основе четко определенных научных и инженерных критериев должен обеспечить успешное решение задач миссии; инженерных критериев, строго ограничивающих выбор районов, где безопасно осуществить посадку, и научных критериев, позволяющих выбрать район, в котором возможно достижение поставленных задач и получение важных научных данных, при этом научные критерии носят рекомендательный характер при выборе благоприятных территорий для посадки, в то время как инженерные критерии строго ограничивают выбор.

В качестве сектора посадки, в котором производится выбор района посадки, предлагается видимый сектор южного полярного региона Луны, с севера ограниченный параллелью 80° ю.ш., а с востока и запада ограниченный меридианами 90° в.д. и 90° з.д. соответственно. Данное расширение посадочного сектора КА «Луна-27» в западное полушарие по сравнению с посадочным сектором КА «Луна-25» приведет к улучшению

научного потенциала посадочной территории в связи с большой распространённостью подповерхностного водорода, по данным отечественного прибора ЛЕНД на борту КА НАСА «ЛРО», именно в западном полушарии.

Важными научными критериями являются температурные условия лунного реголита, а также характер и возраст поверхности.

К инженерным критериям отнесены уклон поверхности места посадки, обеспечивающий ее безопасность и исключающий возможность опрокидывания посадочного модуля в дальнейшем, освещенность, средняя продолжительности видимости Земли.

Для совместного анализа перечисленных выше инженерных и научных критериев был разработан специальный метод, заключающийся в следующем. Каждый из перечисленных критериев был картирован, т.е. построена карта, отражающая зависимость данного критерия от географических координат. После построения карт, отражающих свойства поверхности как с точки зрения указанных выше инженерных требований, так и их перспективности с точки зрения научных исследований, было проведено их математическое наложение для поиска районов в пределах эллипсов разброса, для которых в максимальной степени выполняются все критерии успешной реализации проекта. Для количественной оценки пригодности всех тестируемых районов было проведено специальное ранжирование используемых карт: всем пикселям на картах инженерных критериев присваивались значение «0» или «1», в случае непригодности или пригодности данной территории для посадки; пикселям на картах научных параметров присваивались значения от 0 до 10 в зависимости от степени перспективности данной территории. В результате была получена ранжированная по содержанию воды карта пригодности территории южного полярного сектора для посадки космического аппарата, которая содержит множество пикселей с индексами пригодности 0. Районы-кандидаты же должны быть отобраны на основе условия, что площадки с ненулевым индексом пригодности в пределах посадочного эллипса доминируют. Доля пригодных пикселей в пределах площади выбираемого эллипса определяет его уровень пригодности для посадки. Наиболее важным параметром, определяющим возможность посадки в выбранном секторе посадки, станет точность посадки или определяемый ей размер эллипса прицеливания. В рамках проделанной работы были рассмотрены размеры области посадки 5x5, 3x3 и 0.5x0.5 км.

Анализ секторов посадки дал 6 районов-кандидатов при размере области посадки 5x5 км (при уровне пригодности эллипса 50%), 15 районов-кандидатов при размере области посадки 3x3 км (при уровне пригодности эллипса выше 50%), а посадочная площадка 0.5x0.5 км, требующая высокой точности посадки, вывела выбор мест посадки

космического аппарата «Луна-27» на уровень выбора не конкретной площадки посадки, а области, в пределах которой посадка может осуществляться на несколько площадок, при этом уровень пригодности для посадки этих площадок составляет более 85% (см. Рисунок 2.2). При этом, однако, надо учитывать, что в настоящий момент данные о поверхности с пространственным разрешением, сравнимым с размерами космического аппарата, практически отсутствуют. Получение таких данных в дальнейшем может быть обеспечено орбитальным космическим аппаратом «Луна-26».

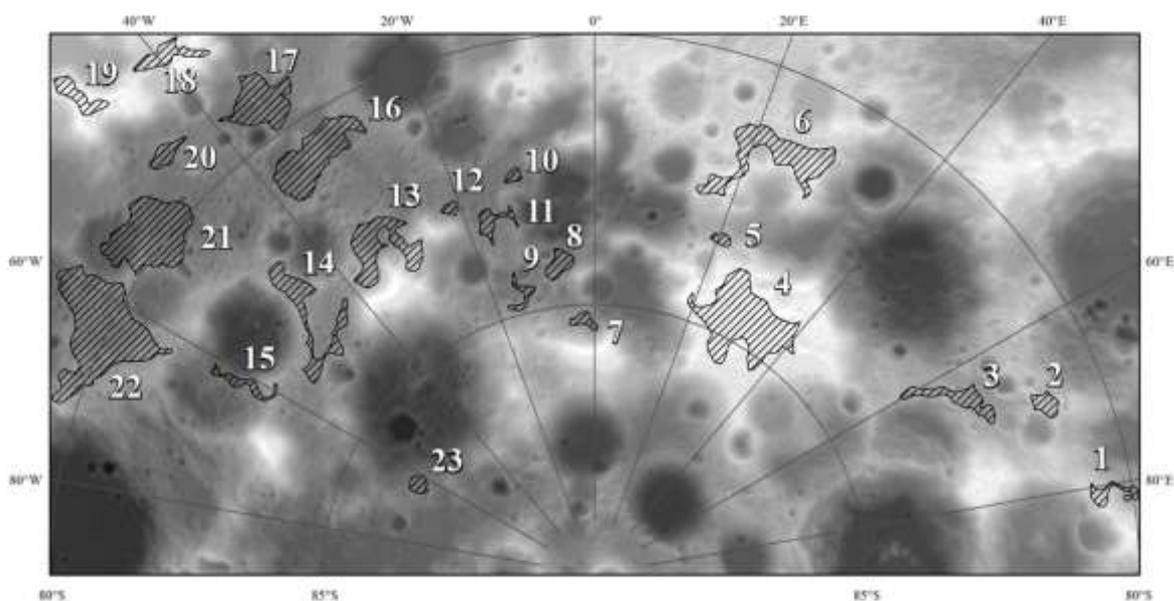


Рисунок 2.2 — Области, внутри которых могут быть выбраны места посадки КА Луна-27, имеющие радиус 0.5 км. Нумерация областей проведена в произвольном порядке.

Также совместно с группой ученых из Германии и США была проведена совместная работа по интерпретации научных данных, полученных с помощью прибора ЛЕНД, и поиску возможной корреляции с температурой лунной поверхности и приповерхностного слоя реголита. Причем температурные характеристики были получены с помощью численной модели, построенной коллегами из Германии. Было показано наличие корреляции водорода, обнаруженного прибором ЛЕНД, с низкими температурами как поверхности, так и верхних подповерхностных слоев окрестностей лунных полюсов. Тепловое моделирование применялось по отношению непосредственно к лунным полюсам и к трем ранее выявленным с помощью прибора ЛЕНД районам с пониженным потоком излучения нейтронов (Neutron Suppression Regions, NSR) в окрестности каждого из них. Для Южного полюса были выбраны районы кратеров Кабео (см., например, Рисунок 2.3), Шумейкер и Хаурт, для Северного – районы кратеров Фибигер, Уиппл и Пири.

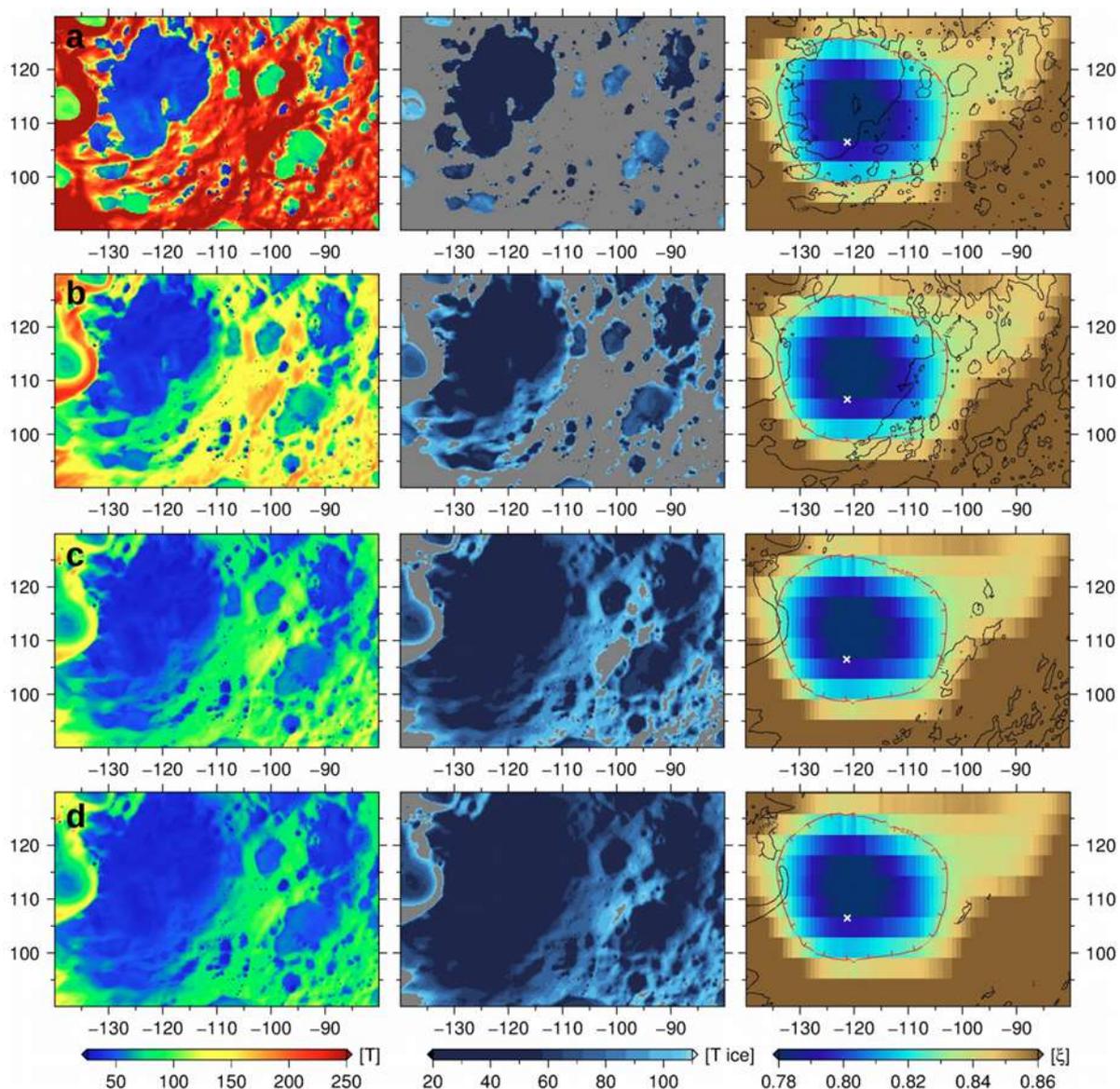


Рисунок 2.3 — Южный полярный кратер Кабео. Место проведения эксперимента LCROSS обозначено белым крестом. Левая колонка карт – максимальная температура. Средняя – возможные местоположения водяного льда ($T \leq 110$ K). Правая колонка карт - карты параметров подавления нейтронного сигнала ξ , измеренных LEND, на глубине под поверхностью (a), 2,25 см (b), 11 см (c) и 95 см (d). Области, где $T \leq 110$ K и $\xi \leq 0,83$, оконтурены черным и красным контуром соответственно.

При этом оказалось, что если температуры исследованных южных приполярных районов, которые по своим границам совпадают с постоянно затененными областями (Permanently Shaded Regions, PSR) ожидаемо соответствуют наличию на поверхности больших запасов водяного льда, то температурные условия северных районов, находящихся вне PSR, вроде бы не благоприятствуют накоплению больших запасов водяного льда, что, однако, опровергается данным наблюдений ЛЕНДа. Было сделано

предположение о том, что постоянное наличие предельно низких температур непосредственно на поверхности не является абсолютно необходимым условием для образования значительных запасов водяного льда, наличие его больших запасов в южно-полярных PSR является следствием локальных, а не универсальных для Луны процессов. Причем наличие наблюдаемых ЛЕНДом больших запасов водорода в NSR вне PSR может быть частично объяснено их залеганием на уровне 35-65 см от поверхности.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.4, 2.1-2.4, 2.5, 2.6, 2.8, 3.2) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 5.3, 5.36, 5.37, 5.43, 5.44, 5.50).

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

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

В 2020 году была продолжена работа по изучению Марса с помощью отечественных приборов ФРЕНД (см. л. 9-10 настоящего отчета) на борту космического орбитального аппарата ЕКА «ТГО», ХЕНД на борту космического орбитального аппарата НАСА «Марс Одиссей» и ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити».

Одной из важнейших проблем научных исследований Марса и его последующего народно-хозяйственного освоения остаются вопросы радиационных условий на орбите перелета Земля – Марс – Земля, на околомарсианских орбитах и непосредственно на поверхности Марса. Космическое излучение, производимое высокоэнергетическими заряженными частицами галактических космических лучей, и кратковременная солнечная активность (солнечно-протонные бури) являются основными опасностями, влияющими на жизнь космонавтов и работу электронного оборудования во время длительных межпланетных полетов и операций на поверхности.

Несмотря на то, заряженные частицы являются основным источником дозы излучения, следует также учитывать влияние вторичных частиц (в первую очередь вторичных нейтронов) из-за их более высокого биологического воздействия и трудностей, которые представляет радиационная защита от них. Нейтронная составляющая радиационного фона представляет собой довольно значительный фактор во время полета, поскольку эквивалентная доза от нейтронов может варьироваться от 1% до десятков процентов от общей дозы, в зависимости от конструкции и типа космического корабля и выбранного метода защиты от ионизирующего излучения. Более толстый корпус космического корабля уменьшает поток заряженных частиц, но увеличивает производство вторичного излучения и его последующий вклад в общую дозу. Известно, что эквивалентная доза от заряженных частиц может составлять на Международной Космической Станции (МКС) около 650 Зв/день, в то время как оценки нейтронной компоненты дают около 140 Зв/день или около 20% от полной дозы. Тем не менее, потенциальный эффект этих вторичных нейтронов недостаточно хорошо изучен, смоделирован и описан.

Достаточно сложно обстоит дело и с изучением потока вторичных нейтронов на поверхности Марса - уровень нейтронного потока и спектральные характеристики в

приповерхностном слое Марса могут изменяться в зависимости от глубины вплоть до нескольких метров. Это значительно усложняет оценку эквивалентной дозы, поскольку требует сложного численного моделирования с переменными параметрами модели.

Для проведенного анализа нейтронной компоненты использовались данные приборов ХЕНД и ДАН.

Прибор ХЕНД, как известно, входит в комплект гамма-спектрометра (GRS) на борту космического корабля НАСА «Марс Одиссей». Последний был запущен в апреле 2001 года и начал картографирование Марса в феврале 2002 года. ХЕНД - это нейтронный спектрометр, который измеряет нейтронное альbedo Марса в различных энергетических диапазонах и составляет карту распределения воды в приповерхностном слое Марса. Длительный, в течение более 15 лет, срок его работы дает уникальную возможность регистрировать долгосрочные вариации нейтронного альbedo в годичном сезонном цикле Марса. Принимая во внимание, что нейтронное альbedo Марса создается при бомбардировке галактическими космическими лучами приповерхностного слоя Марса, его долговременные изменения отражают изменения солнечного цикла галактических космических лучей. Вариации галактических космических лучей могут достигать примерно двукратных величин, что означает, что нейтронная радиационная среда также изменяется на этот порядок.

Прибор ДАН, как известно, - детектор тепловых и надтепловых нейтронов, который работает на борту марсохода НАСА «Кьюриосити». ДАН - первый нейтронный спектрометр, доставленный на поверхность Марса. Он начал свою работу сразу после успешной посадки марсохода «Кьюриосити» в августе 2012 года и продолжает работать до настоящего времени.

Данные его измерений были вместе с данными прибора ХЕНД использованы для оценки спектра нейтронов как в атмосфере, так и в подповерхностном слое Марса в целях определить дозу нейтронов для будущей марсианской пилотируемой миссии. Эти приборы измеряют нейтроны в диапазоне энергий, от тепловых / надтепловых нейтронов до быстрых нейтронов (~ 10 МэВ). Это менее опасная энергетическая полоса нейтронного спектра, однако ее вклад в общую дозу нейтронов может быть весьма значительным (около 40%) и требует оценки. Он дополняет существующие оценки дозы нейтронного излучения спектрометром RAD на борту «Кьюриосити», основанные на более высоком диапазоне энергий (выше 8–10 МэВ). Комбинация двух групп данных может быть использована для получения полной картины фона нейтронного излучения в широком диапазоне энергий.

Для получения энергетического спектра марсианского нейтронного потока было реализовано комплексное численное моделирование полного пути образования и переноса

нейтронов в марсианской среде (в подповерхностном слое и в атмосфере). Нейтронный нормализован до абсолютных значений путем сравнения с измерениями ХЕНДа и ДАНа.

В рамках исследования было рассмотрено два временных периода.

Первый, с августа 2012 года по август 2013 года, соответствует первому году работы на поверхности марсохода «Кьюриосити», когда солнечная активность была на среднем уровне в текущую солнечном цикле. Было предположено, что данные, собранные за этот период времени, отражают средний уровень радиационного фона в текущем солнечном цикле. Для этого периода времени существуют наблюдения как ХЕНДа, так и ДАНа, что дает уникальную возможность сравнения измерения с двух «нейтронных детекторов» одновременно на орбите и на поверхности.

Второй, сентября 2009 г. по январь 2010 г. был выбран исходя из того, что максимальные значения марсианского нейтронного потока должны соответствовать минимуму солнечной активности и, скорее всего, могут быть выведены из наблюдений, сделанных во время аномального 24-го солнечного цикла. Правда, это по понятным причинам исключало возможность использования данных, полученных прибором ДАН.

Такая комбинация временных периодов дала возможность оценить и изучить средние и максимальные мощности эквивалентной дозы нейтронов, с которыми могут столкнуться будущие пилотируемые экспедиции. Было показано, что мощность нейтронной компоненты радиационной дозы в диапазоне энергий до 10-15 МэВ в среднем за солнечный цикл на поверхности и на орбите Марса может составлять 25 мкЗв/день и 8 мкЗв/день, соответственно. Во время минимума солнечного цикла, когда поток галактических космических лучей максимален, эта величина может достигать ~50 мкЗв/день на поверхности.

Очень важной является также оценка дозы при межпланетных перелетах. Измерения, проведенные радиационными дозиметрами на борту марсианских автоматических миссий НАСА «Марсианская Научная Лаборатория» (прибор RAD) и ЕКА «ТГО» (прибор Liulin) показали, мощность эквивалентной дозы по заряженным частицам очень высокая и составляет ~ 2 мЗв/день (для сравнения - на Земле мощность эквивалентной дозы на уровне моря составляет 3 мЗв/год). Это позволило оценить полную дозу, которую может получить космонавт за время марсианской экспедиции, в которую включен перелет туда и обратно (180 дней в один конец) и 500 дней на поверхности. Оказалось, что величина полной дозы составляет около 1 Зв, что близко к предельно допустимой. Большую часть этой дозы космонавт получит во время перелета. Эти оценки не учитывали вклад нейтронной компоненты. С помощью нейтронных спектрометров, установленных на автоматических марсианских миссиях, можно оценить мощность эквивалентной

нейтронной дозы. Для работы над этой проблемой были использованы данные, полученные тем же прибором ХЕНД при перелете от Земли к Марсу в мае-октябре 2001 года. Большую часть времени перелета прибор ХЕНД работал в режиме измерений.

Было осуществлено численное моделирование спектральной плотности нейтронов космического аппарата и ее сравнение с измерениями ХЕНДа для оценки эквивалентной мощности дозы нейтронов во время фазы перелета космического аппарата «Марс Одиссей» к Марсу, которая пришлась на период солнечного максимума (23-й солнечный цикл).

В ходе исследования установлено, что мощность нейтронной компоненты радиационной дозы в диапазоне энергий до 0-15 МэВ во внешней окружающей среде космического аппарата «Марс Одиссей» составила $11 \pm 2,0$ мкЗв/день в диапазоне энергий 0-15 МэВ или около 29 мкЗв в день, если ее экстраполировать на диапазон энергий 0-1000 МэВ для спокойных интервалов солнца без солнечных протонных событий. Возникновение последних могло дополнительно увеличить суммарную дозу нейтронного излучения, накопленную за 6 месяцев перелета, до 10%. Измерения прибора ХЕНД во время перелета проиллюстрированы на рисунке 3.1, где видны периоды спокойного Солнца и эпизоды солнечных событий, когда в течении нескольких дней величина нейтронного потока (вторичные нейтроны, образованные солнечными протонами в обшивке КА) возрастала на несколько порядков.

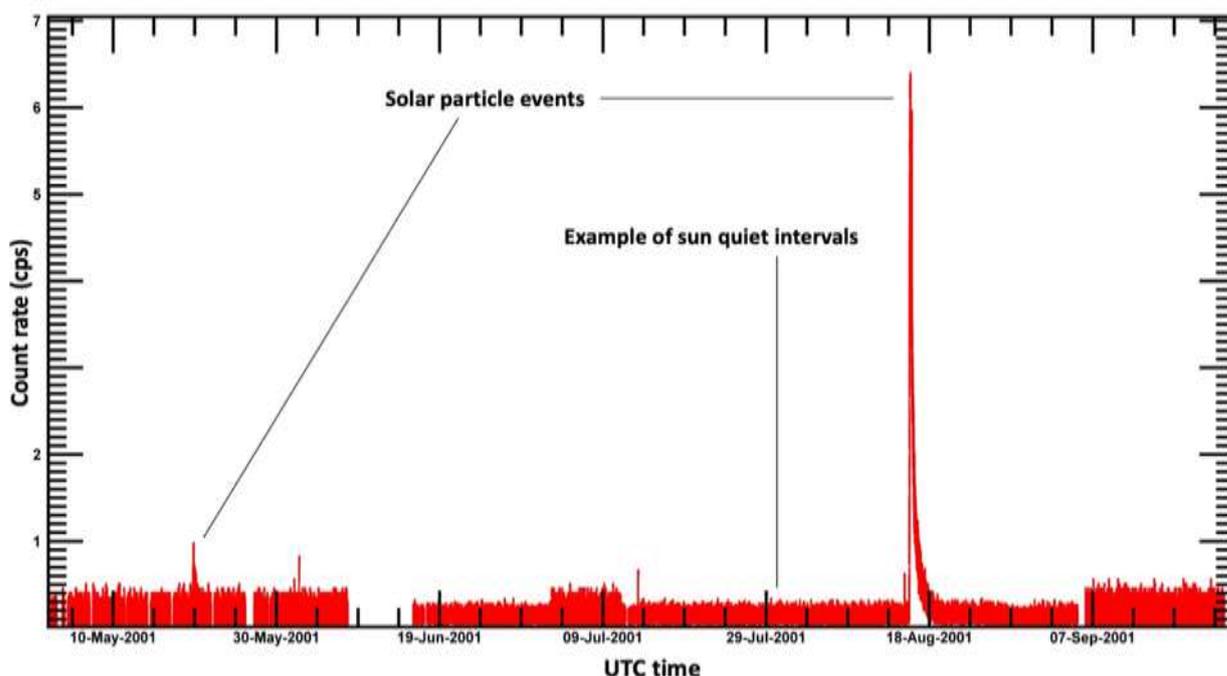


Рисунок 3.1 — Измерения прибора ХЕНД во время перелета к Марсу. Периоды с различными статистическими вариациями соответствуют различным временам получения данных (20 и 60 с).

Перелет КА «Марс Одиссей» к Марсу был осуществлён в период максимума Солнечной активности, что соответствовало минимуму потока космических лучей (основной вкладчик в радиационную дозу). Поэтому оценки полученные по данным прибора ХЕНД дают представление о минимальном уровне космической радиации, с которой могут столкнуться космонавты. Учитывая, что прибор ХЕНД работает до сих пор на орбите Марса, можно про экстраполировать полученные оценки для периода, когда наблюдался максимум потока космических лучей.

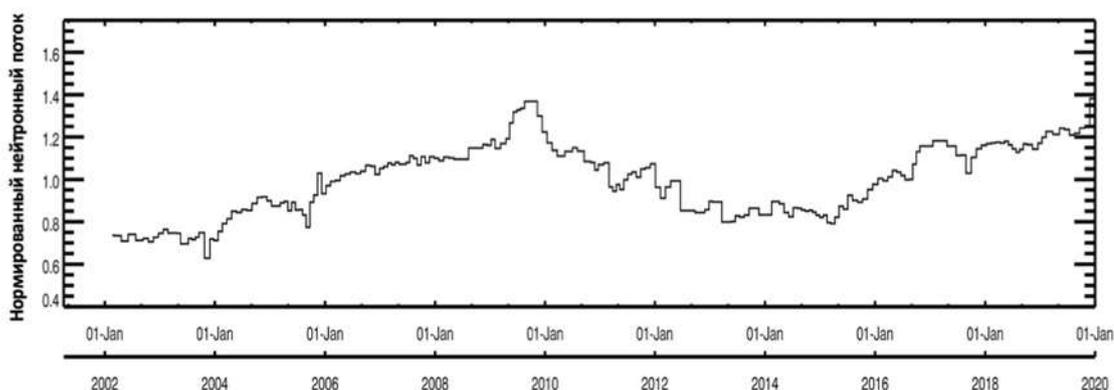


Рисунок 3.2 — Долгопериодические вариации нейтронного потока на околомарсианской орбите по данным российского прибора ХЕНД на борту космического аппарата «Марс Одиссей»

На рисунке 3.2 представлены вариации нейтронного потока, измеренные прибором ХЕНД с 2002 года. Полное время измерений составляет более 18 лет и почти покрывает два солнечных цикла. Хорошо видно, что в течении солнечного цикла величина нейтронного потока возрастает до двух раз. На основе этих данных было предсказано, что если бы перелет «Марс Одиссей» состоялся во время минимуму солнечного цикла и максимума потока космических лучей, то эквивалентная доза нейтронов во время перелета к Марса достигала бы ~ 50 мЗв/день.

Радиационный дозиметр RAD на борту КА «Марсианская Научная Лаборатория» во время перелета кроме дозы по заряженным частицами измерял также вклад нейтронной компоненты. Поэтому, для дополнительной верификации данные ХЕНД были проэкстраполированы на период ноябрь 2011 – август 2012 (перелет КА «Марсианская Научная Лаборатория» к Марсу). Полученные результаты показали хорошее согласие с данными прибора RAD (38 мкЗв/день по данным прибора ХЕНД и 30 ± 10 мкЗв/день по данным прибора RAD).

В целом было показано, что доля нейтронной компоненты дозы на перелете составляет всего 1-2% от полной дозы. Но эти значения были получены для тонкостенных автоматических аппаратов и фактически представляют только нижний предел для нейтронной дозы. Для пилотируемых аппаратов, где средняя толщина стенок космического аппарата может быть больше 20 г/см², вклад нейтронной компоненты может возрасти и составлять уже десятки процентов.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.2, 1.3, 1.5-1.7, 1.10, 1.12) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.26-5.28, 5.30, 5.32-5.35, 5.41-5.42, 5.43-5.44).

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

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

В 2020 году в ходе перелета к Меркурию продолжилась работа на борту автоматической межпланетной станции Европейского космического агентства «БепиКоломбо» научной аппаратуры МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр). Прибор МГНС является многофункциональной научной аппаратурой, включающей в себя гамма-спектрометр и нейтронный детектор. Назначение научной аппаратуры МГНС состоит в обеспечении физических измерений потоков нейтронов в широком энергетическом диапазоне (от тепловых до 10 МэВ) и гамма-квантов с высоким энергетическим разрешением (около 3,5% на энергии 662 кэВ) в диапазоне энергий от 300 кэВ до 10 МэВ во время межпланетного перелета и на орбите вокруг Меркурия. В летном образце прибора, который сейчас следует к Меркурию, использованы сцинтилляционный кристалл CeBr_3 , обладающий максимально достижимым на сегодня среди сцинтилляционных кристаллов спектральным разрешением и эффективностью регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 100 кэВ – 10 МэВ.

С момента запуска МГНС осуществлял измерения в течение примерно 85% всего времени полета в космосе. Детекторы прибора отключались, чтобы защитить его от высоковольтного разряда, в периоды работы двигателей ориентации космического аппарата. В сентябре 2020 года было проведено исследование, в ходе которого было установлено, что прибор может безопасно функционировать и в периоды работы двигателей коррекции ориентации. Начиная с 3 октября 2020 г. прибор работает непрерывно, за исключением коротких периодов, когда выключение прибора выполняется по требованию операторов космического аппарата БепиКоломбо.

10 апреля 2020 г., в ходе совершения автоматической межпланетной станцией «БепиКоломбо» первого гравитационного маневра у Земли, в ходе которого космический аппарат в 07:25 мск приблизился к Земле на расстояние около 12,7 тыс. км, МГНС провел измерения гамма-излучения от Земли (см. рисунок 4.1). Красная кривая на графике показывает темп счета гамма-лучей в интегральном энергетическом диапазоне 0.65–8.0 МэВ (вертикальная шкала слева). При подлете к Земле аппарат совершал разворот, во время которого детекторы прибора были выключены. В момент максимального сближения наблюдался пологий пик гамма-излучения, отражающий гамма-лучи от Земли.

Во время отлета от Земли «БепиКолумбо» пересек радиационный пояс земной магнитосферы, заполненный заряженными частицами. Регистрация прибором МГНС частиц этого пояса проявилась как второй более высокий пик примерно через час после первого.

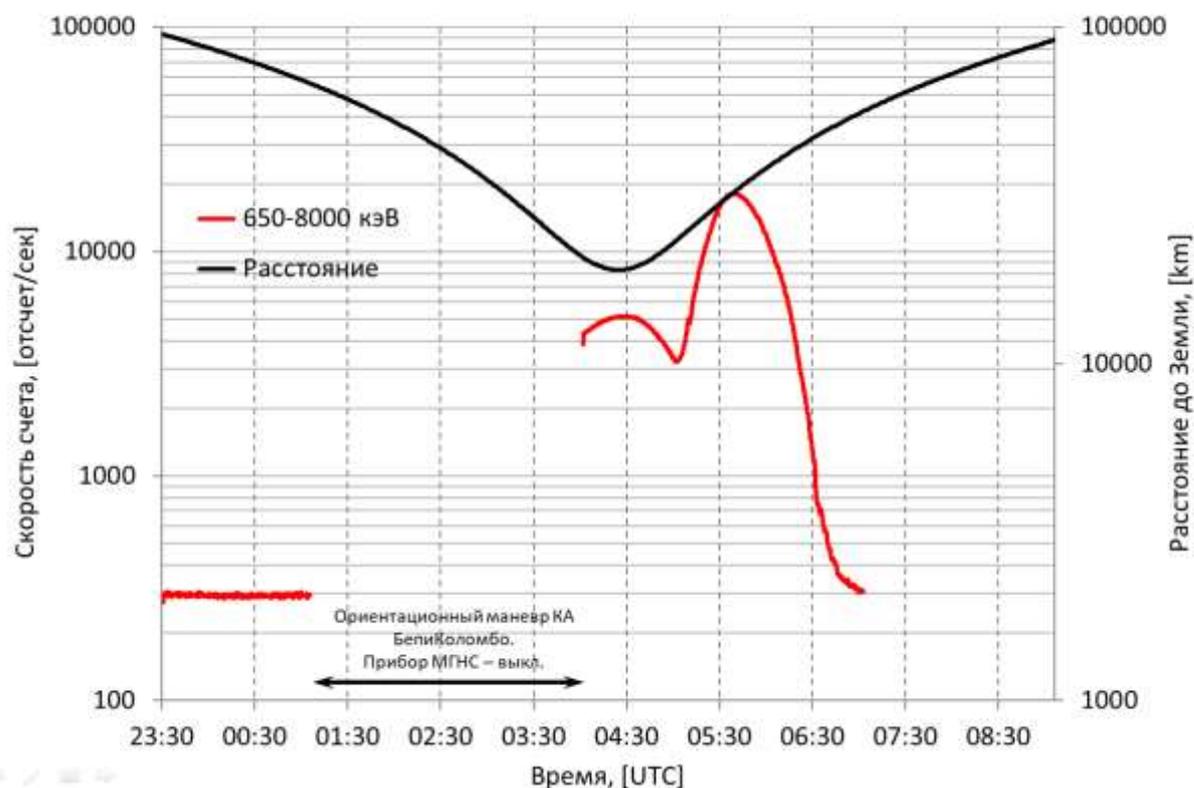


Рисунок 4.1 — Гамма-излучение от Земли по данным прибора МГНС во время пролета у Земли 10 апреля 2020 года. По горизонтальной оси отложено всемирное время (UT), момент максимального сближения аппарата с Землей наступил в 4:25 UT (в 7:25 мск). По вертикальной оси справа показано расстояние аппарата до центра Земли (черная кривая)

15 октября 2020 года в 03:58:31 аппарат БепиКолумбо совершил первый гравитационный маневр у Венеры. В ходе пролета аппарат приблизился к поверхности на расстояние 10720,5 км (16771,5 км до центра планеты). Угловой размер планеты в момент максимального сближения составил около 42 градусов. НА МГНС работала в течении всего гравитационного маневра. Полученные при этом научные данные в настоящий момент находятся на стадии интерпретации. Второй маневр у Венеры запланирован на 10 августа 2021 года.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 1.1, 1.9, 1.11) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 5.6, 5.25).

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 2020 году были продолжены ранее начатые работы в области разработки новых образцов ядерно-космических приборов и новых детекторных сборок для перспективных космических миссий.

Основные усилия были сосредоточены на работах по созданию перспективного космического гамма-спектрометра, основанного на методе меченных заряженных частиц. В результате работ создан лабораторный прототип космического прибора с уровнем технологической проработки, позволяющем перейти к созданию космического прибора для мобильного космического аппарата на поверхности Луны, Марса или другого космического тела без атмосферы или с тонкой атмосферой, а также экспериментально подтверждены преимущества предложенного метода космической гамма-спектроскопии на основе метода меченных заряженных частиц по сравнению с традиционным методом на основе анализа интегрального спектра гамма-лучей на поверхности небесного тела. Указанные работы выполнялись при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00487). С результатами проведенных работ можно ознакомиться в следующих публикациях (см. список источников, п. 4.2 и 4.3).

Так же продолжалось осмысление накопленного опыта в создании научных приборов, в том числе и для решения последующих задач разработки перспективной научной аппаратуры для будущих космических миссий.

Особую роль в создании гамма- и нейтронных спектрометров для космических миссий играют их наземные калибровки. Практика показала, что фактически без проведенных наземных калибровок невозможно добиться полной эффективности научной аппаратуры как на поверхности других планет, так и в открытом космосе.

При разработке нейтронного телескопа ФРЕНД, установленного на борту искусственного спутника Марса «ТГО» (см. л. 9-10 настоящего отчета) непосредственно перед запуском космического аппарата были проведены калибровки летного образца указанного прибора. В 2020 году была закончена всесторонняя обработка этих данных, а результаты представлены в отдельной публикации.

Целью этих калибровок было экспериментальное определение значений эффективных площадей детекторов прибора в зависимости от энергии и направления распространения потока налетающих нейтронов.

Для построения сквозной численной модели эксперимента ФРЕНД необходимо получить оценку темпа счета нейтронов в детекторах прибора ФРЕНД в зависимости от спектральной и угловой плотности потока нейтронов $F(E, \mathbf{n})$ на орбите. Решение этой задачи обеспечивает связь модельной карты потока нейтронов (второй уровень) с картой первого уровня, для которой предсказываются значения темпа счета нейтронов детекторами. Для ее решения необходимо знать спектральную и угловую зависимость эффективной площади детектора $S_{\text{eff}}(E, \mathbf{n})$, которая определяет темп счета детекторов в зависимости от величины налетающего потока.

Для проведения физических калибровок были обеспечены следующие условия измерений:

- 1) Был создан источник нейтронов с известной интенсивностью, форма энергетического спектра которого максимально точно воспроизводит энергетический спектр потока нейтронов на орбите Марса.
- 2) Были обеспечены низкофоновые условия измерений.
- 3) Была собрана измерительная установка, которая позволяет проводить измерения условиях, когда источник находится на разных расстояниях от детекторов прибора.
- 4) Была собрана измерительная установка, которая позволяет проводить измерения под различными углами относительной оси каждого детектора.

Все калибровки проводились с летным образцом прибора ФРЕНД в Лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна. Все измерения с прибором ФРЕНД проводились в большом лабораторном зале с размерами 10м x 10м x 10 м, где ранее (2008 год) были выполнены калибровки прибора ЛЕНД. Большая площадь помещения и высокие потолки позволили максимально уменьшить локальных фон в зале вследствие перерасеяния потока нейтронов от источника.

Для проведения калибровок использовался реперный источник, представляющий собой радиоактивный ^{252}Cf , помещённый в полиэтиленовую сферу. Диаметр сферы равный 7.6 см и был подобран таким образом, чтобы форма энергетического спектра нейтронов от источника была максимально близка к спектру нейтронного альbedo Марса.

На рисунке 5.1 схематически представлена конфигурация измерительной установки, использованной для физических калибровок прибора «ФРЕНД».

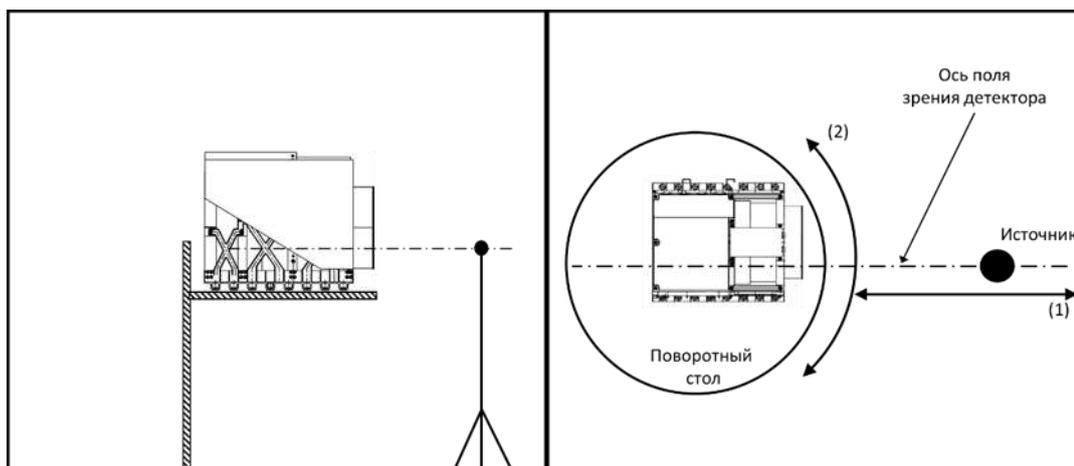


Рисунок 5.1 — Схема проведения калибровок. Слева, вид сбоку: прибор расположен в геометрическом центре испытательного зала, равноудалённо от стен и потолков при помощи подъемного механизма. Источник расположен при помощи штатива на оси поля зрения детектора. Справа, вид сверху: прибор расположен на поворотном столе. Источник двигается по направлению (1) для проведения измерений эффективной площади детекторов. Поворотный стол вращается в направлении (2) для измерения угловой функции чувствительности детекторов.

Во время измерений прибор располагался максимально близко к геометрическому центру зала и равноудалённо от пола и потолка помещения. Он был установлен на поворотном столе на вершине подъёмного механизма. Подъёмный механизм обеспечивал установку прибора на расстоянии порядка 5 метров от пола и потолка, а поворотный стол позволял изменять угол между осью поля зрения каждого коллимированного детектора и направлением на источник. Ось вращения поворотного стола всегда проходила через геометрический центр калибруемого детектора. Источник нейтронов помещался на штативе на переменном расстоянии от прибора по горизонтали на том же расстоянии порядка 5 метров от пола и потолка, как и сам прибор. При калибровке каждого детектора прибора положение источника выставлялось таким образом, чтобы горизонтальная ось на источник проходила через геометрические центры источника и детектора.

Во время измерений прибор поворачивался вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический центр каждого детектора на углы $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$, $\pm 3^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 7^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 11^\circ$, $\pm 13^\circ$, $\pm 16^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 70^\circ$, $\pm 90^\circ$, 180° относительно направления на источник. В совокупности для каждого из детекторов проведена серия из 31 измерения. При затенении источника коллиматором поток нейтронов, достигающий детектор, тем больше ослабляется, чем толще стенки коллиматора на прямой между источником и детектором. Результаты измерений угловых чувствительностей для каждого детектора летного образца

прибора «ФРЕНД» приведены на рисунке 5.2. Полученные кривые зависимости темпа счета от угла между осью поля зрения коллиматора и осью направления на источник нейтронов подтверждают хорошую коллимирующую способность прибора «ФРЕНД». Если при 0 градусов темп счета, как и ожидалось для незатененного поля зрения, достигает максимума (нормирован на 1 на графике на рисунке 5.2), то при наибольшем затенении, в районе 14-15° (где на пути нейтрона находится наибольшее количество вещества коллиматора), темп счета падает примерно в 10 раз. Эффективность коллимации нейтронов под углом в 90°, т.е. при прохождении нейтронов по наиболее тонкому сечению коллиматора, уменьшается незначительно.

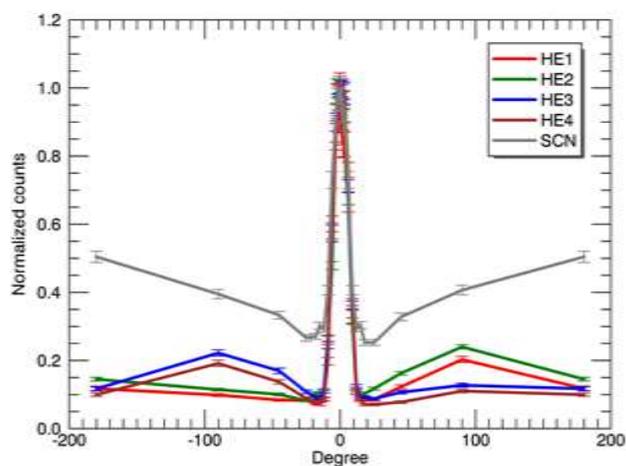


Рисунок 5.2 — Угловые чувствительности гелиевых (HE1-HE4) и сцинтилляционного (SC) детекторов летного образца прибора ФРЕНД.

Калибровочных измерения летного образца прибора «ФРЕНД» показали, что конструкция прибора обеспечивает заявленные измерительные свойства и позволяет как использовать данные измерений, полученные с орбиты Марса для восстановления величины нейтронного потока по измеренному темпу счёта, так и осуществлять поиск локальных областей с повышенным содержанием связанной воды или водяного льда по мелкомасштабным вариациям темпа счета.

Опыт калибровки летного образца прибора ФРЕНД будет востребован при разработке нейтронных спектрометров для будущих планетных миссий.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 2.7) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 5.38-5.40).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2020 году по теме

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

В 2020 году было продолжено изучение небесных тел Солнечной системы, в том числе и с учетом перспектив их народно-хозяйственного освоения.

Наиболее важным результатом стало выявление локальных «оазисов» вблизи экватора Марса, оценка содержания воды в которых достигает десятков процентов по массе. Существование таких «оазисов» крайне важно как с точки зрения выбора мест посадки будущих миссий, так и для понимания роли гидрологических процессов в эволюции Марса.

Проведены оценки мощности нейтронной компоненты радиационной дозы на международной космической станции, поверхности и атмосфере Марса, орбите перелета от Земли к Марсу, которые могут быть востребованы при оценке радиационных рисков будущих марсианских экспедиций.

Продолжены работы по «лунной» тематике, при этом все большее место начинают занимать работы, связанные с непосредственной подготовкой к началу освоения Луны. Предложены перспективные участки для посадки космического аппарата «Луна-27», разработана перспективная концепция среднего лунохода.

Также продолжены работы по исследованию радиационных эффектов в космосе от галактических космических лучей, солнечных вспышек и протонных событий, в том числе и с борта космического аппарата «БепиКоломбо» на орбите перелета к Меркурию с помощью научной аппаратуры МГНС.

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

В рамках исследований по теме ОСВОЕНИЕ подготовлено 21 статьи, из них 10 опубликованы и 11 поступили в редакции (см. список источников).

Из вышеуказанных публикаций 19 подготовлены в периодических изданиях, из них в имеющих квартиль Q1 – 11 публикаций, квартиль Q2 – 2 публикации, квартиль Q3 – 5 публикаций, квартиль ниже Q4 – 1 публикация. 2 публикации осуществлено в сборниках материалов.

О полученных результатах было сделано 30 докладов на научных конференциях и разослано 20 циркуляров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список подготовленных в 2020 г. работ:

Всего подготовлено научных публикаций в 2020 г: 76 (из них опубликовано 65, подготовлено к печати 11)

Статьи в зарубежных изданиях: 14 (из них 1 выполнена при поддержке РНФ и 1 при частичной поддержке РФФИ);

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 6 (из них 1 при поддержке РНФ);

Статьи в научно-популярных журналах: 1

Публикации в сборниках и материалах конференций: 5 (из них 1 при поддержке РНФ и 2 при поддержке РФФИ);

Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 11

Доклады и циркуляры: 50

1 Статьи в зарубежных изданиях

- 1.1 Benkhoff J., Besse S., ... Kozyrev, A.; Litvak, M.; Malakhov, A.; Mitrofanov, I.; Mokrousov, M.; Sanin, A.; Tretiyakov, V.; et al. BepiColombo - Mission Overview and Science Goals. *Space Science Review*, submitted for publication. (Q1)
- 1.2 Djachkova M. V., Mitrofanov I. G., Nikiforov S. Y., Lisov D. I., Litvak M. L., Sanin A. B. Gale crater on Mars: Testing correspondence between deposits of hydrated minerals and water content in the shallow subsurface. *Advances in Astronomy*, submitted for publication. (Q2)
- 1.3 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*, Volume 125, Issue 3, March 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JE006180>(Q1)
- 1.4 Glaser P., Sanin A., Williams J.-P., Mitrofanov I., Oberst J. Temperatures near the lunar poles and their correlation with hydrogen predicted by LEND. *Journal of Geophysical Research: Planets*, submitted for publication. (Q1)

- 1.5 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*, Volume 125, Issue 5, May 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JE006264>(Q1)
- 1.6 Litvak M.L., Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Bakhtin B., Jun I., Martinez-Sierra L.M., Nosov A.V., Perkhov A.S. Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations, *Planetary and Space Science*, Volume 184, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104866>(Q2)
- 1.7 Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Bakhtin B., Golovin D.V., Zeitlin C. Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars. *Life Sciences in Space Research*, submitted for publication (частично выполнена при поддержке РФФИ). (Q1)
- 1.8 Litvak M.L., Barmakov Y.N., Belichenko S.G., Bogolubov E.P., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Nosov A.V., Perkhov A.S., 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 in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 963, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163725>(Q1)
- 1.9 Mitrofanov, I. G.; Kozyrev A.S., Lisov D. I., Litvak, M. L.; Golovin, D. V.; Malakhov, A.V., Mokrousov, M. I.; Benkhoff J., Owens A., Schulz R., Quarati F. Mercury Gamma-ray and Neutron Spectrometer MGNS for Planetary Orbiter of BepiColombo mission: updates of design and the first measurements in space. *Space Science Review*, submitted for publication. (Q1)
- 1.10 Nikiforov, S. Y.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L.; Lisov, D. I.; Djachkova, M. V.; Jun, I.; Tate, C. G.; Sanin, A. B. Assessment of water content in martian subsurface along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument, *Icarus*, Volume 346, 2020, 113818, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.11381>(Q1)
- 1.11 Rothery, D. A.; Massironi, M.; ...Kozyrev, A.; Litvak, M.; Malakhov, A.; Mitrofanov, I.; Mokrousov, M.; Sanin, A.; Tretiyakov, V.; et al. Rationale for BepiColombo Studies of Mercury's Surface and Composition. *Space Science Reviews*, Volume 216, Issue 4, 66 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00694-7> (Q1)
- 1.12 Semkova, J.; Koleva, R.; Krastev, K.; Benghin, V.; Dachev, T.; Matviichuk, Y.; Tomov, B.; Maltchev, S.; Dimitrov, P.; Bankov, N.; Mitrofanov, I.; Malakhov, A.; Golovin, D.; Mokrousov, M.; Sanin, A.; Litvak, M.; Zelenyi, L.; Shurshakov, V.; Drobyshev, S. Results

from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018 - December 2019, *Icarus*, accepted for publication. (Q1)

- 1.13 Svinkin D., Frederiks D., ... Mitrofanov, I.; Litvak, M.; Sanin A., Kozyrev, A.; Golovin, D.; et al. A bright gamma-ray flare interpreted as a giant magnetar flare in NGC 253, *Nature*, submitted for publication. (Q1)

2 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

- 2.1 Litvak, M. L.; Golovin, D. V.; Djachkova, M. V.; Kalashnikov, D. V.; Kozyrev, A. S.; Mitrofanov, I. G.; Mokrousov, M. I.; Sanin, A. B.; Tret'yakov, V. I. Gamma and Neutron Spectrometers Designed for Installation Onboard the Lunar Rover. *Solar System Research*, 2020, Volume 54, Issue 4, p. 275–287 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0038094620040073>(Q3)
- 2.2 Litvak, M. L.; Nosov, A. V.; Kozlova, T. O.; Mikhal'skii, V. I.; Perkhov, A. S.; Tret'yakov, V. I. Deep-Hole Soil-Sampling Tools for Future Russian Lunar Polar Missions. *Solar System Research*, 2020, Volume 54, Issue 3, p.203-222. <https://doi.org/10.1134/S0038094620030089>(Q3)
- 2.3 Дьячкова М. В., Митрофанов И. Г. Санин А. Б., Литвак М. Л., Третьяков В.И. Предварительные результаты выбора районов-кандидатов в места посадки космического аппарата «Луна-27». *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, направлена в редакцию. (Q3)
- 2.4 Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Пеков А., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Третьяков В. И., Дачев Ц. П., Семкова Й. В. Долгопериодические вариации нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон». *Космические исследования*, направлена в редакцию. (Q3)
- 2.5 Малахов А. В., Митрофанов И. Г., М. Л. Литвак, А. С. Санин, Д. В. Головин, М. В. Дьячкова, С. Н. Никифоров, А. А. Аникин, Д. И. Лисов, Н. В. Лукьянов, М. И. Мокроусов, Швецов В. Н., Тимошенко Г. Н. Физические калибровки нейтронного телескопа «ФРЕНД», установленного на борту марсианского спутника «ТГО». *Космические исследования*, направлена в редакцию. (Q3)

Статьи в научно-популярных журналах:

- 2.6 Третьяков В.И., Митрофанов И. Г., Пеков А.Н. Миссия «Луна-Грунт». Земля и Вселенная, направлена в редакцию. (-)

3 Публикации в сборниках и материалах конференций

3.1 Литвак М.Л. Освоение космического пространства: цели и задачи. Всероссийская конференция «Большие вызовы и развитие фундаментальной науки в современной России». Тезисы докладов. Российская академия наук, М., 2019, с. 41. https://prof-ras.ru/attachments/article/7/tezisy_small2_final.pdf

3.2 А. В. Носов, М. Л. Литвак Предложения по облику, цели, задаче и возможным сценариям работы лунохода в составе посадочной миссии на Луну. XVII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 30 сентября–2 октября 2020 г. Под ред. А.М. Садовского М., 2020, С. 101-108. DOI: 10.21046/KMU-2020-101-108. http://iki.cosmos.ru/books/2020mol_uch.pdf

4 Статьи, выполненные при поддержке РНФ и РФФИ

4.1 Dachev T., Semkova J., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Koleva1 R., Jordanova M., Bankov N., Litvak M., Mitrofanov I., Golovin D., Kozyrev A., Malakhov A., Mokrousov M., Sanin A., Tretyakov V., Fedosov F., Ploc O., Shurshakov V., Benghin V. A Comparison of the Neutron Dose Measurements Completed by the Bulgarian and Russian Instruments Outside the Zvezda Module of the ISS. Proceedings of the Twelfth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” September, 2020, DOI: 10.31401/WS.2020.proc (при поддержке РФФИ)

4.2 Dachev T., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Semkova J., Jordanova M., Bankov N., Ploc O., Litvak M., Tretyakov V., Shurshakov V., Benghin V. Registration of Neutrons with a Single Detector Liulin Type Spectrometer. Proceedings of the Twelfth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” September, 2020, DOI: 10.31401/WS.2020.proc (при поддержке РФФИ)

- 4.3 Malakhov, A.V., Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L. et al. Ice Permafrost “Oases” Close to Martian Equator: Planet Neutron Mapping Based on Data of FREND Instrument Onboard TGO Orbiter of Russian-European ExoMars Mission. *Astron. Lett.* 46, 407–421 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063773720060079> (при поддержке РФФ)
- 4.4 Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L., Golovin, D.V. et al. Gamma Spectrometry of Composite Models of Planetary Matter on the JINR Accelerator Proton Beam with Tagged Protons. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 17, 348–357 (2020) <https://doi.org/10.1134/S1547477120030115> (при поддержке РФФ)
- 4.5 Аникин А. А., Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Санин А. Б., Никифоров С. Ю., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Тимошенко Г. Н., Швецов В. Н. Перспективный эксперимент с гамма-спектрометром на борту мобильного космического аппарата для изучения элементного состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой XVII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 30 сентября–2 октября 2020 г. Под ред. А.М. Садовского М., 2020, С. 5-13. DOI: 10.21046/KMU-2020-5-13. http://iki.cosmos.ru/books/2020mol_uch.pdf (при поддержке РФФ)

5 Доклады, тезисы, циркуляры

- 5.1 Djachkova, M., Mitrofanov, I., Nikiforov, S., Litvak, M., Lisov, D., and Sanin, A.: Comparison between DAN/MSL subsurface water measurements and CRISM/MRO hydrated minerals abundance in Gale crater, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-1048, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-1048>
- 5.2 Djachkova, M., Mitrofanov, I., Litvak, M., Lisov, D., Nikiforov, S., and Sanin, A.: 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, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9993, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9993>
- 5.3 Gläser, P., Sanin, A., Williams, J.-P., Mitrofanov, I., and Oberst, J.: Comparison of LEND's hydrogen signal with modeled (sub-)surface temperatures in the lunar polar regions, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-530, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-530>

- 5.4 Golovin, D., Nikiforov, S., Mitrofanov, I., Kozyrev, A., Litvak, M., Mokrousov, M., and Sanin, A.: Investigation of martian soil properties by complementary instruments ADRON-EM and RM instruments of ExoMars 2022 mission, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-1032, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-1032>
- 5.5 Golovin, D., Mitrofanov, I., Anikin, A., Djachkova, M., Lisov, D., Litvak, M., Lukyanov, N., Malakhov, A., Nikiforov, S., and Sanin, A.: Variations of polar CO₂ caps during the first Martian year of FRENDE onboard TGO, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9303, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9303>
- 5.6 Kozyrev, A., Litvak, M., Sanin, A., Malakhov, A., Mitrofanov, I., Owens, A., Schulz, R., and Quarati, F.: MGNS experiment science investigations during BepiColombo cruise, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-389, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-389>
- 5.7 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Holdge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E. Ferrigno, C.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200826B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28303 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.28303....1H/abstract>
- 5.8 Hurley, K.; IPN; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E. Ferrigno, C.; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 201207. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 29020A <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/2020GCN.29020....1H/abstract>
- 5.9 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R., GRS-Odyssey GRB Team. IPN triangulation of GRB 200907A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28409 <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/2020GCN.28409....1H/abstract>

- 5.10 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; GRS-Odyssey GRB Team. IPN triangulation of GRB 200903E GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28383 <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/2020GCN.28383....1H/abstract>
- 5.11 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200826A (short/bright). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28291 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.28291....1H/abstract>
- 5.12 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; GRS-Odyssey GRB Team. IPN triangulation of GRB 200815A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28274 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.28274....1H/abstract>
- 5.13 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200716A GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28121 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.28121....1H/abstract>
- 5.14 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200605A (short). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27900 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27900....1H/abstract>

- 5.15 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of a bright burst from SGR 1935+2154 on 2020-05-10 at 06:12 UT GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27714 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27714....1H/abstract>
- 5.16 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200422A (long/very bright). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27626 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27626....1H/abstract>
- 5.17 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN Triangulation of a bright burst from SGR 1935+2154. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27625 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27625....1H/abstract>
- 5.18 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Ridnaia, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E. Ferrigno, C.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200412A. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27560 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27560....1H/abstract>
- 5.19 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of 200325A (short) GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27449 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27449....1H/abstract>

- 5.20 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E. Ferrigno, C.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200313A GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27385 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27385....1H/abstract>
- 5.21 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, C.; Bozzo, E. Ferrigno, C.; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Ipn Collaboration; Hend-Odyssey Grb Team; Konus-Wind Team; Fermi Gbm Team; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team, Swift-Bat Team; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 200130B. GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 26949 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.26949....1H/abstract>
- 5.22 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Ridnaia, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, C.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Ipn Collaboration; Hend-Odyssey Grb Team; Konus-Wind Team; Fermi Gbm Team; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Swift-Bat Team; Grs-Odyssey Grb Team. IPN Triangulation of GRB 200120A GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 26856 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.26856....1H/abstract>
- 5.23 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Ridnaia, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, C.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Ipn Collaboration; Hend-Odyssey Grb Team; Konus-Wind Team; Fermi Gbm Team; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Swift-Bat Team; Grs-Odyssey Grb Team. IPN Triangulation of GRB 200120A GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 26856 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.26856....1H/abstract>
- 5.24 Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Ridnaia, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.;

- Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E.; Ferrigno, C. Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, C.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Ipn Collaboration; Hend-Odyssey Grb Team; Konus-Wind Team; Fermi Gbm Team; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Swift-Bat Team; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 200111A GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 26778 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.26778....1H/abstract>
- 5.25 Kozyrev, A., Litvak, M., Malakhov, A., Mitrofanov, I., Mokrousov, M., Sanin, A., Tretiyakov, V., Owens, A., Schulz, R., and Quarati, F.: Spectroscopy of gamma-rays of Earth, Venus and Mercury: MGNS instrument onboard BepiColombo mission, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9657, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9657>
- 5.26 Lisov, D., Djachkova, M., Gellert, R., Litvak, M., Mitrofanov, I., and Nikiforov, S.: Chlorine in Gale Crater, Mars: comparing data from DAN and APXS instruments onboard the Curiosity rover, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-10926, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10926>
- 5.27 Lisov, D. I.; Djachkova, M. V.; Gellert, R.; Litvak, M. L.; Mitrofanov, I. G.; Nikiforov, S. Yu. The DAN data for neutron absorption in the subsurface does not agree with APXS data on the surface concentrations of neutron absorbing elements (Cl, Fe). 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1307 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.1307L/abstract>
- 5.28 Litvak, M., Sanin, A., Mitrofanov, I., Bakhtin, B., Jun I., Martinez-Sierra L.M., Nosov A.V., Perkhov A.S., Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations, Planetary and Space Science, Volume 184, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104866>.
- 5.29 Litvak, M., Golovin, D., Kozyrev, A., Mitrofanov, I., and Sanin, A.: Long-term monitoring of neutron component of radiation background onboard International Space Station., EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9763, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9763>
- 5.30 Litvak, M., Mitrofanov, I., Sanin, A., Bakhtin, B., and Zeitlin, C.: Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-972, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-972>

- 5.31 Litvak, M. L.; Barmakov, Y. N.; Belichenko, S. G.; Bogolubov, E. P.; Kozyrev, A. S.; Mitrofanov, I. G.; Nosov, A. V.; Perkhov, A. S.; 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 in Planetary Missions by Active Gamma-Ray Spectroscopy 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1295 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.1295L/abstract>
- 5.32 Malakhov, A., Mitrofanov, I., Litvak, M., Sanin, A., Golovin, D., Anikin, A., Djachkova, M., Lisov, D., Lukyanov, N., and Nikiforov, S.: Local water-rich areas on Mars found by the FREND neutron telescope onboard ExoMars TGO, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-961, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-961>
- 5.33 Malakhov, A., Mitrofanov, I., Anikin, A., Golovin, D., Djachkova, M., Lisov, D., Litvak, M., Lukyanov, N., Nikiforov, S., and Sanin, A.: Mapping of shallow subsurface water local variations at Mars' moderate latitudes with FREND neutron telescope onboard ExoMars TGO, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8725, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8725>
- 5.34 Malakhov, A. V.; Mitrofanov, I. G.; Anikin, A. A.; Golovin, D. V.; Djachkova, M. V.; Lisov, D. I.; Litvak, M. L.; Lukyanov, N. V.; Mokrousov, M. I.; Nikiforov, S. N.; Sanin, A. B. Regional Water Variations on Mars: New Data from TGO's FREND 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1271 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.1271M/abstract>
- 5.35 Martinez-Sierra, L. M.; Jun, I.; Ehresmann, B.; Hassler, D.; Martín-Torres, J.; Mitrofanov, I. G.; Moersch, J. E.; Tate, C.; Zeitlin, C.; Zorzano, M. P. Galactic Cosmic Ray Induced Neutron Environment on Mars. 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.2538 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.2538M/abstract>
- 5.36 Mitrofanov, I., Zelenyi, L., and Tretyakov, V.: Luna-28 mission for polar samples return, as the key element of the initial stage of Russian Lunar Program , EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8739, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8739>
- 5.37 Mitrofanov, I. G.; Tret'yakov, V. I.; Zelenyi, L. M. Lunar Polar Mission LUNA-25 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The

Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1281
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.1281M/abstract>

- 5.38 Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Nikiforov S.Y., Golovin D.V., Djachkova M.V., Anikin A.A., Karpushkina N.E., Lisov D.I., Litvak M.L., Mokrousov M.I., Dubasov P.A., Zontikov A.O., Starr R.D., Cosmic gamma-ray spectrometer with tagged charged particles of Galactic Cosmic Rays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 953, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163148>
- 5.39 Mokrousov, M., Mitrofanov, I., Kozyrev, A., Litvak, M., Malakhov, A., Sanin, A., Tretyakov, V., Golovin, D., and Anikin, A.: Instrumentation for Nuclear Planetology: Present and Future, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8870, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8870>
- 5.40 Nikiforov, S., Mitrofanov, I., Litvak, M., Djachkova, M., Golovin, D., Lisov, D., Malakhov, A., Mokrousov, M., Sanin, A., and Tretyakov, V.: Experience of DAN investigation of subsurface water on Mars onboard the rover Curiosity for the future ADRON-RM experiment on the ExoMars rover, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-1053, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-1053>
- 5.41 Nikiforov, S., Mitrofanov, I., Litvak, M., Djachkova, M., Golovin, D., Lisov, D., Malakhov, A., Mokrousov, M., Sanin, A., and Tretyakov, V.: Passive neutron sensing of martian subsurface from onboard rovers: results from MSL/DAN and expectations from ExoMars/Adron-RM, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-10653, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10653>
- 5.42 Nikiforov, S. Y.; Mitrofanov, I. G.; Litvak, M. L.; Djachkova, M. V.; Lisov, D. I.; Sanin, A. B. Assessment of Water Distribution in Vera Rubin Ridge and Glen Torridon Based on Measurements of the DAN Instrument, NASA/MSL 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1294
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.1294N/abstract>
- 5.43 Sanin, A., Mitrofanov, I., Bakhtin, B., and Litvak, M.: Updated Mapping of the Hydrogen Distribution in the Lunar Polar Regions, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-8685, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8685>
- 5.44 Sanin, A. B.; Mitrofanov, I. G.; Bakhtin, B. N.; Litvak, M. L. We updated the LEND/LRO data processing procedure and presenting a new map of the distribution of

- hydrogen in the vicinity of the south pole. 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1335 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020LPI....51.1335S/abstract>
- 5.45 Svedhem, H., Korablev, O., Mitrofanov, I., Rodionov, D., Thomas, N., Vandaele, A. C., Vago, J. L., Forget, F., and Wilson, C.: The ExoMars Trace Gas Orbiter - First Martian Year in Orbit, Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-802, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-802>
- 5.46 Svedhem, H., Korablev, O., Mitrofanov, I., Rodionov, D., Thomas, N., Vandaele, A., Vago, J. L., Forget, F., and Wilson, C.: The ExoMars Trace Gas Orbiter – First Martian Year in Orbit, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-22228, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-22228>
- 5.47 Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Cline, T.; Konus-Wind Team; Hurley, K.; Ipn; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D. V.; Kozyrev, A. S.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Hend-Odyssey Grb Team; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; Bozzo, E. Ferrigno, C.; INTEGRAL SPI-ACS Grb Team; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Swift-Bat Team; Ursi, A.; Parmiggiani, N.; Verrechhia, F.; Bulgarelli, A.; Trois, A.; Marisaldi, M.; Pittori, C.; Tavani, M. Evangelista, Y.; Donnarumma, I.; Cardillo, M.; Piano, G.; Minervini, G.; Argan, A.; Lucarelli, F.; Zoli, A.; Fioretti, V.; Fuschino, F.; Pilia, M.; Longo, F.; Giuliani, A.; Agile Team; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R.; Grs-Odyssey Grb Team. IPN triangulation of GRB 201103B (consistent with ZTF20acozyr/AT2020yxz). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 28844 <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/2020GCN.28844....1S/abstract>
- 5.48 Svinkin, D.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Ridnaia, A.; Cline, T.; Konus-Wind Team; Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S. Wilson-Hodge, C.; von Kienlin, A.; Zhang, X.; Rau, A.; Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C.; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. Improved IPN error box for GRB 200415A (consistent with the Sculptor Galaxy). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27595 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27595....1S/abstract>
- 5.49 Svinkin, D.; Hurley, K.; Frederiks, D.; Hurley, K.; Mitrofanov, I. G.; Golovin, D.; Litvak, M. L.; Sanin, A. B.; Kozlova, A.; Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Svinkin, D.; Cline, T.; Goldstein, A.; Briggs, M. S.; Wilson-Hodge, C.; von Kienlin,

A.; Zhang, X.; Rau, A. Savchenko, V.; E. Bozzo, E.; Ferrigno, C.; Barthelmy, S.; Cummings, J.; Krimm, H.; Palmer, D.; Boynton, W.; Fellows, C.; Harshman, K.; Enos, H.; Starr, R. IPN triangulation of GRB 200415A (possible Magnetar Giant Flare in Sculptor Galaxy?). GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 27585
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020GCN.27585....1S/abstract>

5.50 Tretyakov, V., Mitrofanov, I., and Zeleniy, L.: Russian Lunar Landers Luna-25 and Luna-27: goals of the missions and scientific investigations at Moon Polar Regions, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-6753,
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6753>