

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
Номер государственной регистрации АААА-А18-118012290370-6

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института космических исследований
Российской академии наук
член-корреспондент РАН



А.А. Петрукович
2018 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

Тема ОСВОЕНИЕ

0028-2018-0003

Научный руководитель
д.ф.-м.н.

И.Г. Митрофанов
« » 2018 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы



Митрофанов И.Г.
зав. отд., д.ф.-м.н.

Ответственные исполнители
разделов темы:

Раздел 1



Митрофанов И.Г.
зав. отд., д.ф.-м.н.

Раздел 2



Санин А.Б.
с.н.с., к.ф.-м.н.

Раздел 3



Литвак М.Л.
зав. лаб., д.ф.-м.н.

Раздел 4



Козырев А.С.
с.н.с., к.ф.-м.н.

Раздел 5



Мокроусов М.И.
зав. лаб., к.ф.-м.н.

РЕФЕРАТ

Отчет – 46 стр., 29 рис., 28 источников.

ЯДЕРНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ, ЛУНА, МАРС, ВЕНЕРА, МЕРКУРИЙ, КОСМИЧЕСКОЕ ГАММА-И НЕЙТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РАДИАЦИОННЫЙ ФОН, ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ПРОТОННОЕ СОБЫТИЕ, РЕГОЛИТ, ВОДА, ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ПИЛОТИРУЕМАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ, ОСВОЕНИЕ ЛУНЫ, РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Важнейшие результаты за 2018 год. Первые результаты, полученные по данным российского прибора ФРЕНД на борту КА ЕКА Trace Gas Orbiter: Картографирование воды/водяного льда в приповерхностном слое марсианского грунта с высоким пространственным распределением и дозиметрия на перелете к Марсу.....	8
Раздел 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	10
Раздел 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	12
2.1 Распространённость воды/водяного льда в солнечной системе. Карта распределения подповерхностной воды в грунте полярных областей Луны по данным российского прибора ЛЕНД на борту КА НАСА LRO	12
2.2 Изучение возможной корреляции между возрастом кратеров и концентрацией водорода в лунном реголите с использованием данных измерений потоков нейтронов, полученных в эксперименте ЛЕНД	13
2.3 Выделение фоновой и лунной компонент нейтронного сигнала в данных эксперимента ЛЕНД и определение средней концентрации водорода в приповерхностном реголите вблизи полюсов Луны	16
2.4 Наблюдение и моделирование Галактических Космических Лучей в приложениях ядерной планетологии	17
2.5 Полярные области на Луне как места для будущих форпостов.....	19
Раздел 3. Изучение элементного состава вещества Марса и его спутников, оценка содержания в их грунте воды, исследование сезонных вариаций атмосферы, выяснение условий обеспечения ресурсами марсианских пилотируемых экспедиций.....	22
3.1 Первые результаты, полученные по данным российского прибора ФРЕНД на борту КА ЕКА Trace Gas Orbiter: Картографирование воды/водяного льда в приповерхностном слое марсианского грунта с высоким пространственным распределением	22
3.2 Распространённость воды/водяного льда в солнечной системе. Карта распределения подповерхностной воды в марсианском грунте на средних широтах по данным российского прибора ХЕНД на борту КА НАСА Марс Одиссей	23
3.3 Определение содержания воды и изучение геохимии подповерхностного слоя грунта вдоль трассы движения марсохода Кьюриосити в кратере Гейл по данным российского прибора ДАН	24
3.4 Методика определения элементного состава вещества Марса с прицелом на выяснение обеспеченности различными природными ресурсами для будущих марсианских экспедиций... ..	26
3.5 Исследование сезонных и суточных вариаций	27
Раздел 4. Изучения элементного состава и летучих соединений в веществе Меркурия, Венеры и других небесных тел солнечной системы.....	30

Раздел 5. Разработка перспективных научных приборов на основе достижений современной ядерной физики до уровня технологической готовности к космическому применению	34
5.1. Создание прототипа прибора, работающего по методу «меченых заряженных частиц»	34
5.2. Создание перспективного нейтронного детектора с антисовпадательной защитой.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	43

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 астрономии и исследований космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач.	16
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 0028-2018-0003 ОСВОЕНИЕ

Тема 0028-2018-0003 ОСВОЕНИЕ является частью государственного задания ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ.

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2018 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 2018 год. Первые результаты, полученные по данным российского прибора ФРЕНД на борту КА ЕКА Trace Gas Orbiter: Картографирование воды/водяного льда в приповерхностном слое марсианского грунта с высоким пространственным распределением и дозиметрия на перелете к Марсу.

И.Г. Митрофанов, А.В. Малахов, Д.В. Головин, А.Б., М.Л. Литвак

Описание: в начале 2018 года КА ЕКА Trace Gas Orbiter (TGO) приступил к основной программе научных измерений на орбите вокруг Марса. В состав научной аппаратуры КА TGO входит российский нейтронный спектрометр ФРЕНД позволяющий измерять нейтронное альbedo Марса с ранее недоступным высоким пространственным разрешением (до 40 км) и, тем самым, оценивать содержание подповерхностной воды/водяного льда, сопоставляя его с геологическими особенностями поверхности. Первые 120 дней наблюдений позволили построить глобальную карту нейтронного потока от Марса и отождествить на умеренных широтах локальные районы с возможным наличием реликтового водяного льда, расположение которых хорошо коррелирует с геологическим контекстом местности. Нейтронный спектрометр ФРЕНД также имеет в своём составе болгарский дозиметр Люлин-МО. Измерения радиационной обстановки за время перелета КА TGO от Земли к Марсу показали, что в течение перелета к Марсу и обратно космонавты будущей марсианской экспедиции могут получить дозу до примерно 60% от полной величины, допустимой для космонавта за всю его жизнь.

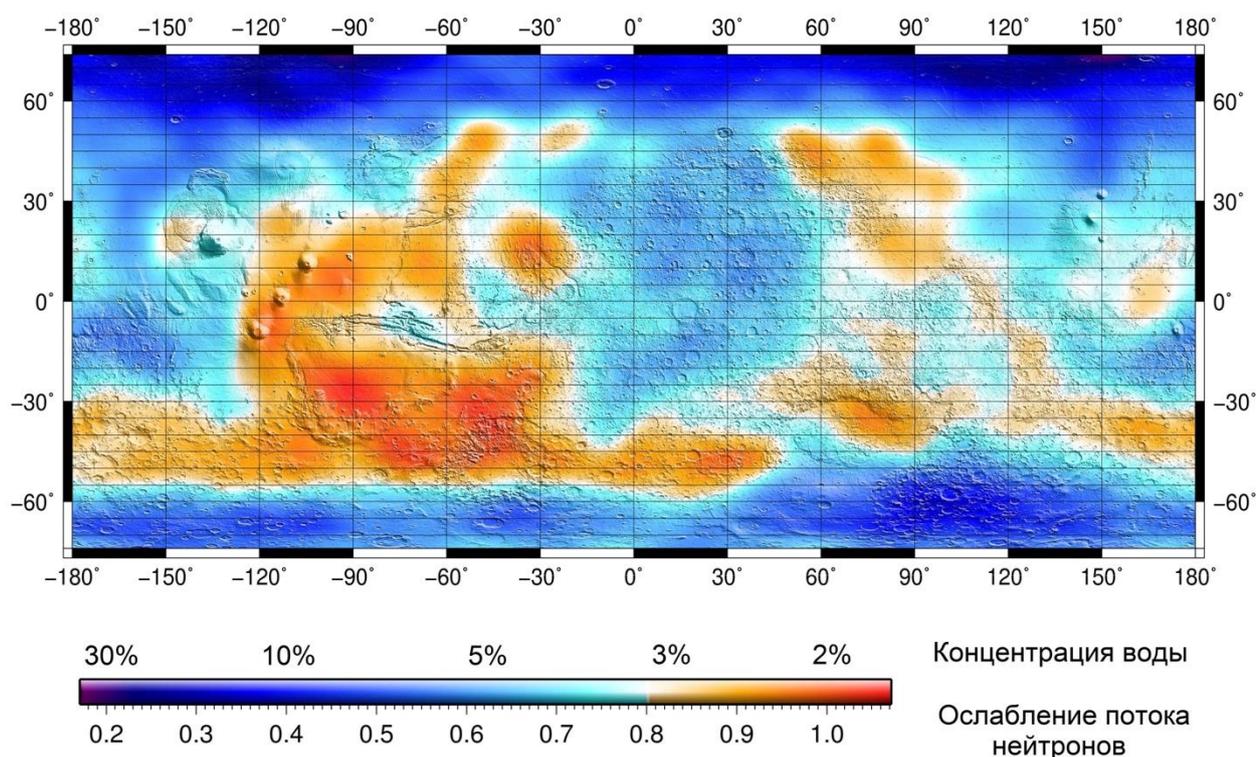


Рис. 1. Карта распределения воды в приповерхностном слое марсианского грунта, полученная по данным прибора ФРЕНД.

Публикации:

1) Mitrofanov I.G. et al., 2018, Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRIEND) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter// Space Science Reviews, Volume 214, Issue 5, article id. 86, 26;

2) Mitrofanov I.G. et al., Surface variations of ground water on Mars: the first results of FRIEND neutron telescope onboard the ESA's Trace Gas Orbiter, статья готовится к публикации;

3) Semkova J. et al., 2018, Charged particle radiation measurements with Lulin-MO dosimeter of FRIEND instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and high elliptic Mars orbit, Icarus, Volume 303, pages 53-66.

Раздел 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 2018 году исследования космического радиационного фона проводились в рамках российско-европейского проекта «Exomars». Эта миссия проводится в два этапа. На первом этапе 14 марта 2016 года к Марсу был запущен аппарат ТГО (Trace Gas Orbiter), на борту которого был установлен нейтронный телескоп ФРЕНД. В состав этого прибора включен дозиметр Liulin MO, который был изготовлен в Институте космических исследований и технологий Болгарской академии наук (рис. 1-1).

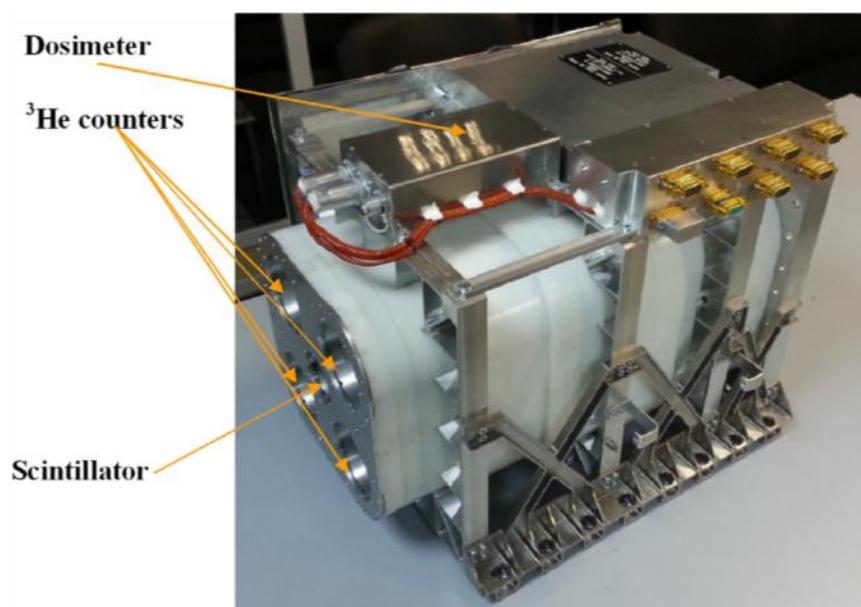


Рис. 1-1. Внешний вид нейтронного телескопа ФРЕНД с дозиметром Liulin-MO

Дозиметр был включен практически сразу после запуска и продолжает работать в настоящее время. На основе полученных данных были проведены оценки потоков космических лучей, спектры энерговыведения (LET) и были выполнены оценки дозы радиации в межпланетном космическом пространстве и на околомарсианской орбите.

Для периода межпланетного перелета с 22 апреля до 15 сентября 2016 г. средний темп возрастания дозы в Si составил около 370 – 390 $\mu\text{Gy/d}$. Для этого же периода времени оценка скорости нарастания эквивалентной дозы в межпланетном пространстве составила около 2 $\mu\text{Sv/d}$. За 10.5

месяцев наблюдений величины измеренных скоростей нарастания доз увеличились на 10 – 15%. Это произошло вследствие аналогичного нарастания потока галактических солнечных лучей (рис. 1-2).

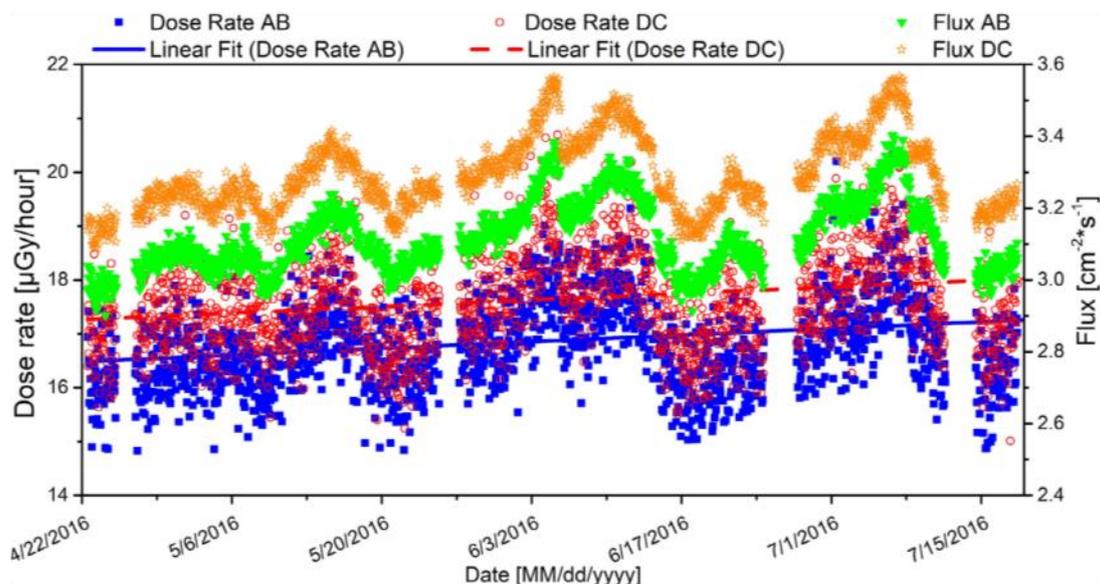


Рис. 1-2. Профили переменности потока космических лучей и дозы радиации в межпланетном пространстве, измеренные дозиметром Liolin-МО период времени с апреля 2016 г. по июль 2017 г.

Для периода межпланетного перелета с 22 апреля до 15 сентября 2016 г. средний темп возрастания дозы в Si составил около 370 – 390 $\mu\text{Gy/d}$. Для этого же периода времени оценка скорости нарастания эквивалентной дозы в межпланетном пространстве составила около 2 $\mu\text{Sv/d}$. За 10.5 месяцев наблюдений величины измеренных скоростей нарастания доз увеличились на 10 – 15%. Это произошло вследствие аналогичного нарастания потока галактических солнечных лучей.

Полученные результаты являются важными для планирования и разработки средств осуществления пилотируемых марсианских экспедиций. За время полного перелета Земля-Марс-Земля около 12 месяцев полная накопленная доза может составить около 60% от полной величины дозы допустимой для всей карьеры (при условии толщины пассивной защиты около 10 г/см²).

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 13).

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

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

2.1 Распространённость воды/водяного льда в солнечной системе. Карта распределения подповерхностной воды в грунте полярных областей Луны по данным российского прибора ЛЕНД на борту КА НАСА LRO

В 2018 году была проведена научно-исследовательская работа, посвященная обобщению результатов космических исследований, связанных с поиском воды и водяного льда на планетах (и их спутниках) и малых телах Солнечной системы. Одним из направлений этой работы были исследования, связанные с обсуждением различных гипотез происхождения и распространённости водяного льда на Луне.

Одним из важнейших результатов исследований Луны является созданные карты распределения водорода/воды в верхнем приповерхностном слое реголита полярных областей (выше $\pm 80^\circ$) по данным, полученным с помощью российского нейтронного телескопа ЛЕНД, установленного на борту КА Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Основной особенностью инструмента ЛЕНД является то, что он содержит коллимирующий модуль, обеспечивающий измерение потоков эпитепловых нейтронов с пространственным разрешением до 10 км с высоты орбиты 50 км. Такое высокое пространственное разрешение является уникальным для орбитальных нейтронных детекторов, что позволяет проводить сопоставление результатов измерений с крупными геологическими структурами, определять концентрацию водорода/воды в верхнем слое реголита и проверять различные гипотезы об образовании и эволюции лунных экзосферы и, возможно даже, гидросферы. К основным достоинствам полученной карты относятся высокая статистическая обеспеченность и высокое пространственное разрешение отображения районов с повышенным содержанием водяного льда в реголите. Эксперимент ЛЕНД открыл удивительную картину, показав, что не во всех вечно затененных кратерах есть водяной лед, и, наоборот, освещённые окрестности некоторых таких кратеров могут демонстрировать повышенное содержание водяного льда. Самая современная карта распределения подповерхностного водяного льда, полученная по данным прибора ЛЕНД, представлена на Рис. 2-1. Она показывает, что такие крупные кратеры, как Кабео, Шумейкер, Фаустини и Хаурт, и их окрестности могут содержать до 0.5% воды, если для расчета использовать однородное распределение водяного льда по глубине.

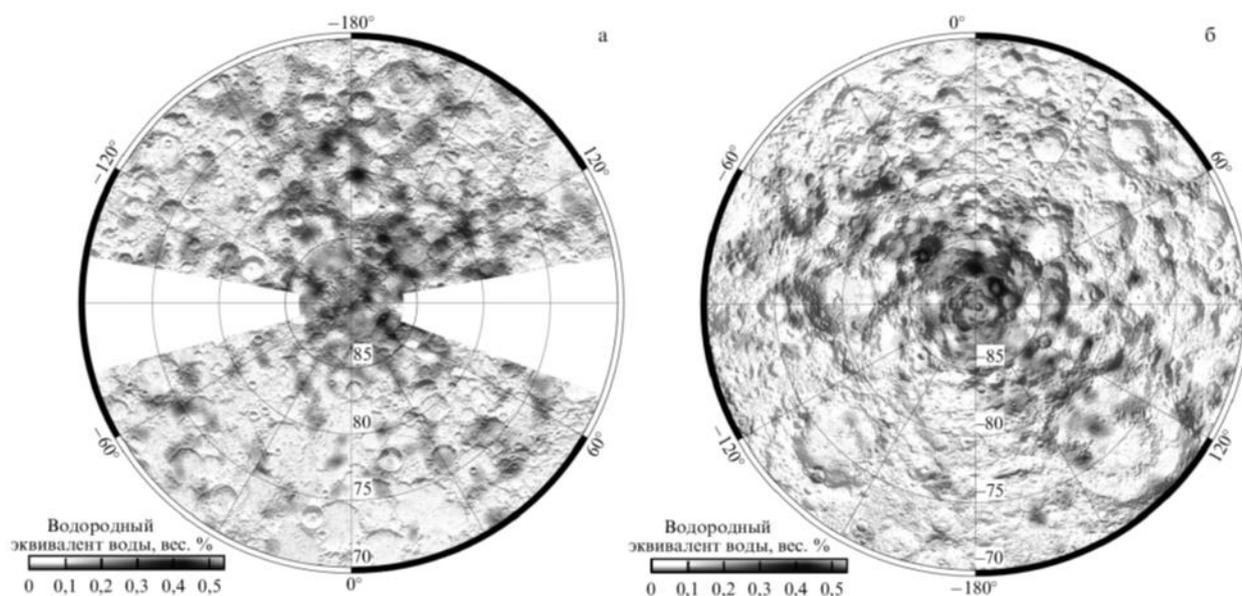


Рис. 2-1. Распределение воды/водяного льда (при предположении однородного распределения по глубине) в северной (а) и южной (б) полярных областях Луны по данным российского эксперимента ЛЕНД на борту КА НАСА LRO.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 16) и докладе научному сообществу (см. список источников, п. 40).

2.2 Изучение возможной корреляции между возрастом кратеров и концентрацией водорода в лунном реголите с использованием данных измерений потоков нейтронов, полученных в эксперименте ЛЕНД

Недавние наблюдения, выполненные с помощью нескольких приборов на лунных орбитальных космических аппаратах, показали признаки присутствия гидратированных минералов в реголите на средних широтах. Так в экспериментах Moon Mineralogy Mapper (M^3) на индийском космическом аппарате (КА) Chandrayaan-1, спектрометр Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) на КА Cassini и High Resolution Instrument – Infrared (HRIIR) на КА Deep Impact по присутствию линии поглощения на длине волны 3.0 мкм выявлено наличие OH/H_2O на средних широтах. Хотя эти наблюдения ясно показывают, что Луна не так суха, как ранее считалось, источник этой воды по-прежнему является предметом обсуждений. Падения комет и астероидов, безусловно, является одним из источников OH/H_2O на поверхность Луны. H_2O и OH также могут быть созданы протонами солнечного ветра, взаимодействующими с кислородсодержащими минералами на поверхности Луны. Наконец, летучие вещества из глубины Луны также могут вносить вклад в общее содержание водорода и гидратированных минералов в приповерхностном слое реголита. Параметр оптический зрелости реголита (OMAT), получен из анализа изображений, переданных с борта КА Clementine, проработавшего на окололунной орбите около двух месяцев в 1994 году.

Параметр показывает, как оптические свойства лунного реголита изменяются с его возрастом и основан на отражательной способности лунной поверхности в ближнем ИК-диапазоне – в спектральных окнах 750 нм и 950 нм. Так молодые кратеры (максимальный возраст 109 миллионов лет) характеризуются высокими значениями параметра ОМАТ вблизи вала кратера, которые резко уменьшаются с удалением от кратера. Старые кратеры (более 810 миллионов лет) практически неотличимы от окружающей поверхности (фона) и имеют очень низкие значения ОМАТ. Кратеры промежуточного возраста (максимальный возраст 810 миллионов лет) имеют, что неудивительно, промежуточные значения ОМАТ.

Используя значения параметра ОМАТ и темп счета эпитепловых нейтронов детектором SETN инструмента ЛЕНД на борту КА LRO, можно проверить имеется ли связь между возрастом кратера и концентрацией водорода в грунте внутри кратера. Основная цель эксперимента ЛЕНД (Лунный разведывательный нейтронный детектора) заключается в измерении потоков нейтронов от поверхности Луны, создаваемых взаимодействиями галактических космических лучей (ГКЛ) с лунным реголитом. Нейтроны, которые вылетают из поверхности Луны, находятся в трех широких энергетических диапазонах: тепловом (низкоэнергетическом), эпитепловом (промежуточном) и быстром (высокоэнергетическом). Энергетический спектр этих нейтронов отражает физико-химические свойства грунта поверхности планеты. Эпитепловые нейтроны могут быть использованы для определения концентрации водорода, поскольку грунт со значительным количеством водорода быстро термализует (замедляет) нейтроны, следовательно, по изменению их потока можно определить изменение концентрации водорода в грунте. В проведенном исследовании были использованы данные, полученные детектором SETN инструмента ЛЕНД для окрестностей 301 кратеров диаметром 30 – 100 км, расположенных в высокогорных районах Луны. Было выполнено сравнение темпа счета эпитепловых нейтронов детектором SETN, параметра ОМАТ и значения отражательной способности на длине волны 750 нм (см. Рис. 2-2.) для поверхности внутри каждого кратера и за его пределами в широтной полосе шириной 5° с центром в данном кратере (использовано для вычитания окружающего фона).

Измерения темпа счета эпитепловых нейтронов детектором SETN инструмента LEND показывают наличие существенной разницы между поверхностью внутри и вовне рассмотренного набора кратеров. Это различие больше для небольшого подмножества из 31 кратера, в котором преобладают очень молодые (эпохи Коперника) кратеры и выбросы реголита из них, - скорость счета нейтронов и параметр оптической зрелости поверхности имеют значительное отклонение от среднего (фоновое) значения. Более слабая корреляция между темпом счета нейтронов и оптической зрелостью найдена для полного набора участков поверхности внутри кратеров на лунных высокогорьях предполагает, что содержание водорода не может быть простой функцией от времени экспозиции поверхности и, следовательно, количества имплантированного солнечного

ветра. Другие процессы выветривания так же должны играть существенную роль. Наконец, несмотря на то, что измерения нейтронов не позволяют с высокой точностью определить эпоху образования кратеров, они, по-видимому, позволяют отделить кратеры эпохи Коперника от других старых кратеров и, следовательно, обеспечивают некоторую меру зрелости реголита. Это тем более важно, поскольку в отличие от оптического параметра ОМАТ, поток эпитепловых нейтронов формируется в толще грунта и таким образом его вариации характеризуют объемную зрелость лунного реголита.

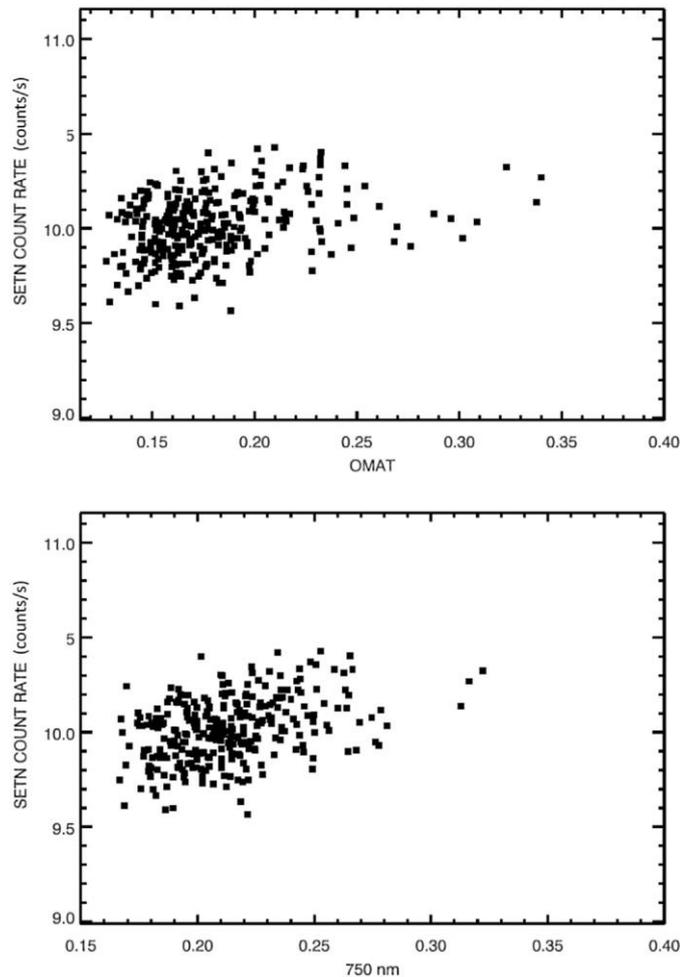


Рис. 2-2. Корреляция между темпом счета эпитепловых нейтронов с параметром ОМАТ (вверху) и отражательной способностью на длине волны 750 нм (внизу) для выбранных 301 кратеров. Коэффициенты корреляции составляют 0.29 и 0.36, соответственно.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 14).

2.3 Выделение фоновой и лунной компонент нейтронного сигнала в данных эксперимента ЛЕНД и определение средней концентрации водорода в приповерхностном реголите вблизи полюсов Луны

Измерения нейтронного потока лунным детектором нейтронов (LEND) на орбитальном аппарате Lunar Reconnaissance (LRO) позволяют количественно определять водородосодержащие летучие вещества на поверхности Луны с орбиты. Точное определение содержания водорода требует проведения различий между скоростью счета нейтронов фона и скоростью счета нейтронов лунного происхождения, несущих информацию о присутствии подповерхностного водорода. Было проведено исследование скорости счета лунных и фоновых нейтронов прибором LEND путем моделирования карт скорости счета нейтронов в трех группах детекторов прибора LEND, используя линейные комбинации карт, составленных по данным детекторов приборов LEND и нейтронного спектрометра на борту космического аппарата Lunar Prospector. Было найдено, что 30% от среднего темпа счета тепловых нейтронов детектором STN3, равного 24.926 ± 0.020 отсчет/сек, дают нейтроны лунного происхождения в диапазоне тепловых энергий ($E < 0.4$ эВ), 65% - лунные нейтроны в диапазоне эпитепловых и быстрых энергий ($E > 0.4$ эВ) и 5% составляет вклад от «фоновых» нейтронов, рожденных в элементах конструкции космического аппарата частицами космических лучей. В детекторе эпитепловых нейтронов SETN 90% от средней скорости счета, равной 10.622 ± 0.002 отсчет/сек, соответствуют лунным эпитепловым и быстрым нейтронам ($E > 0.4$ эВ), причем 3% составляет вклад от тепловых лунных нейтронов ($E < 0.4$ эВ), а фоновый сигнал составляет 7%. Фоновый сигнал, вызванный нейтронами, рожденными в элементах конструкции космического корабля, является существенным в коллимированных детекторах CSETN и составляет 57% от средней скорости счета, равной 5.082 ± 0.001 отсчет/сек. Это больше, чем 48%, оцененные по данным, полученным на этапе перелета к Луне. Эпитепловые и быстрые нейтроны от Луны составляют 43% регистрируемых этими детекторами нейтронов, включая коллимированные нейтроны, а также нейтроны, которые проникают через стенку коллиматора и достигают детектора. Оценено, что по крайней мере 17% регистрируемых детекторами CSETN нейтронов (0.37 отсчет/сек) составляют коллимированные эпитепловые нейтроны лунного происхождения, при этом верхний предел оценивается в $54 \pm 11\%$ или 1.2 ± 0.2 отсчет/сек. Отношение темпов счета эпитепловых и быстрых нейтронов над полярными и экваториальными районами указывает на то, что средняя концентрация водорода в реголите полярных областей выше $\pm 80^\circ$ широты составляет ~ 105 частей на миллион по массе или 0.095 ± 0.01 % водного эквивалента водорода. Выше 88° северной и южной широты концентрация увеличивается до ~ 140 частей на миллион по массе или 0.13 ± 0.02 % водного эквивалента водорода. Похожее поведение ослабления нейтронного потока на обоих полюсах предполагает, что концентрация водорода монотонно увеличивается ближе к полюсу и не связана тесно с какой-либо особенностью, такой как, например, кратер Шеклтона на

южном полюсе Луны, который не имеет аналога на северном полюсе. Поток эпитепловых нейтронов уменьшается с увеличением широты за пределами полярных областей, что согласуется с гидратацией поверхности, которая увеличивается с широтой, если эта гидратация распространяется на ~ 13–40 см в поверхности.

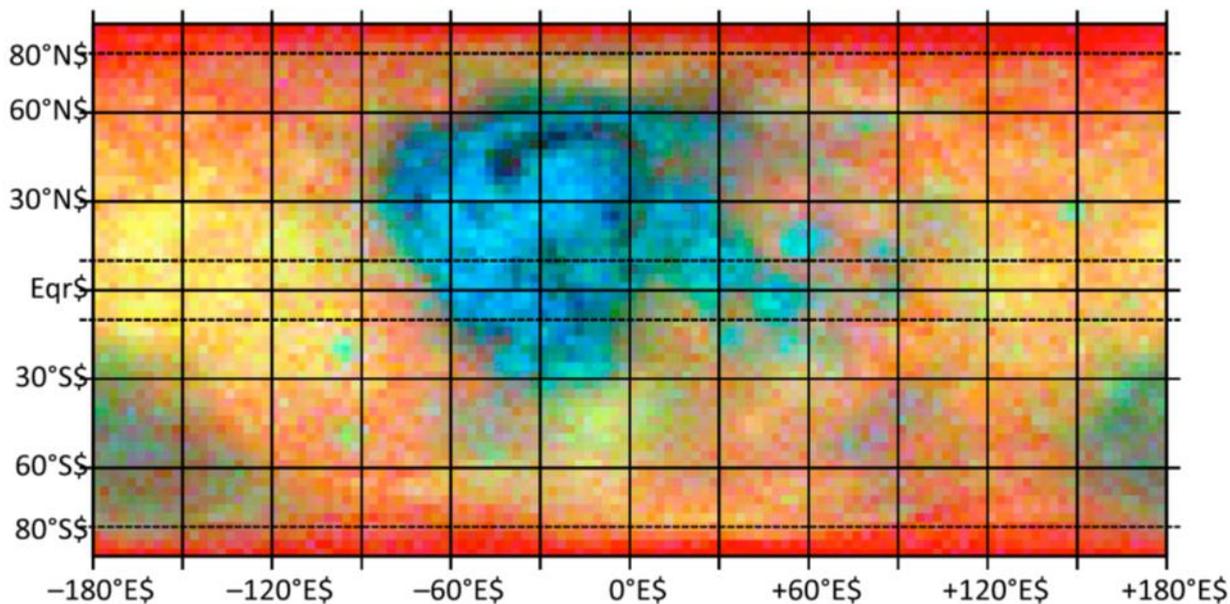


Рис. 2-3. Композитная карта потоков тепловых (красный цвет), эпитепловых (зеленый цвет) и высокоэнергичных эпитепловых (синий цвет) нейтронов по данным инструмента ЛЕНД. Потоки эпитепловых нейтронов (синий и зеленый цвет) подавляются в полярных регионах и повышаются в морских районах, в бассейне Южный полюс – Айткена и в крупных кратерах. Обширные области красного цвета (повышенный поток тепловых нейтронов) в полярных районах согласуются с общим региональным подавлением эпитепловых нейтронов и увеличением потока тепловых нейтронов вблизи полюсов.

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

2.4 Наблюдение и моделирование Галактических Космических Лучей в приложениях ядерной планетологии

В течение нескольких десятилетий множество научных миссий исследовали планеты Солнечной системы и их спутники. Научные цели многих из них включают в себя изучение элементного состава недр этих небесных тел. Собранные информация помогает понять геохимические процессы, влияющие на их эволюцию в прошлом, и о происхождении и эволюции Солнечной системы, планет, их спутников, астероидов и комет.

Одними из наиболее полезных методов дистанционного изучения элементного состава являются гамма- и нейтронная спектрометрия с борта орбитального и посадочного космического корабля.

Используя полученные данные можно картировать обилие основных породообразующих элементов на поверхности планеты и исследовать распределение воды в верхнем слое грунта.

Нейтронное и гамма-излучение планет и их спутников, таких как Марс, Меркурий и Луна, вызвано заряженными частицами Галактических Космических Лучей (ГКЛ), которые бомбардируют поверхности планеты, полностью лишенной атмосферы или с тонкой атмосферой, как на Марсе. Заряженные частицы ГКЛ сталкиваются с ядрами основных породообразующих элементов в подповерхностном слое грунта и производят вторичные высокоэнергетические частицы - нейтроны, протоны, гамма-лучи, тяжелые ионы и другие частицы. Нейтроны замедляются и перед выходом из подповерхностного слоя могут взаимодействовать с ядрами грунта посредством упругих, неупругих реакций и реакций захвата. Возбуждение ядер в этих реакциях приводит к излучению характеристических линий гамма-излучения, характерного для данного ядра. Таким образом, поверхность излучает спектр гамма-лучей с набором ядерных линий, указывающих химический состав грунта. Известно, что ядра легких элементов, таких как водород, эффективно замедляют нейтроны. Следовательно, количество этих элементов может быть определено из мониторинга изменений нейтронного спектра.

Гамма- и нейтронная спектроскопия планет неофициально называют ядерной планетологией. Обобщая наш опыт, полученный в экспериментах HEND (Mars Odyssey), DAN (Curiosity), BTN (ISS), LEND (LRO) и FRENД (TGO), можно сделать вывод, что методы ядерной планетологии требуют не только знания чувствительности прибора, но и точное прогнозирование и моделирование ГКЛ. С другой стороны, если в течение длительного времени приборы наблюдают за поверхностной и подповерхностной зоной с хорошо известными свойствами, можно оценить поток ГКЛ и его вариации на разных временных масштабах.

В этом исследовании мы представили сводку различных наблюдений, включая использование космических нейтронных спектрометров в качестве мониторов ГКЛ, а также обсудили общие проблемы, связанные с численным моделированием взаимодействия ГКЛ с небесными телами и космическими аппаратами при применении нейтронных планетологических экспериментов.

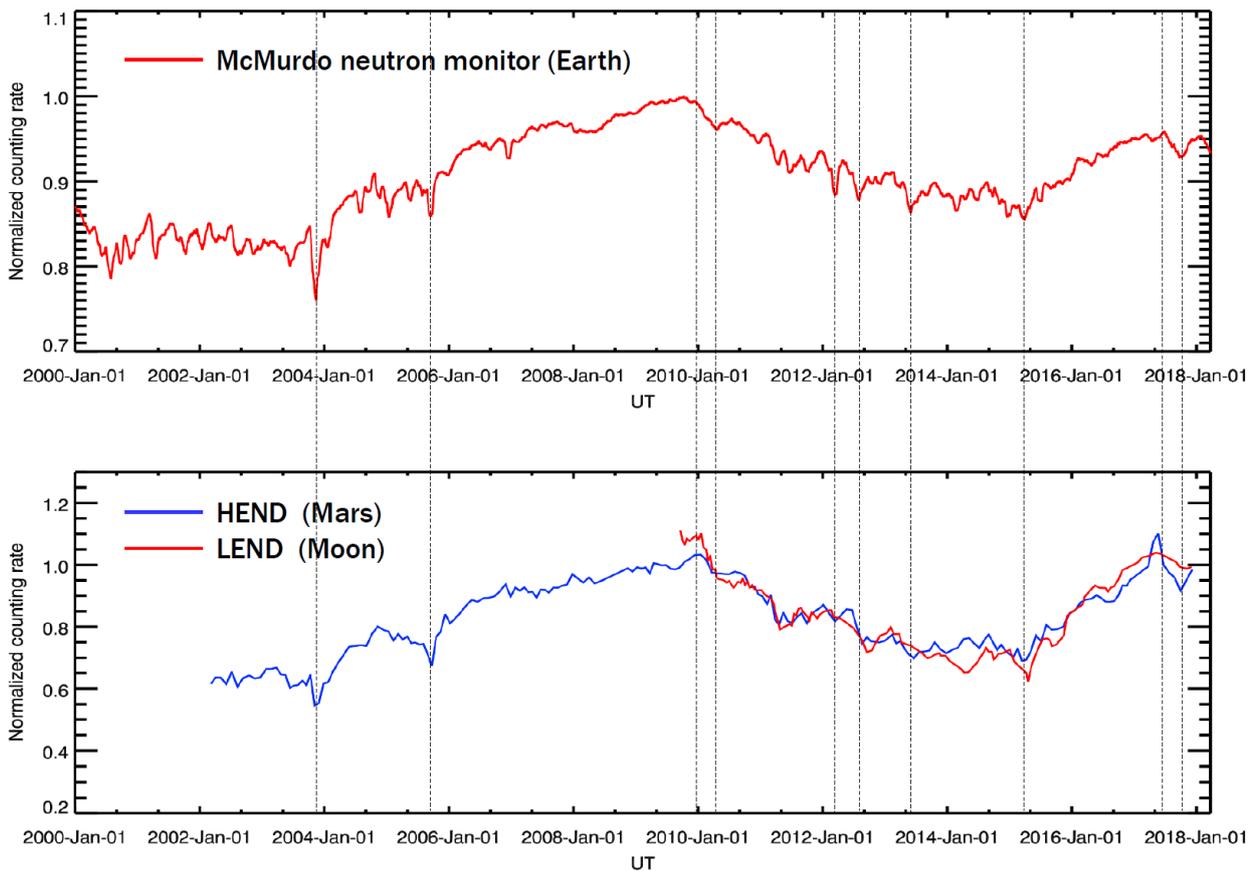


Рис. 2-4. Одновременные наблюдения модуляции ГКЛ на Земле, Луне и Марсе. Данные нейтронного монитора Мак-Мурдо (совместно с другими нейтронными мониторами на Земле) используются для оценки параметра модуляции ГКЛ. Данные нейтронных планетологических экспериментов подтверждают наблюдения на Земле и могут быть использованы для поиска различий между модуляцией ГКЛ наблюдаемой на Земле и других планетах Солнечной системы.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 22) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 42).

2.5 Полярные области на Луне как места для будущих форпостов

Российское космическое агентство планирует запустить в ближайшие годы несколько автоматических космических аппаратов (КА), первые из которых – Луна-25 и Луна-27. Приборы, установленные на борту этих аппаратов, предназначены для исследования летучих веществ и водяного льда, экзосферы Луны, частиц пыли и состава реголита. Поскольку основной научный интерес сконцентрирован в полярном регионе, там и выбираются места посадки для обоих аппаратов. Нами был разработан метод выбора мест посадки для КА Луна-25, который позволил выбрать основное и резервное место посадки в южной полярной области Луны. Метод основан на совместном многофакторном анализе данных инструментов LEND, LOLA, Diviner и LROC и позволяет ранжировать выбранные места по приоритету. Кроме того, разработанный метод

позволил выбрать несколько интересных с научной точки зрения и безопасных мест для посадки в полярных районах Луны. Эти места можно рассматривать, как возможные места посадки для последующих лунных посадочных аппаратов, включая КА Луна-27. Были представлены приоритеты этих мест и обсуждены основные параметры шести наиболее перспективных кандидатов на посадочные площадки (по три в каждой полярной области). Представленные результаты анализа лунной полярной поверхности позволяют выделить наилучшие потенциальные места расположения форпостов для будущих автоматических и пилотируемых научных и исследовательских миссий. Несколько таких кандидатов были представлены.

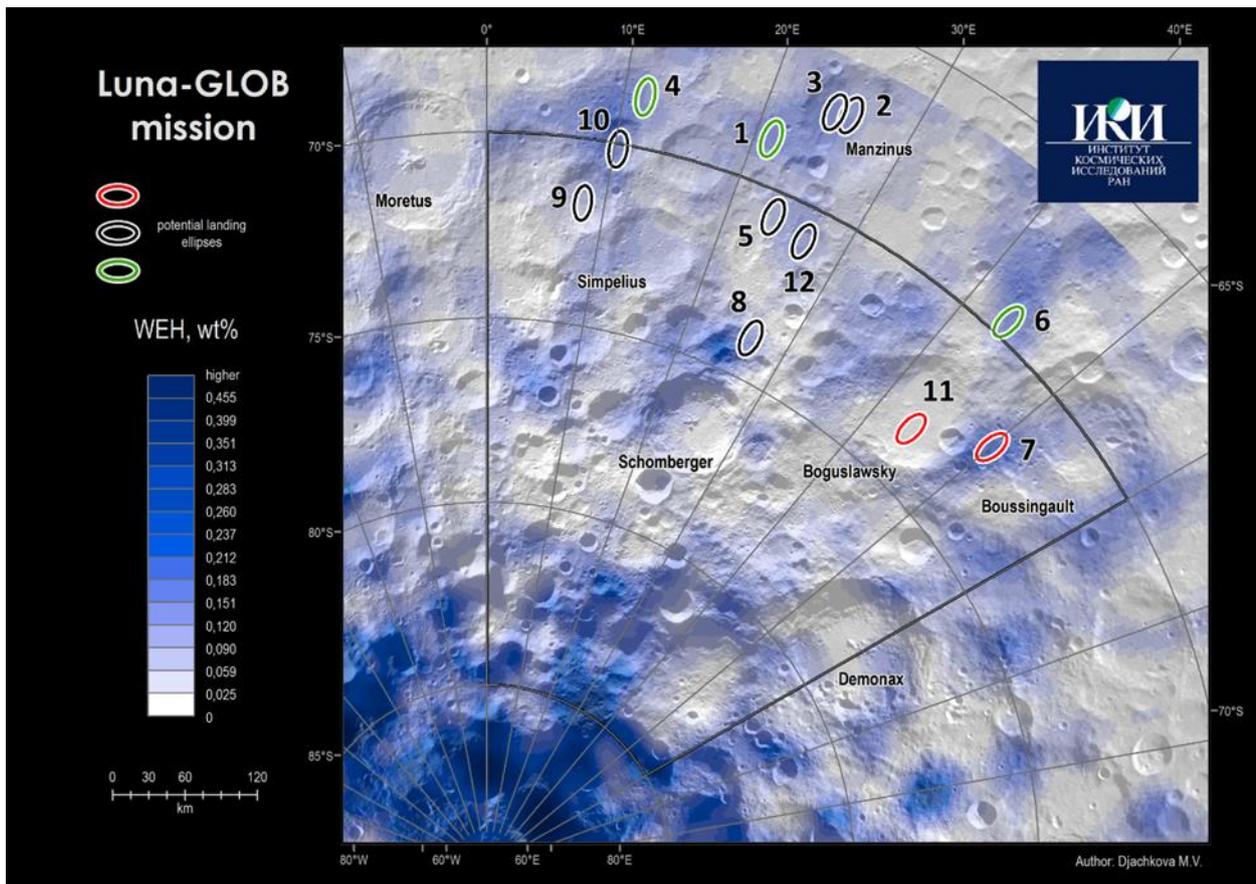


Рис. 2-5. Кандидаты-места посадки, потенциально пригодные и интересные для КА Луна-25. Места №1 и №6 были выбраны как основное и резервное, соответственно.

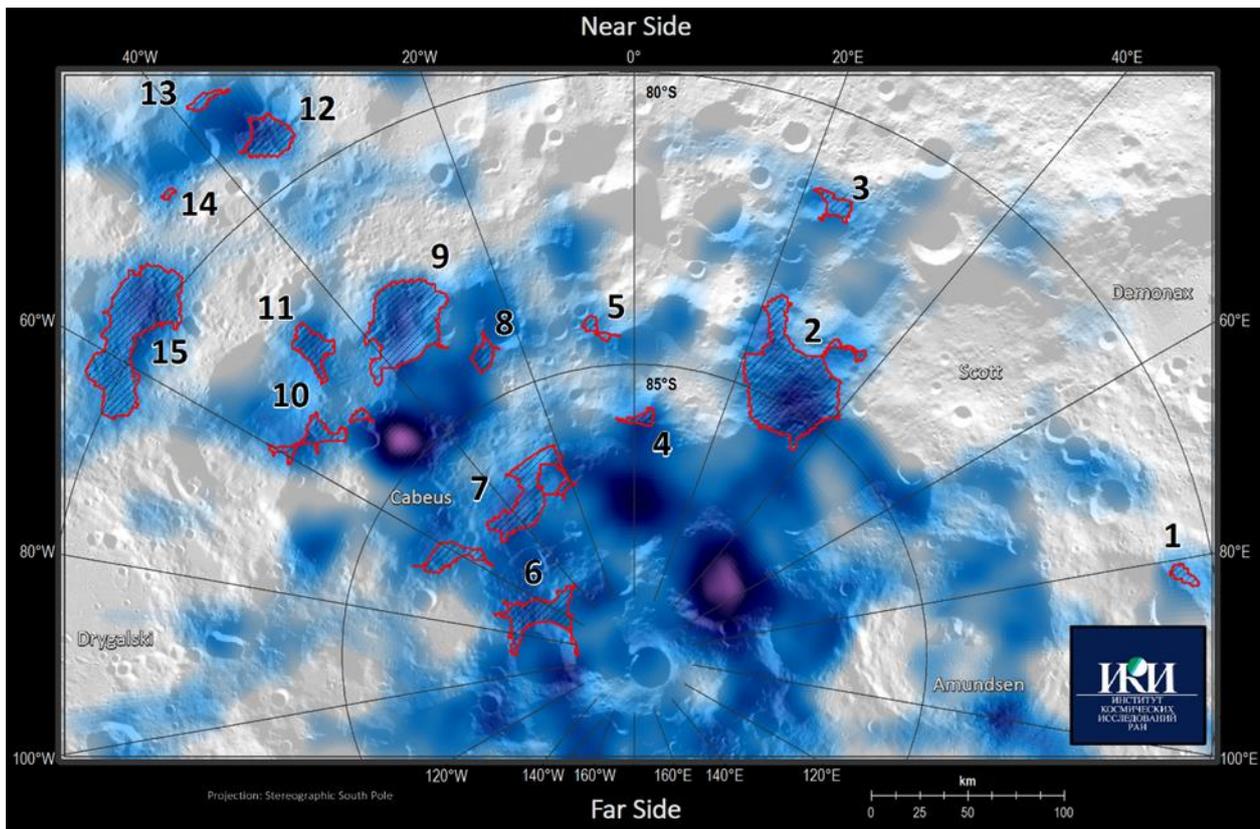


Рис. 2-6. Районы, потенциально пригодны для посадки будущих автоматических и пилотируемых КА и, возможно, для организации постоянной лунной базы, представлены на карте распределения водяного льда в подповерхностном слое грунта.

Результаты работы доложены научному сообществу (см. список источников п. 29, 30, 43).

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

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

3.1 Первые результаты, полученные по данным российского прибора ФРЕНД на борту КА ЕКА Trace Gas Orbiter: Картографирование воды/водяного льда в приповерхностном слое марсианского грунта с высоким пространственным распределением

В начале 2018 года КА ЕКА Trace Gas Orbiter (TGO) приступил к основной программе научных измерений на орбите вокруг Марса. В состав научной аппаратуры КА TGO входит российский нейтронный спектрометр ФРЕНД позволяющий измерять нейтронное альbedo Марса в различных энергетических диапазонах с ранее недоступным высоким пространственным разрешением (до 40 км) и, тем самым, оценивать содержание подповерхностной воды/водяного льда, сопоставляя его с характерными геологическими особенностями поверхности. Первые 120 дней орбитальных наблюдений позволили построить глобальную карту эпитеплового нейтронного потока от Марса и отождествить на умеренных широтах локальные районы с возможным наличием водяного льда или большого количества гидратированных минералов. При этом было показано, что расположение этих районов, их границы хорошо коррелируют с геологическим контекстом местности (подножия вулканов, каналы оттока и т.д.).

Для выявления локальных особенностей было проведено сопоставление измерений ФРЕНД с измерениями, полученными в течение многолетнего картографирования поверхности Марса российским прибором ХЕНД, установленным на борту КА НАСА Марс Одиссей и работающим на орбите Марса с 2001 года (см. результат 3.2). Высокое пространственное разрешение прибора ФРЕНД позволило выявить несколько интересных областей расположенных на умеренных широтах, но имеющих довольно высокое содержание воды, указывающее, что это могут быть остатки реликтового льда. Он мог сохраниться с момента последней эпохи вулканической активности, когда в ходе извержения на поверхность последовательно друг за другом выбрасывались огромные потоки воды (из растопленной подземной криосферы) и раскаленной лавы.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников п. 3, 18) и доложены научному сообществу (см. п. 27, 37, 38, 39 списка источников).

3.2 Распространённость воды/водяного льда в солнечной системе. Карта распределения подповерхностной воды в марсианском грунте на средних широтах по данным российского прибора ХЕНД на борту КА НАСА Марс Одиссей

В 2018 году была проведена научно-исследовательская работа, посвященная обобщению результатов космических исследований связанных с поиском воды и водяного льда на планетах (и их спутниках) и малых телах Солнечной системы. В ходе исследования рассматривались и обсуждались различные гипотезы образования гидросферы Земли, различия резервуаров реликтового водяного льда на Луне и Меркурии, возможные гипотезы образования и исчезновения океанов на Марсе и Венере, а также вопросы распространения водяного льда во внешней части Солнечной системы. В части обобщения результатов исследований Марса была создана карта распределения подповерхностной воды в марсианском грунте на умеренных широтах (за пределами полярных шапок) по данным многолетних (2002-2018) наблюдений российского нейтронного спектрометра ХЕНД, установленного на борту КА Марс Одиссей. В силу того, что прибор ХЕНД – это всенаправленный спектрометр, предназначенный для регистрации нейтронного альbedo Марса, то карта распространённости воды построенная по его измерениям имеет характерное пространственное разрешение 600 км (пятно на поверхности с радиусом ~300 км), что не всегда позволяет проводить сопоставление с геологическими особенностями и проверять различные гипотезы об эволюции марсианской гидросферы.

К основным достоинствам полученной карты относится отображение крупномасштабных районов с повышенным содержанием связанной воды (приполярные области, районы земли Арабии и Мемнонии) и высокая статистическая обеспеченность. Все это позволило провести сопоставление с данными коллимированной нейтронной спектроскопии и выявить локальные области с повышенным и пониженным содержанием воды ненаблюдаемых на крупномасштабной карте и при этом совпадающих с различными геологическими областями (см. результат 3.1).

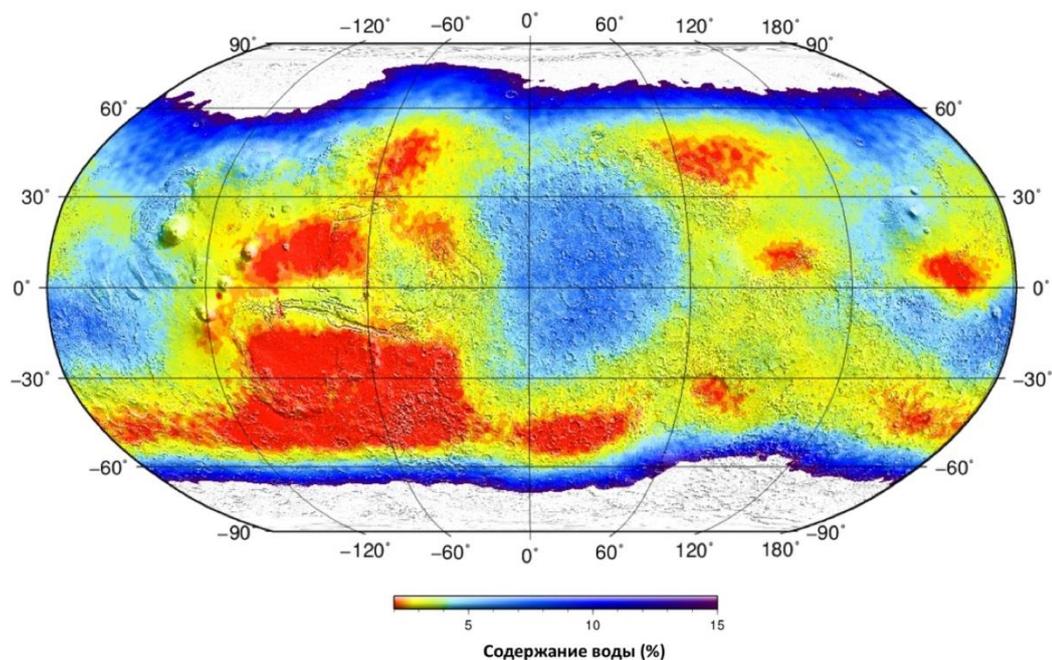


Рис. 3-2. Карта распределения подповерхностной воды на Марсе по данным российского прибора ХЕНД, установленного на КА НАСА Mars Odyssey. Белым показаны высокоширотные области, где в подповерхностном грунте доминирует водяной лед, цветом - распределение связанной воды на умеренных широтах.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 16) и доложены научной общественности (см. список источников, п. 36).

3.3 Определение содержания воды и изучение геохимии подповерхностного слоя грунта вдоль трассы движения марсохода Кьюриосити в кратере Гейл по данным российского прибора ДАН

Миссия Марсианская Научная Лаборатория (марсоход «Кьюриосити»), была специально подготовлена для поиска следов жизни и изучения эволюции марсианского климата. Для определения содержания подповерхностной воды в ее состав был включен российский прибор «Динамическое Альbedo Нейтронов» (ДАН).

В августе 2012 года марсоход «Кьюриосити» совершил успешную посадку на поверхность Марса в экваториальной области, внутри кратера Гейл, имеющего возраст более 3.5 миллиардов лет. За шесть лет работы на поверхности Марса был проведен ряд важных наблюдений окружающей, в ходе которых прибор ДАН позволил измерить небольшие вариации подповерхностной воды (1-4% по массовой доле) вдоль трассы движения марсохода, уделяя особое внимание отдельным участкам, где были обнаружены сложные образования осадочных пород. Небольшое количество воды и малый диапазон изменения ее содержания требует использования все более точных методов

обработки данных измерений, чтобы можно было провести сопоставление областей с разными типами осадочных пород, или найти неоднородности в распределении водородосодержащих соединений по глубине.

Методы нейтронной спектроскопии не дают прямых оценок содержания воды, а требуют привлечения достаточно сложных методов модельно зависимого восстановления данных основанных на численном моделировании измерений. В таком подходе необходимо сопоставить экспериментальные данные с моделью окружающей обстановки и оценить значения параметров, описывающих свойства грунта, при которых достигается наилучшее согласие с проведенными измерениями. Для этих целей в 2018 году была закончена разработка комплексной численной модели эксперимента ДАН, учитывающей многочисленные условия и особенности проведения измерений на поверхности Марса и различные приборные эффекты. Модель позволила оценить содержание воды и некоторых химических элементов (таких как например хлор и железо) в различных режимах работы НА ДАН в приповерхностном слое грунта на протяжении всего маршрута марсохода «Кьюриосити» (около 20 км), см рисунки 3-3 и 3-4.

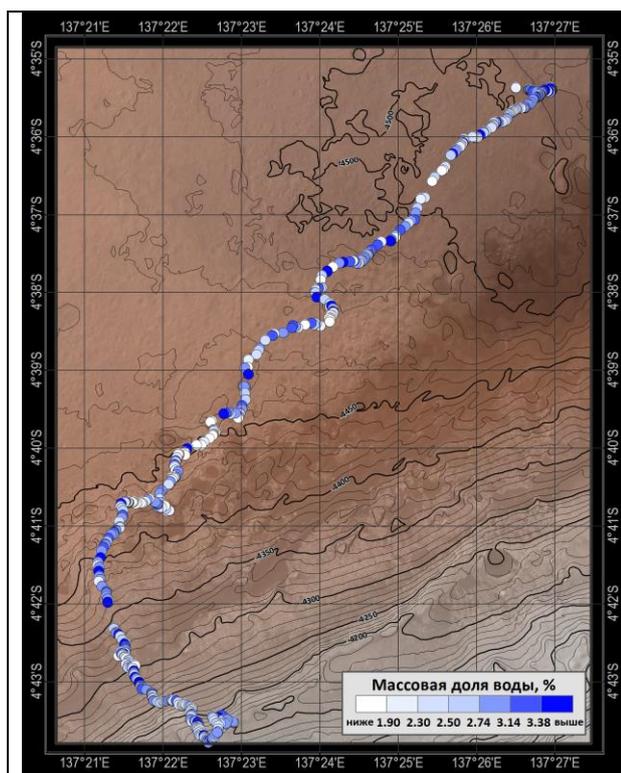


Рис. 3-3. Профиль содержания воды вдоль трассы марсохода «Кьюриосити», измеренный НА ДАН, начиная от места посадки.

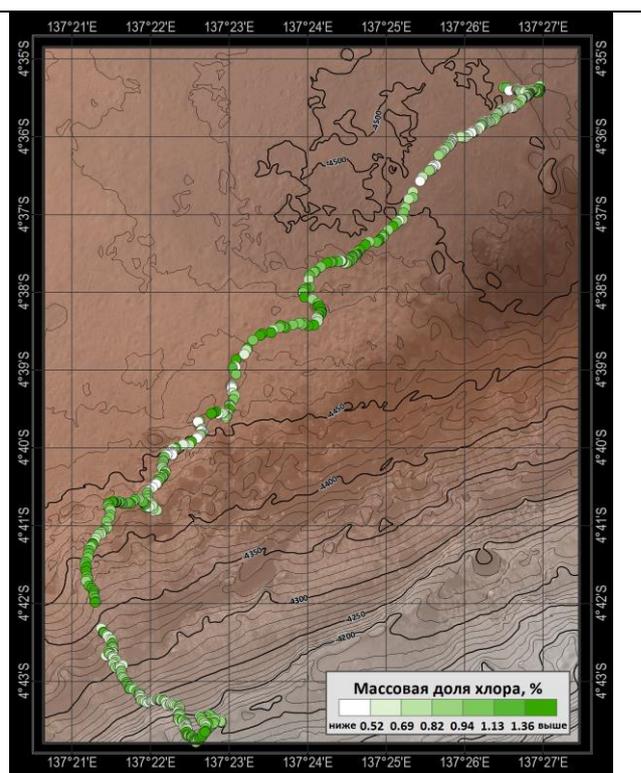


Рис. 3-4. Профиль содержания хлора вдоль трассы марсохода «Кьюриосити», измеренный НА ДАН, начиная от места посадки.

Было проведено сопоставление с геологическими особенностями и геохимией поверхности (по данным других экспериментов, установленных на марсоходе) в различных районах по ходу движения и прежде всего в Yellowknife bay, где впервые были обнаружены осадочные породы

образовавшиеся на дне древнего озера, а также проведено сопоставление измерений ДАН с данными орбитальных наблюдений (прибор CRISM на борту КА НАСА MRO). Последнее сравнение показало хорошую корреляцию орбитальных измерений и измерений на самой поверхности в части обнаружения залежей гидратированных минералов.

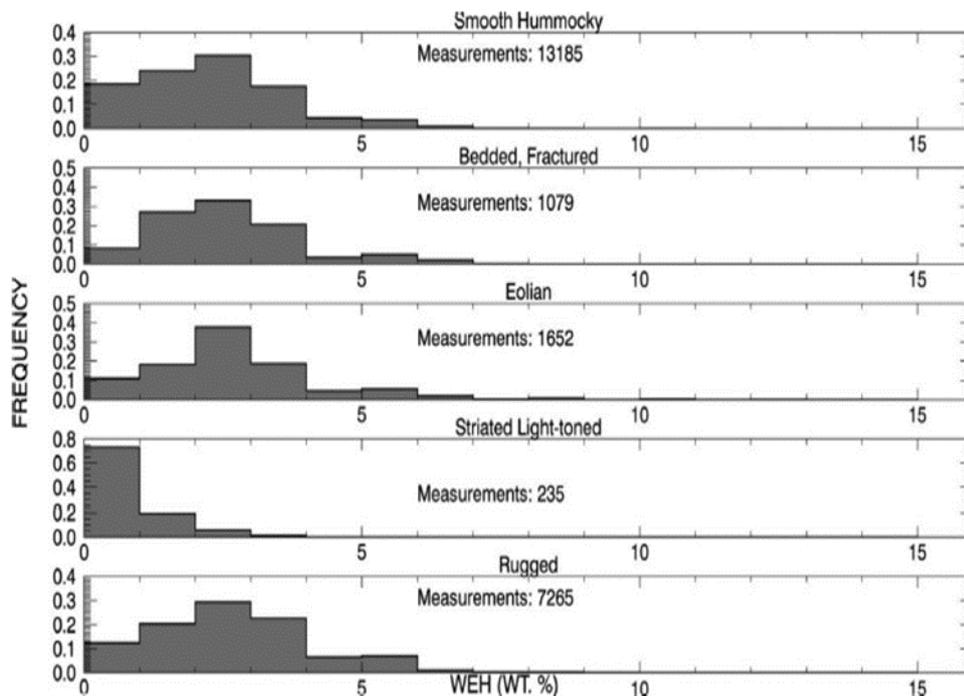


Рис. 3-5. Сопоставление распределений подповерхностной воды (полученной по данным измерений эксперимента ДАН) с различными геологическими типами пород вдоль трассы движения марсохода «Кьюриосити».

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 5, 19, 20, 23) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 28, 30, 31, 33, 34, 35, 41).

3.4 Методика определения элементного состава вещества Марса с прицелом на выяснение обеспеченности различными природными ресурсами для будущих марсианских экспедиций

Кроме непосредственных измерений на орбите и на поверхности Марса, в 2018 году проводилась серия наземных отработок с прототипами активных гамма спектрометров, разрабатываемых для будущих посадочных миссий. В их задачи, на основе методов нейтронного радиационного анализа, входит определение содержания основных порообразующих элементов и проведение геологоразведки для оценки ресурсов пригодных для освоенческих задач. Для этого были проведены полевые испытания на мишени аналоге марсианского грунта (с имитацией распределения подповерхностной воды) с несколькими образцами гамма-спектрометров,

использующих в своем составе сцинтиляционные детекторы CeBr_3 и $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и различные типы нейтронных генераторов.

В ходе наземных экспериментов были отработаны методики измерения содержания различных химических элементов составляющих более 90% (по массовой доле) от всего химического состава марсианского грунта. В этот список вошли O, Na, Mg, Al, Si, Fe, Cl, K, U, Th. Было показано, что в ходе измерений на поверхности Марса можно достигнуть относительной точности в оценке их концентраций в диапазоне 2-10%.

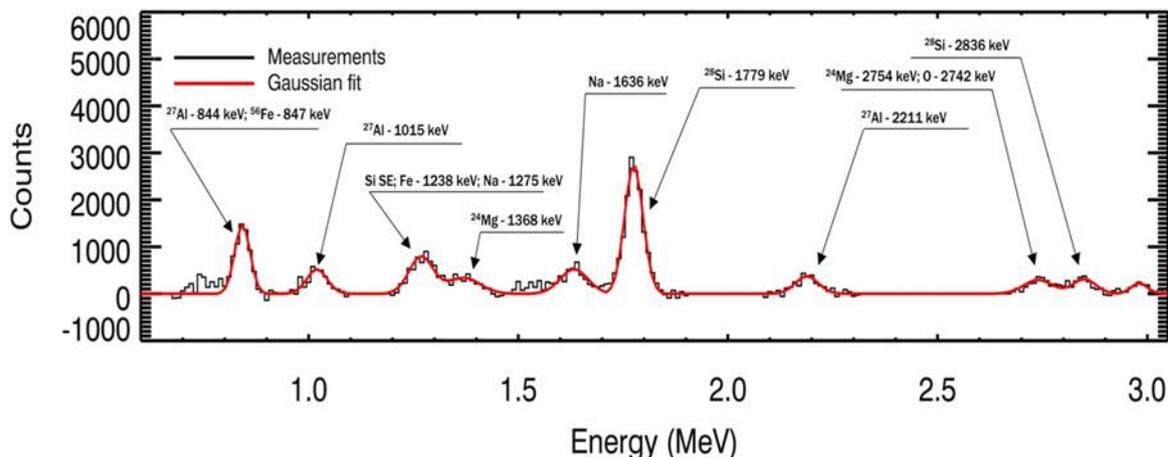


Рис. 3-6. Пример измерения спектра наведенного гамма-излучения марсианской поверхности (после ее облучения быстрыми нейтронами от нейтронного генератора). В качестве марсианской поверхности использовалась многокомпонентная сборка из различных материалов, имеющая такой же средний химический состав, как и марсианский грунт.

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 17, 21, 22).

3.5 Исследование сезонных и суточных вариаций

Давно известно, что данные нейтронной спектроскопии с орбиты Марса позволяют не только обеспечивать картографирование подповерхностной воды/водяного льда, но могут использоваться и для мониторинга сезонных вариаций. Это включает наблюдения за тем, как перераспределяется атмосферная углекислота, как растут и сублимируют сезонные шапки Марса. До начала орбитальной миссии ТГО основным источником таких наблюдений были нейтронные спектрометры, установленные на борту КА Марс Одиссей, включая российский прибор ХЕНД.

Первые 120 дней наблюдений на борту КА ТГО позволили не только построить первую карту распределения воды с высоким разрешением (см. результат 3.1) но и увидеть ход сезонных изменений, показывающих сублимацию сезонного слоя углекислоты на юге. На рисунке 3-7 представлены сезонные широтные кривые полученные для различных интервалов солнечной долготы ($L_s = [170^\circ-187^\circ]$, $[187^\circ-207^\circ]$, $[207^\circ-227^\circ]$) по данным наблюдений прибора ФРЕНД и

прибора ХЕНД. Небольшие различия между ними как раз связаны с разным пространственным разрешением этих приборов. В перспективе дальнейших наблюдений сопоставление сезонных вариаций нейтронного альbedo Марса на разном масштабе позволит более детально характеризовать как меняются границы сезонных шапок Марса.

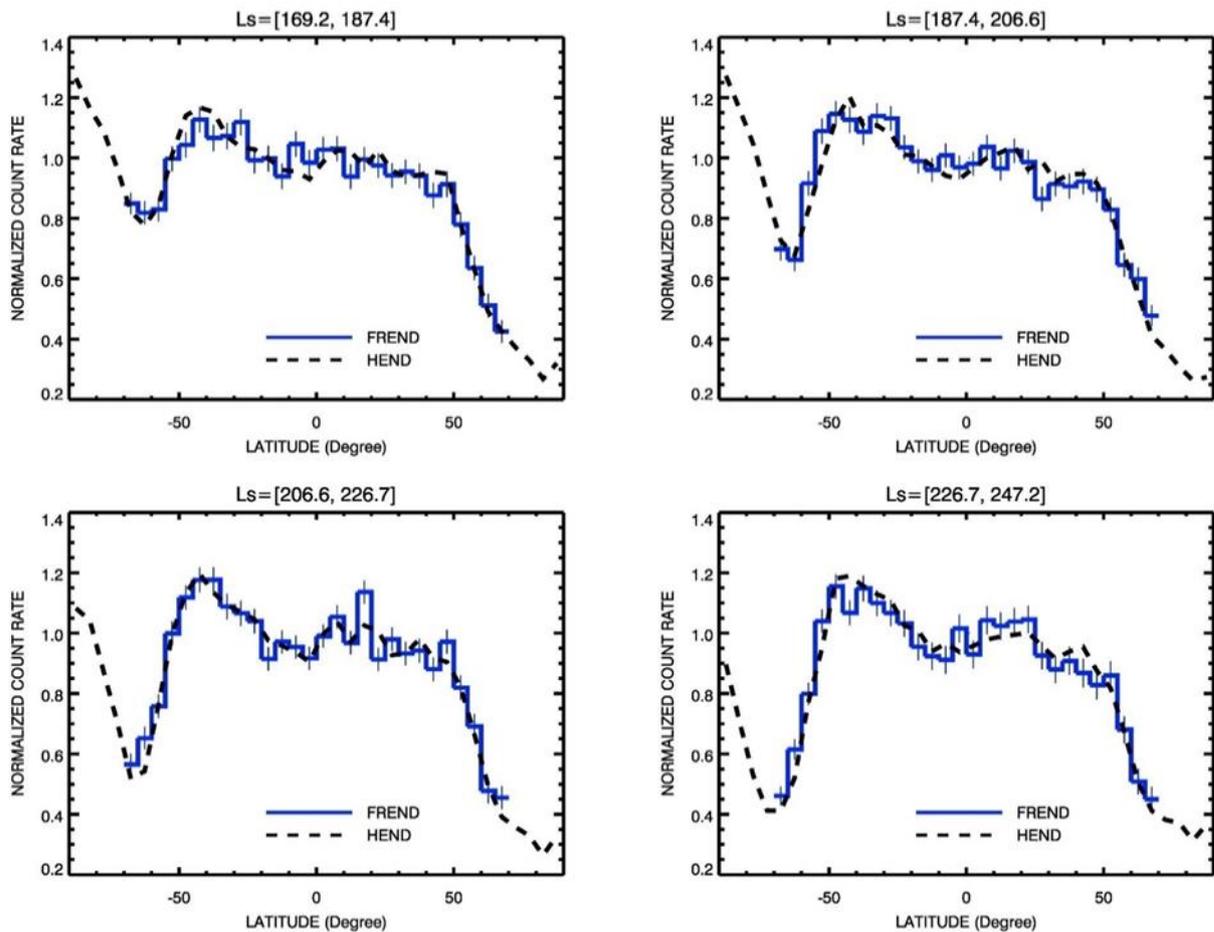


Рис. 3-7. Сезонные широтные кривые нейтронного потока, измеренные в 2018 году по данным наблюдений прибора ФРЕНД (КА ТГО) и прибора ХЕНД (КА Марс Одиссей).

В 2018 году в дополнение к орбитальным наблюдениям также проводился временной анализ данных измерений на поверхности Марса. В ходе выполнения миссии Марсианская Научная Лаборатория марсоход «Кьюриосити» несколько раз по техническим причинам останавливался на достаточно долгое время (несколько десятков дней). Преимущество длительной остановки заключается в том, что можно накопить большую статистику измерений на одном месте, а обнаруженные вариации связывать не с изменением подстилающей поверхности из-за движения марсохода, а с различными временными процессами, такими как суточные и сезонные вариации, вариации космических лучей т.д. Прибор ДАН, установленный на борту марсохода «Кьюриосити», работая в пассивном режиме (с выключенным нейтронным генератором) измеряет потоки нейтронов рожденных в толще грунта заряженными частицами космических лучей. Выходя на поверхность эти нейтроны замедляются,

взаимодействуя с ядрами основных породообразующих элементов. Одним из сильных замедлителей является водород и любые водородосодержащие соединения и прежде всего вода или гидратированные минералы. Если в ходе суточного или сезонного цикла меняется содержание связанной воды в толще приповерхностного слоя, то соответствующие вариации испытывает и поток нейтронов. Поэтому на каждой из длительных остановок марсохода проводился поиск суточных вариаций нейтронного потока, измеряемого прибором ДАН, и сравнительный анализ с данными метеонаблюдений (давление и температура). После исключения инструментальных эффектов было установлено, что эффект суточных вариаций присутствует в данных, но незначителен по амплитуде.

Результаты работы отражены в публикации (см. список источников, п. 19).

Раздел 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

20 октября 2018 г. с космодрома Гвианского космического центра состоялся успешный запуск космического аппарата (далее – КА) «БепиКоломбо», с установленной на борту научной аппаратурой МГНС, предназначенной для исследования поверхности Меркурия методами ядерной планетологии. 15 ноября 2018 г специалистами ИКИ РАН совместно со специалистами Центра управления полетами ЕКА (ESOC) было проведено первое включение в космосе и ввод в эксплуатацию научной аппаратуры (далее – НА, прибор) МГНС.

В ходе первого включения была проверена работоспособность физических датчиков прибора (пропорциональные нейтронные счётчики на основе ^3He , а также нейтронный и гамма-сцинтиллятор), а также каскадов аналоговой и цифровой электроники. Кроме того, в ходе управления прибором, были проверены процедуры подачи команд и приема научных и служебных данных. Продолжительность работы НА МГНС во время первого включения определялось периодом видимости КА «БепиКоломбо» наземными станциями управления, т.е. периодом, в течении которого возможно управление и анализ данных прибора МГНС в реальном времени. Общая длительность работы составляла около 8 часов. В течении этого времени были проверены те режимы работы прибора, в которых возможна работа НА МГНС на этапах межпланетного перелета и картографирования поверхности Меркурия. Эти режимы включают в себя различные конфигурации уровней высокого напряжения (low или high) и дискриминаторов (on или off) для физических датчиков прибора. Также был проверен дополнительный цифровой канал работы прибора МГНС, который предусматривает запись данных научных измерений с высоким временным разрешением (до 2 сек, в штатном канале работы прибора – 20 сек) и передачу их на временное хранение в бортовую память КА «БепиКоломбо», с последующей передачей их на Землю по дополнительному запросу.

Данные первого включения НА МГНС показали, что все физические датчики, аналоговая и цифровая электроника прибора работают штатно (см. рис. 4-1 – 4-4). Прибор принимает и выполняет поданные на него команды в соответствии с циклограммой работы, а также формирует пакеты данных служебной и научной информации в соответствии с согласованным протоколом.

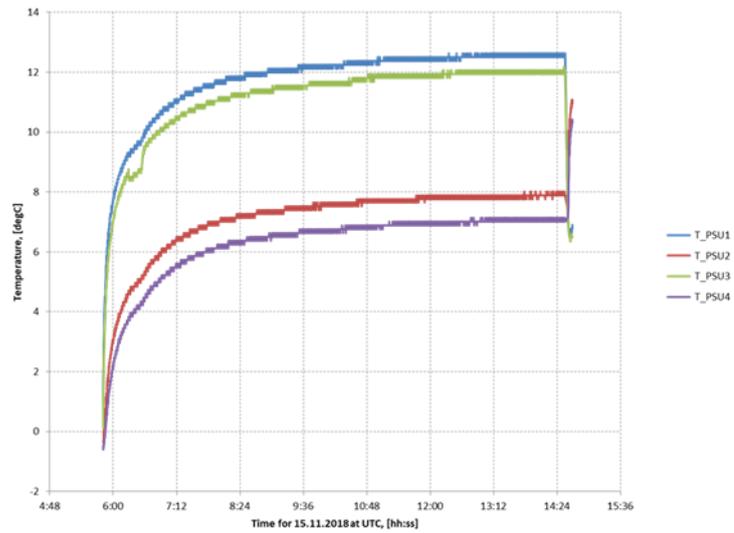


Рис. 4-1. Профиль температур четырех источников вторичного питания прибора МГНС во время первого включения.

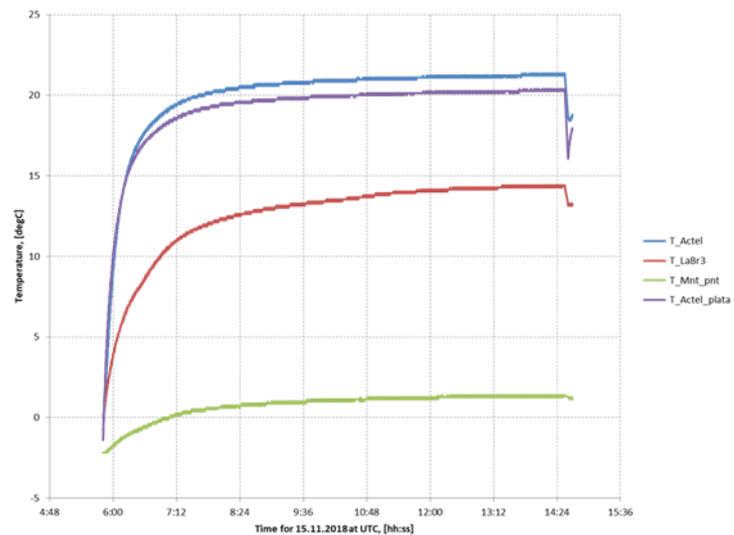


Рис. 4-2. Профиль температур плат цифровой электроники и посадочной поверхности прибора МГНС во время первого включения прибора.

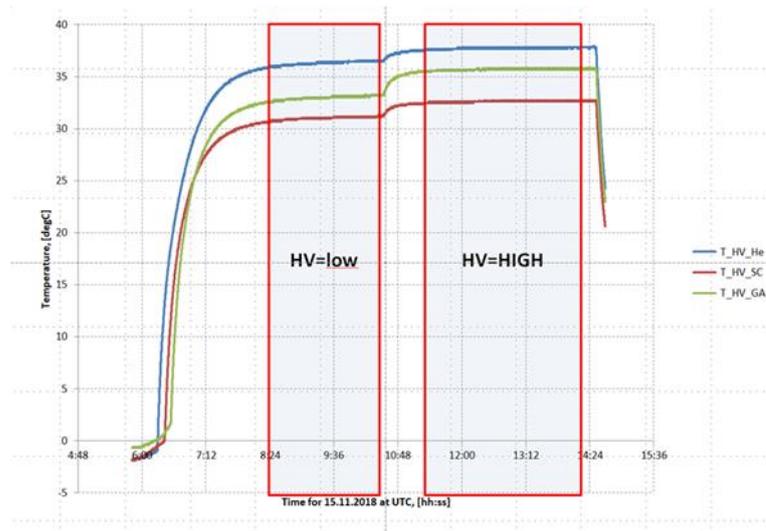


Рис. 4-3. Профиль температур трех источников высокого напряжения прибора МГНС во время первого включения прибора. Области помеченные синим, соответствуют временным интервалам, за период которых построены гамма-спектры для низкого и высокого уровней HV.

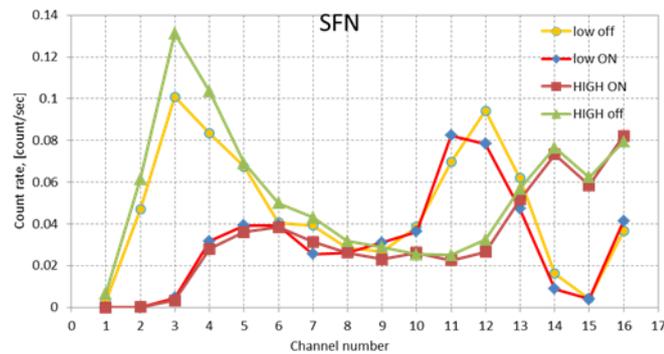


Рис. 4-4. Спектры детектора нейтронов SFN, основанного на пропорциональном счетчике ^3He для четырех конфигурация прибора, соответствующих различным состояниям уровней высокого напряжения (low или high) и дискриминатора (on или off).

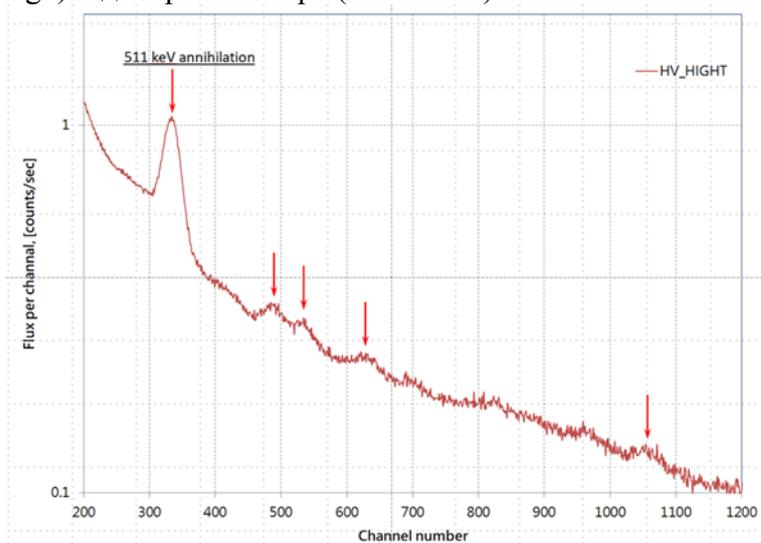


Рис. 4-5. Гамма-спектр, построенный на основе данных гамма-спектрометра прибора МГНС в течение первого включения для конфигурации прибора, соответствующей высокому уровню HV. Гамма-линия с пиком в канале №330 соответствует линии электрон-позитронной аннигиляции с энергией излучения фотонов 511 кэВ.

На сегодняшний момент стадия ввода в эксплуатацию КА «БепиКоломбо», а также НА МГНС продолжается. Она должна завершиться в январе 2019 года, спустя три месяца с момента запуска. Следующей стадией миссии является межпланетный перелет к Меркурию протяженностью около 7 лет со сроком прибытия в декабре 2025 года. Во время межпланетного перелета КА будет осуществлен пролет около Земли, два пролета около Венеры и шесть пролетов около Меркурия. На стадии перелета к Меркурию планируется включать НА МГНС с периодичностью не реже одного раза в 6 месяцев, продолжительностью 2-3 часа. В течение 2019 г планируется выполнить измерения нейтронного и гамма-фона от КА «БепиКоломбо» в круизной конфигурации. Кроме этого, планируется выполнить отождествление фоновых гамма-линий, проходящих от КА и выполнить энергетическую калибровку шкалы гамма-спектрометра.

Раздел 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 2018 году были продолжены ранее начатые работы в области разработки новых образцов ядерно-космических приборов и новых детекторных сборок для перспективных космических миссий.

5.1. Создание прототипа прибора, работающего по методу «меченых заряженных частиц»

Метод гамма-спектрометрического анализа состава вещества небесных тел неоднократно использовался для изучения состава вещества Луны, Марса, Меркурия и астероидов. Основная особенность таких измерений, которая затрудняет интерпретацию полученных данных, состоит в неизбежном присутствии фонового гамма-излучения от конструкции космического аппарата, на борту которого установлен гамма-спектрометр. Эта особенность превращается в серьезную проблему при измерении массовой доли в веществе небесного тела таких элементов, как водород, углерод, кислород, кремний, магний, алюминий, титан и др., так как эти элементы также входят в состав вещества космического аппарата и излучают под воздействием космических лучей те же характеристические линии ядерного излучения, что и исследуемое вещество. Происходящее в результате этого наложение эмиссионных линий изменяет их интенсивность и не позволяет достоверно измерить концентрацию ядер в исследуемом веществе.

Предложенный метод «меченых заряженных частиц» позволяет решить эту проблему и создать прибор, который даст возможность изучать спектры гамма-излучения от выделенного объема вещества небесного тела и практически полностью исключить вклад гамма-лучей от космического аппарата и, также, от удаленных участков поверхности исследуемого небесного тела.

Для наземной отработки эксперимента на протонном пучке протонного ускорителя ОИЯИ (г. Дубна) была создана лабораторная установка «гамма-спектрометр – меченные протоны» (рис. 5-1), состоящая из:

- двойного детектора протонов на основе сцинтилляционного пластика со схемой усилителя сигналов;
- гамма-детектора на основе кристалла CeBr_3 в составе сцинтилляционного кристалла, ФЭУ, платы делителя высокого напряжения и корпуса;

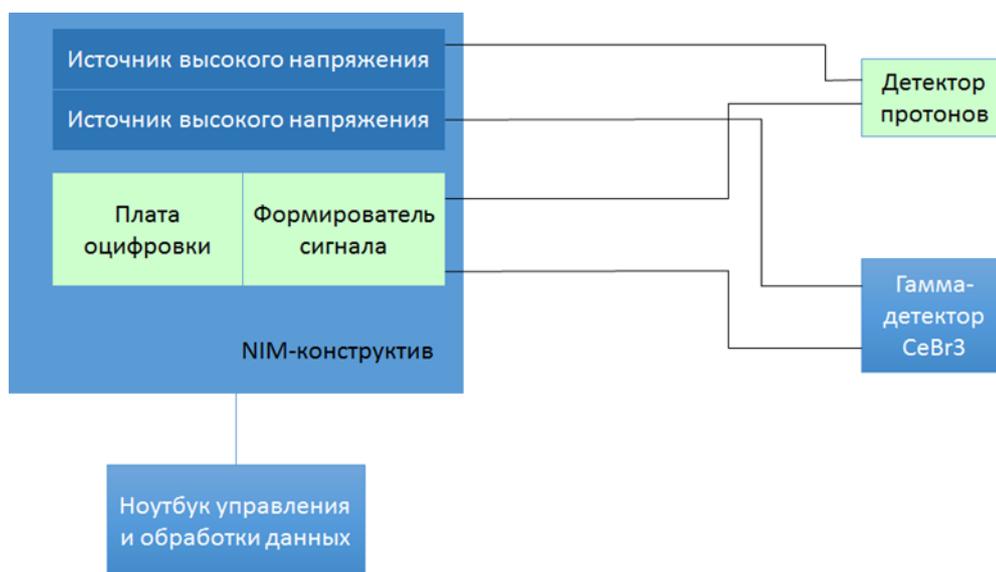


Рис. 5-1. Блок схема лабораторной установки.

- источников высокого напряжения ORTEC 660 для ФЭУ детекторов;
- NIM-конструктива ORTEC 4006, предназначенного для механической сборки и питания модулей;
- формирователя сигналов и плата оцифровки, выполненных в виде единого модуля и предназначенных для усиления сигналов ФЭУ, высокоскоростной оцифровки сигналов, их временной привязки и формирования потока данных передачи в ноутбук;
- ноутбук управления и обработки данных.

Блок-схема электроники лабораторной установки, схема измерений на протонном пучке, а также фотографии реальных измерений приведены на рисунках 5-1, 5-2, и 5-3 соответственно.

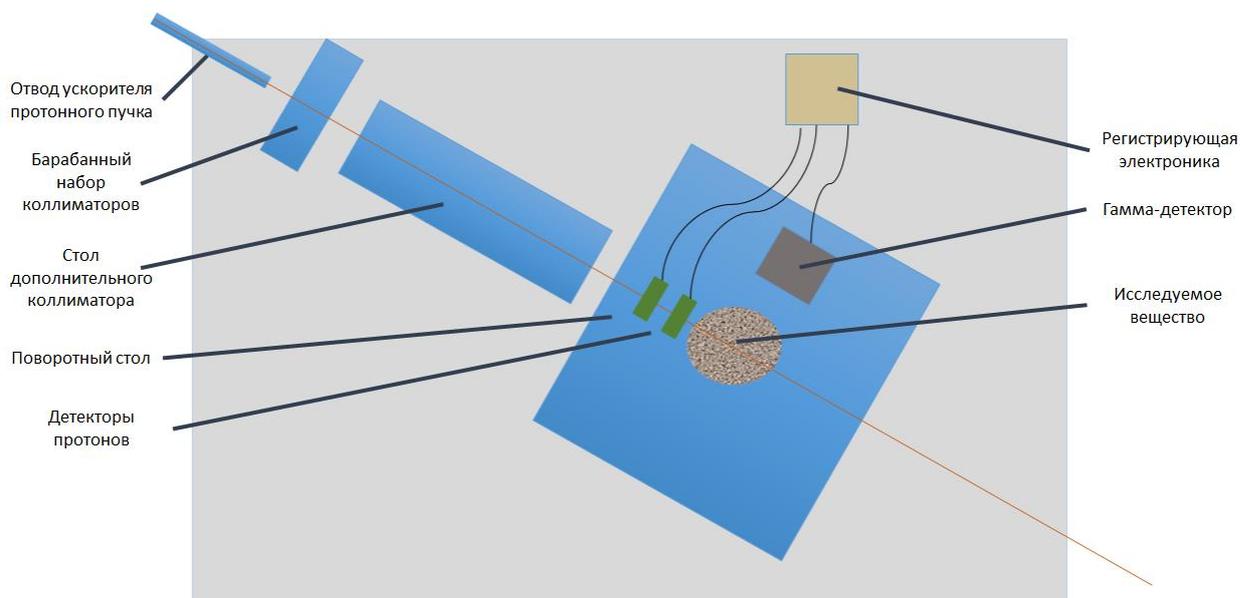


Рис. 5-2. Схема измерений на лабораторной установке с использованием протонного пучка.



Рис. 5-3. Измерения на протонном пучке в ОИЯИ (г. Дубна)

В рамках этих работ был проведен ряд измерений с несколькими образцами исследуемыми образцами материалов в различных конфигурациях, были получены первые данные и построены графики «гамма-отклика» после воздействия заряженных частиц на исследуемый материал (рис. 5-4 и 5-5).

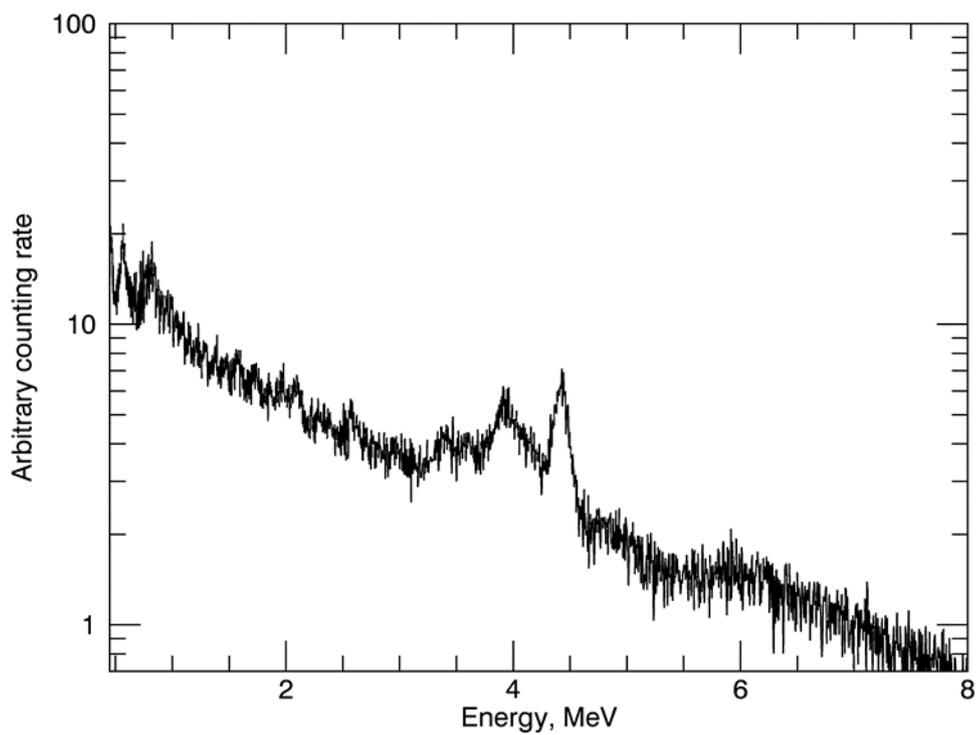


Рис. 5-4. Спектр «гамма-отклика» образца графита

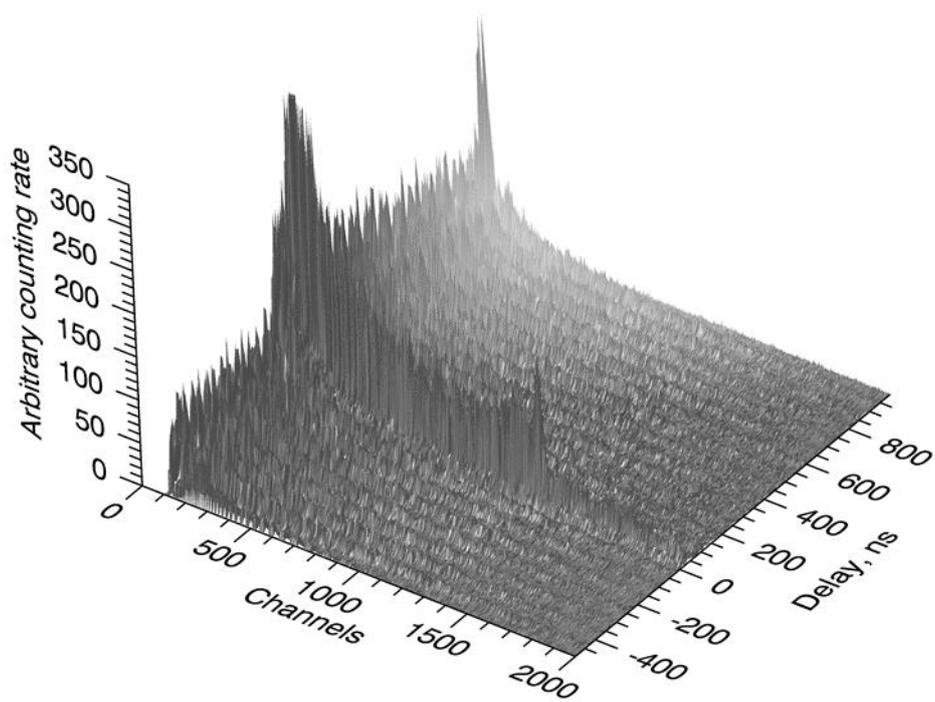


Рис. 5-5. Временная развертка спектра «гамма-отклика» образца графита

5.2. Создание перспективного нейтронного детектора с антисовпадательной защитой

Летные комплексные испытания (ЛКИ) приборов LEND и FREND показали неприятную особенность функционирования гелиевых счетчиков больших диаметров в условиях космического полета, а именно различие спектров работы во время наземных отработок и спектров, полученных с борта космических аппаратов. Причиной этого является чувствительность нейтронных счетчиков большого объема к заряженным частицам галактических космических лучей (ГКЛ) и фоновым заряженным частицам от самого аппарата. Дело в том, что в детекторах на основе ^3He с большим рабочим объемом энерговыделение трека ионизации от заряженной частицы является сопоставимым с энергией, выделяемой при регистрации нейтрона. В этом случае результирующим измеренным спектром становится суперпозиция классического спектра регистрации нейтронов и спадающего спектра регистрации заряженных частиц (рис. 5-6), и, как следствие, зашумление полезного нейтронного сигнала в младших энергетических каналах.

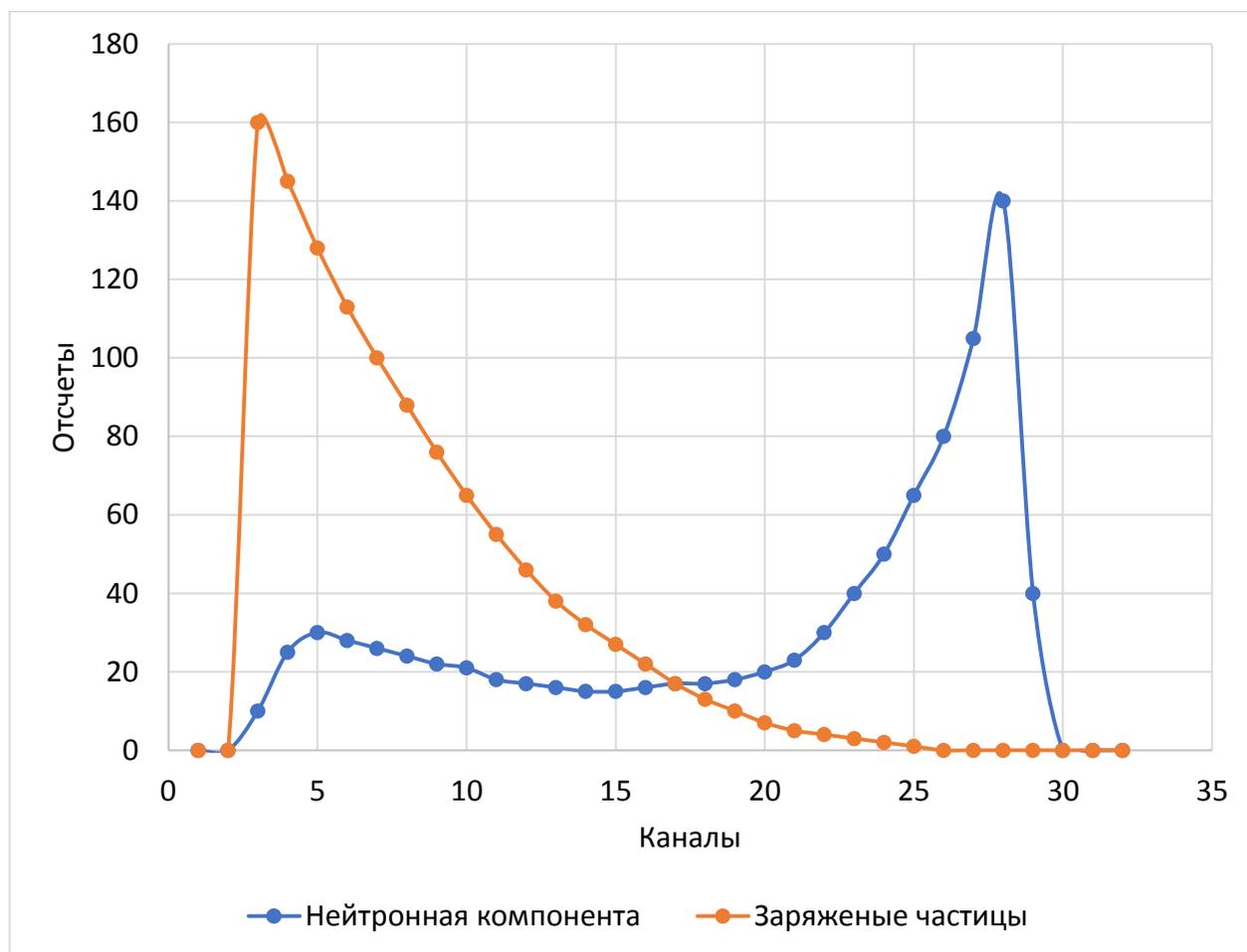


Рис. 5-6. Спектры регистрации нейтронов и заряженных частиц в нейтронных счетчиках ^3He большого объема

Общая форма результирующего спектра зависит не только от соотношения энергетических спектров и интенсивностей потока нейтронов и заряженных частиц, а также и от формы детектора, давления газа в регистрирующем объеме и количества гасящих примесей (Ar, CO₂, CH₄ и пр.).

Для обеспечения перспективных приборов космической нейтронной спектроскопии детекторами следующего поколения, не имеющими описанных недостатков, было принято решение о создании макета детектора с антисовпадательной защитой на основе сцинтиллятора. Это позволит улучшить такой ключевой параметр как отношение «сигнал/шум» в детекторе и приведет к значительному повышению достоверности результата за то же время измерения.

На рисунке 5-7 приведен разрез конструкции макета детектора с антисовпадательной защитой. В данном прототипе основным регистрирующим объемом (поз. 4) является пропорциональный гелиевый счетчик LND-25169 диаметром 2 дюйма и рабочим напряжением 1700-2000 вольт, а антисовпадательная защита (поз. 1) выполнена из органического пластика толщиной 10 мм и просматривается с помощью трехдюймового усиленного ФЭУ Hamamatsu R1307-13 (поз. 3), который показал хорошую надежность при отработках и использовании в других летных приборах.

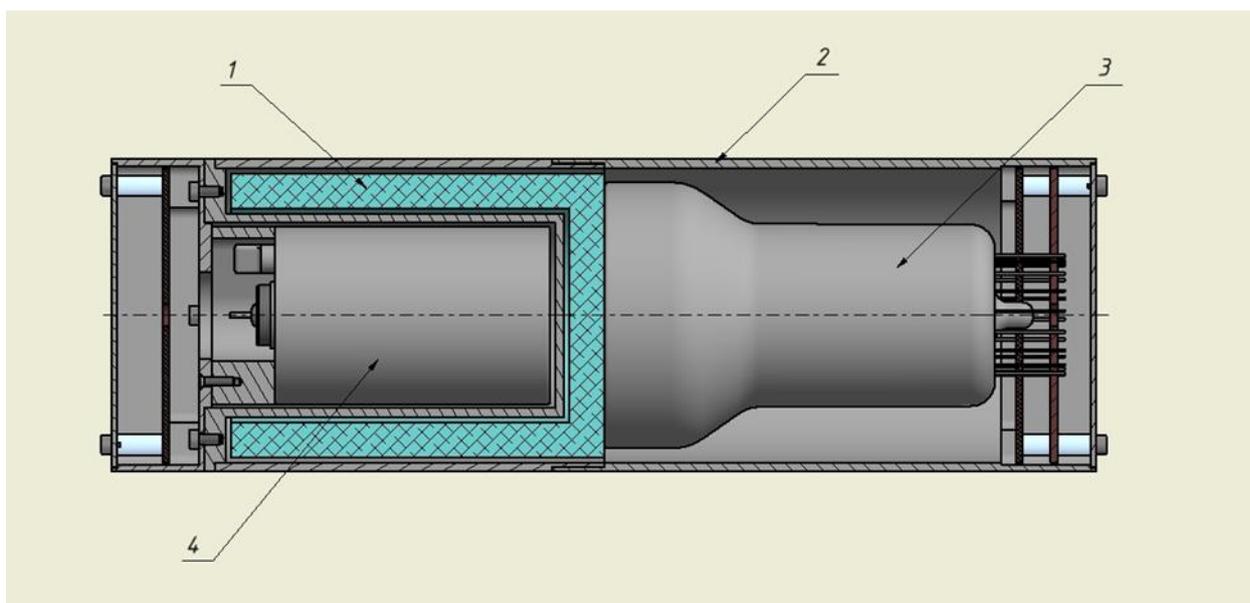


Рис. 5-7. Конструкция детектора с антисовпадательной защитой

Регистрирующая электроника позволяет обрабатывать сигналы с двух детекторов (пропорциональный счетчик и ФЭУ) независимо (2 канала регистрации) с последующей математической пофотонной обработкой фактов совпадения и построения результирующих спектров. Первичная регистрирующая электроника макета изначально собрана из радиационно-стойких лётных комплектующих, хорошо зарекомендовавших себя в предыдущих приборах ИКИ РАН и прошедшая летные комплексные испытания (ЛКИ) в космических миссиях (МКС, LRO, MSL, EхоMars-2016). Тем самым необходимость адаптации электроники макета к летным условиям эксплуатации отсутствует. Для обеспечения макета прочими сторонними напряжениями(в том

числе и высоким напряжением) используются готовые блоки модулей NIM фирмы ORTEC. Блок-схема регистрирующей электроники и макета в сборе приведена на рисунке 5-8.

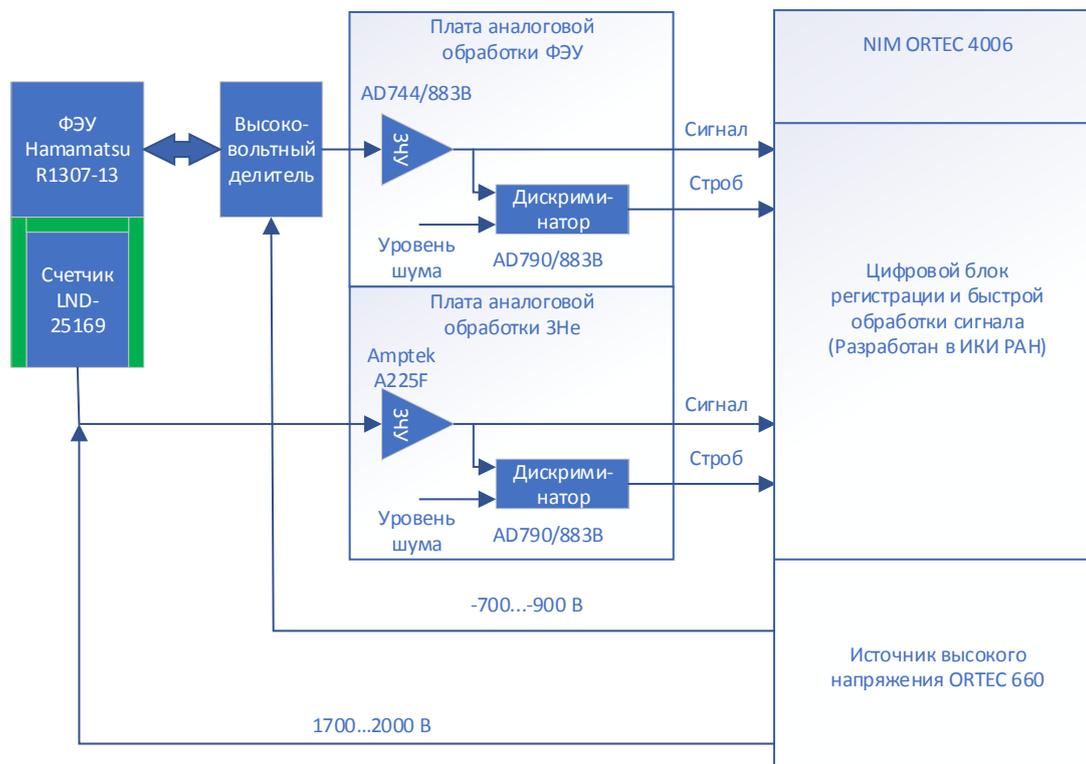


Рис. 5-8. Блок-схема регистрирующей электроники

Готовый прототип нейтронного детектора с антисовпадательной защитой приведен на рисунке 9. Final goal of laboratory tests is to obtain a detector prototype with minimal mass and size indicators and having flight qualification, therefore in the final stage of tests it is planned to conduct with the prototype a full cycle of acceptance tests (vibrational, climatic, thermovacuum and etc.).



Рис. 5-9. Прототип нейтронного детектора с антисовпадательной защитой

Результаты работы отражены в публикациях (см. список источников, п. 4, 21, 25) и доложены научному сообществу (см. список источников, п. 32).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2018 году по теме ОСВОЕНИЕ. Исследование Луны, планет и объектов Солнечной системы методами ядерной физики для изучения физической природы этих небесных тел для выяснения условий их освоения

Наиболее важные результаты:

Первые результаты, полученные по данным российского прибора ФРЕНД на борту КА ЕКА Trace Gas Orbiter: Картографирование воды/водяного льда в приповерхностном слое марсианского грунта с высоким пространственным распределением и дозиметрия на перелете к Марсу.

В рамках исследований по теме ОСВОЕНИЕ подготовлено 26 статей и иных печатных материалов, из них 18 опубликованы, 5 приняты в печать и 3 поступили в редакции (см. список источников).

Из вышеуказанных 26 публикаций 17 осуществлено в периодических изданиях (из них в имеющих квартиль Q1 – 10 публикаций, квартиль Q2 – 7 публикаций, квартиль Q3 – 5 публикаций, квартиль Q4 - 1 публикация, квартиль ниже Q4 – 2 публикации) и 1 публикация в сборнике материалов. Таким образом, при применении к публикациям соответствующих коэффициентов, общее количество публикаций составляет 72.

О полученных результатах было сделано 17 докладов на научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список публикаций:

Всего научных публикаций в 2018 г: 26, из них:

Статьи в зарубежных изданиях: 16

Статьи в отечественных научных журналах: 9

Из перечисленных публикаций 6 выполнено при поддержке РФФ (5 в отечественных и 1 в зарубежном изданиях)

Публикации в сборниках и материалах конференций: 1

Доклады на научных конференциях: 17

№ п/п	Библиографическое описание	Код	Q
I. Публикации по первоначальному плану НИР на 2018 год			
1	Митрофанов И.Г. Об освоении Луны. Часть 1: Русский космизм, лунная гонка и открытие «новой Луны», Земля и Вселенная, 2019, статья принята в печать.	66	-
2	Митрофанов И.Г. Об освоении Луны. Часть 2: “Новая Луна” в 21-ом веке, Земля и Вселенная, 2019, статья принята в печать.	66	-
3	Митрофанов И.Г. Нейтронное картографирование Марса с высоким пространственным разрешением: первые результаты эксперимента ФРЕНД проекта «Экзомарс». Научная сессия Общего собрания членов РАН 13-14 ноября 2018 г. Доклады, материалы. М., 2019. Сборник готовится к печати.	66	-
4	Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Санин. А. Б., Аникин А. А., Дьячкова М. В., Ильин А. Г., Карпушкина Н. Е., Малахов А. В. Перспективный нейтронный детектор с антисовпадательной защитой, Письма в журнал «Физика элементарных частиц атомного ядра», 2019, том 16, №2	66	Q3
5	Gabriel T. S. J., Hardgrove C., Czarnecki S., Rampe L., Rapin W., Achilles C. N., Sullivan D., Nowicki S. F., Thompson L., Litvak M., Mitrofanov I., Downs R. T. Water abundance of dunes in Gale crater, Mars from active neutron experiments & implications for amorphous phases, Geophysical Research Letters, 2018. https://doi.org/10.1029/2018GL079045	66	Q1
6	Grechnev V.V., Kiselev V.I., Kashapova L. K., Kochanov A. A., Zimovets I. V., Uralov A.M., Nizamov B.A., Grigorieva I.Y., Golovin D.V., Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Sanin A.B. Radio, Hard X-Ray, and Gamma-Ray Emissions Associated with a Far-Side Solar Event, Solar Physics, 2018, Volume 293:133. https://doi.org/10.1007/s1120	66	Q2
7	Litvak M.L., Mitrofanov I. G., Sanin A.B., Bakhtin B., Jun I. Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations, Planetary and Space Science, 2019, submitted for publication.	66	Q2

№ п/п	Библиографическое описание	Код	Q
8	Livengood T. A., Mitrofanov I. G., Chin G., Boynton W.V., Bodnarik J. G., Evans L. G., Harshman K. P., Litvak M. L., McClanahan T. P., Sagdeev R. Z., Sanin A. B., Starr R. D., Su J. J. Background and lunar neutron populations detected by LEND and average concentration of near-surface hydrogen near the Moon's poles, <i>Planetary and Space Science</i> , 2018, Volume 162, Pages 89-104. https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.12.004	66	Q2
9	Mitrofanov I., Malakhov A., Golovin D., Sanin A., Litvak M., Svedhem H. Surface variations of ground water on Mars: the first results of FRENDE neutron telescope onboard the ESA's Trace Gas Orbiter, <i>Nature</i> , 2019, submitted for publication.	66	Q1
10	Nizamov B.A., Zimovets I.V., Golovin D. V., Sanin A.B., Litvak M.L., Tretyakov V.I., Mitrofanov I.G., Kozyrev A.S. New estimation of non-thermal electron energetics in the giant solar flare on 28 October 2003 based on Mars Odyssey observations, <i>Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics</i> , 2018, Volume 179, Pages 484-493. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.08.004	66	Q2
11	Pozanenko A. S., Barkov M. V., Minaev P. Yu., Volnova A. A., Mazaeva E. D., Moskvitin A. S., Krugov M. A., Samodurov V. A., Loznikov V. M., and Lyutikov M. GRB 170817A Associated with GW170817: Multi-frequency Observations and Modeling of Prompt Gamma-Ray Emission, <i>The Astrophysical Journal Letters</i> , 2018, Volume 852, Number 2, https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa2f6	66	Q1
12	Shkevov R., Erokhin N.S., Loznikov V.M., Zolnikova N.N., Mikhailovskaya L.A. Surfatron acceleration of weakly relativistic electrons by electromagnetic wave packet in space plasma, <i>Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics</i> , 2018, Volume 177, Pages 266-273. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.001	66	Q2
13	Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev T., Matviichuk Y., Tomov B., Krastev K., Maltchev S., Dimitrov P., Mitrofanov I., Malakhov A., Golovin D., Mokrousov M., Sanin A.B., Litvak M., Kozyrev A., Tretyakov V., Nikiforov S., Vostrukhin A., Fedosov F., Grebennikova N., Zelenyi L., Shurshakov V., Drobishev S. Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDE instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit, <i>Icarus</i> , 2018, Volume 303, Pages 53-66. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034	66	Q1
14	Starr R.D., Litvak M.L., Petro N.E., Mitrofanov I.G., Boynton W.V., Chin G., Livengood T.A., McClanahan T.P., Sanin A.B., Sagdeev R. Z., Su J.J. Crater age and hydrogen content in lunar regolith from LEND neutron data, <i>Planetary and Space Science</i> , 2018, Volume 162, Pages 105-112. https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.08.001	66	Q2
15	Tate C.G., Moersch J., Mitrofanov I.G., Litvak M., Bellutta P., Boynton W. V., Drake D., Ehresmann B., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Hassler D.M., Jun I., Kozyrev A.S., Lisov D., Malakhov A., Ming D.W., Mischna M., Mokrousov M., Nikiforov S., Sanin A.B., Starr R., Vostrukhin A., Zeitlin C. Mars Science Laboratory Dynamic Albedo of Neutrons passive mode data and results from sols 753-1292. <i>Icarus</i> , accepted for publication.	66	Q1

№ п/п	Библиографическое описание	Код	Q
II. Дополнительные публикации после увеличения плана НИР			
16	Литвак М. Л., Санин А. Б. Вода в Солнечной системе, Успехи физических наук, 2018, т. 188, № 8, с. 865–880. doi: 10.3367/UFNr.2017.04.038277.	77	Q2
17	Litvak M.L., Barmakov Y.N., Belichenko S.G., Bestaev R.R., Bogolubov E.P., Gavrychenkov A.V., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Nosov A.V., Sanin A.B., Shvetsov V.N., Yurkov D.I., Zverev V.I. Associated particle imaging instrumentation for future planetary surface missions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018. https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.050	77	Q1
18	Mitrofanov I., Malakhov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozyrev A., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Tretyakov V., Vostrukhin A., Anikin A., Zelenyi L. M., Semkova J., Malchev S., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Koleva R., Dachev T., Krastev K., Shvetsov V., Timoshenko G., Bobrovniksky Y., Tomilina T., Benghin V., Shurshakov V. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter, Space Science Reviews, 2018, Volume 214:86. https://doi.org/10.1007/s1121	77	Q1
19	Tate C.G., Moersch J., Mitrofanov I.G., Litvak M., Bellutta P., Boynton W. V., Drake D., Ehresmann B., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Hassler D.M., Jun I., Kozyrev A.S., Lisov D., Malakhov A., Ming D.W., Mischna M., Mokrousov M., Nikiforov S., Sanin A.B., Starr R., Vostrukhin A., Zeitlin C. Results from the dynamic albedo of neutrons (DAN) passive mode experiment: Yellowknife Bay to Amargosa Valley (Sols 201-753). Icarus, 2018, Volume 299, Pages 513-537. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.022	77	Q1
20	Tate C.G., Moersch J., Jun I., Mitrofanov I., Litvak M., Boynton W.V., Drake D., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Kozyrev A.S., Kuzmin R., Lisov D., Maclennan E., Malakhov A., Mischna M., Mokrousov M., Nikiforov S., Sanin A.B., Starr R., Vostrukhin A. Observed diurnal variations in Mars Science Laboratory Dynamic Albedo of Neutrons passive mode data. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, Volume 892, Pages 70-83. https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.03.066	77	Q1
III. Публикации, подготовленные при поддержке РФФ			
21	Головин Д. В., Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Вострухин А. А., Дубасов П. В., Зонтиков А. О., Козырев А. С., Крылов А. Р., Крылов В. А., Мокроусов М. И., Репкин А. Н., Санин А. Б., Тимошенко Г. Н., Удовиченко К. В., Швецов В. Н. Сравнение чувствительности полупроводникового (HPGe) и сцинтилляционного (CeBr3) детекторов при измерении гамма-спектров, инициированных нейтронами в модели планетарного грунта, Письма в журнал «Физика элементарных частиц атомного ядра», 2018, т. 15, № 5 (217), с. 409-420.	66	Q3
22	Козырев А. С., Аникин А. А., Вострухин А. А., Головин Д. В., Граня К., Дубасов П. А., Зонтиков А. О., Куарати Ф., Лисов Д. И., Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Оуэнс А., Поспишил С., Санин А. Б., Славичек Т., Тимошенко Г. Н., Швецов В. Н. Моделирование космических экспериментов для ядерной планетологии: измерение относительных интенсивностей спектральных линий гамма-излучения, возникающих в	66	Q3

№ п/п	Библиографическое описание	Код	Q
	реакциях захвата тепловых нейтронов, Ядерная физика, 2018, № 5(81), с. 501-514. doi: 10.1134/S0044002718040098.		
23	Лисов Д.И., Литвак М.Л., Козырев А.С., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. Результаты обработки данных активных нейтронных измерений прибора ДАН на борту марсохода «Кьюриосити», Письма в астрономический журнал: астрономия и космическая астрофизика, 2018, №7 (44). С. 525-534. doi: 10.1134/S0320010818070033.	66	Q3
24	Митрофанов И.Г., Головин Д.В., Никифоров С.Ю., Санин А.Б., Аникин А.А., Дьячкова М.В., Карпушкина Н.Е., Лисов Д.И., Литвак М.Л., Мокроусов М.И., Тимошенко Г.Н., Крылов А.Р., Швецов В.Н., Мицин Г.В., Молоканов А.Г., Дубасов П.А., Зонтиков А.О. Результаты экспериментальной верификации гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами на протонном пучке ускорителя ОИЯИ, Письма в журнал «Физика элементарных частиц атомного ядра», 2018, статья принята в публикацию.	66	Q3
25	Митрофанов И.Г., Томилина Т.М., Головин Д.В., Козырев А.С., Вострухин А.А., Литвак М.Л., Малахов А.В., Мокроусов М.И., Бахтин Б.Н., Бобровницкий Ю.И., Лактионова М.М., Гребенников А. С., Сотов А. В. Исследования микрофонного эффекта для перспективных детекторов нейтронного и гамма-излучения космического применения и методы его подавления, Космические исследования, 2018, №3 (56), с. 228-232. https://doi.org/10.7868/S0023420618030056	66	Q4
26	Mitrofanov I. G. , A. B. Sanin A. B., Nikiforov S. Y., Golovin D. V., Anikin A. A., Djachkova M. V., Karpushkina N. E., Lisov D. I., Litvak M. L., Mokrousov M. I., Dubasov P. A., Zontikov A. 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, 2019, submitted for publication.	66	Q1
IV. ДОКЛАДЫ НА НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЯХ			
27	Митрофанов И.Г. ФРЕНД: первые результаты нейтронного картографирования Марса. Дни космической науки – 2018, 4-6 октября 2018 г., ИКИ РАН. http://dni.cosmos.ru/iki-space-science-days-2018.pdf	-	-
28	Czarnecki S., Hardgrove C., Gabriel T.S.J., Litvak M., Mitrofanov I., Lisov D., Nowicki S.F., Rapin W., New Analysis of Hydrogen Abundance in the Sheepbed Member of Yellowknife Bay Using In Situ Geochemical Data, 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.2784.	-	-
29	Djachkova, M.; Mitrofanov, I.; Litvak, M.; Sanin, A.; Potentially interesting landing sites in the Polar Regions of the Moon, 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.15290.	-	-
30	Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Tretiyakov V.I. Landing site selection process for future Moon polar missions, The Ninth Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute, Moscow, Russia, 8-12 October, 2018, 9MS3-MN-10, p. 192. https://ms2018.cosmos.ru/docs/9m-s3-abstract-book.pdf	-	-
31	Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Litvak M.L., Sanin A.B., Lisov D.I. Correlation Between Subsurface Water from the Passive	-	-

№ п/п	Библиографическое описание	Код	Q
	Measurements of the DAN Instrument (NASA/MSL) and Hydrated/Hydroxylated Minerals from CRISM (NASA/MRO) Data Products in Gale Crater, 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.2379.		
32	Kozyrev A., Litvak M., Mitrofanov I., Bogolubov E., Bestaev R., Shvetsov V., Timoshenko G. Associated-particle imaging technique application for study of planetary subsurface soil elemental composition, 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.13754.	-	-
33	Lisov D.I., Mitrofanov I.M., Sanin A.B., Litvak M.L. Low-Fe regions along the Curiosity path in the Gale crater based on DAN active neutron probing data, The Ninth Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute, Moscow, Russia, 8-12 October, 2018, 9MS3-MS-05, p. 28. https://ms2018.cosmos.ru/docs/9m-s3-abstract-book.pdf	-	-
34	Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Tretyakov V.I. Lunar round-trip mission: objectives, The Ninth Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute, Moscow, Russia, 8-12 October, 2018, 9MS3-MN-15, p. 198. https://ms2018.cosmos.ru/docs/9m-s3-abstract-book.pdf	-	-
35	Litvak Maxim, Sanin Anton, Mitrofanov Igor, Malakhov Alexey, Nikiforov Sergey, Lisov Denis, Djachkova Maya Water in the Gale Crater, as Observed by Dan Instrument Onboard the Curiosity Rover 42nd COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 July 2018, in Pasadena, California, USA, Abstract id. B4.1-13-18.	-	-
36	Malakhov Alexey, Mitrofanov Igor, Litvak Maxim, Sanin Anton, Nikiforov Sergey, Golovin Dmitry, Neutron detectors on Mars: from HEND onboard Mars Odyssey to ADRONs onboard ExoMars-2022. Major results, first data and unresolved issues, 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.10427.	-	-
37	Malakhov A.V., Mitrofanov I.G., Golovin D.V., Sanin A.B., Litvak M.L.. Fine Resolution Epithermal Neutron detector onboard ExoMars Trace Gas Orbiter: Mars neutron mapping first results and new areas of interest, The Ninth Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute, Moscow, Russia, 8-12 October, 2018, 9MS3-MS-02, p. 22. https://ms2018.cosmos.ru/docs/9m-s3-abstract-book.pdf	-	-
38	Malakhov A.V., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Nikiforov S.Y., Golovin D.V., Neutron Detectors on Mars: From HEND Onboard Mars Odyssey to ADRONs Onboard ExoMars-2022. Major Results, First Data, and Unresolved Issues, 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.2117.	-	-
39	Mitrofanov Igor, Litvak Maxim, Kozyrev Alexander, Sanin Anton, Golovin Dmitry, Semkova Jordanka, Dachev Tsvetan, Koleva Rositza, Malakhov Alexey Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRIEND) onboard ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. First data and future results., 42nd COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 July 2018, in Pasadena, California, USA, Abstract id. B4.1-17-18.	-	-
40	Mitrofanov I.G. So many discoveries of water on the Moon, The Ninth Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute, Moscow, Russia, 8-12 October, 2018, 9MS3-MN-05, p. 183. https://ms2018.cosmos.ru/docs/9m-s3-abstract-book.pdf	-	-

№ п/п	Библиографическое описание	Код	Q
41	Nikiforov S.Y., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.S., Lisov D.I., Djachkova M.V. Water Distribution in Martian Subsurface Based on the Passive Measurements of the DAN Instrument Onboard NASA/MSL, 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.2127.	-	-
42	Sanin A., Mitrofanov I., Litvak, M. The observation and modeling of Galactic Cosmic Rays in the nuclear planetology application, 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria, p.8829.	-	-
43	Sanin, A.; Litvak, M.; Tretiyakov, V.; Mitrofanov, I.; Djachkova, M.; “Polar regions on the Moon as locations for future outposts”, 42nd COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 July 2018, in Pasadena, California, USA, Abstract id. B3.1-7-18.	-	-