

УДК 520.6

ПРИБОР АДРОН-ЛР ДЛЯ АКТИВНОГО НЕЙТРОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СОСТАВА ЛУННОГО ВЕЩЕСТВА

© 2021 г. Д. В. Головин^{a, *}, М. И. Мокроусов^a, И. Г. Митрофанов^a, А. С. Козырев^a,
М. Л. Литвак^a, А. В. Малахов^a, С. Ю. Никифоров^a, А. Б. Санин^a, Ю. Н. Бармаков^{b, c},
Е. П. Боголюбов^b, С. Э. Шоленинов^b, Д. И. Юрков^{b, c}

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

^cНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

*e-mail: golovin@np.cosmos.ru

Поступила в редакцию 06.07.2021 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 04.08.2021 г.

В статье представлены основные научные задачи и приведено описание прибора АДРОН-ЛР (активный детектор нейтронов и гамма-лучей), который разработан в ИКИ РАН для российского лунного посадочного аппарата Луна-25. Описана методика проведения измерений и представлены результаты наземных отработок прибора с моделями лунного грунта с различным содержанием водорода, подтвердившие высокую чувствительность метода активного нейтронного зондирования для оценки содержания воды и основных пороодообразующих элементов в планетном веществе.

Ключевые слова: Луна, Луна-25, гамма- и нейтронная спектрометрия, ядерная планетология, нейтронный генератор, приполярные области, лунный грунт, водяной лед

DOI: 10.31857/S0320930X21060049

ВВЕДЕНИЕ

Определение элементного состава вещества небесных тел с применением методов ядерной физики является одной из важных задач планетных исследований. Информация о химическом составе грунта, полученная с помощью гамма-спектрометрии, и о присутствии в нем воды, полученная на основе нейтронного зондирования, позволяет судить о процессах образования планет и также о геологических процессах формирования их поверхности в разные периоды времени их эволюции (см., например, Boynton и др., 2004; Mitrofanov и др., 2002). Также, эти данные необходимы для подготовки будущих пилотируемых экспедиций и для выяснения условий добычи в отдаленной перспективе полезных ископаемых на Луне, Марсе и астероидах (Митрофанов, Зеленый, 2019).

За последнее время были проведены несколько космических экспериментов по определению состава поверхности небесных тел с борта орбитальных космических аппаратов. Первые ядерно-физические эксперименты для изучения Луны были проведены на орбитальных аппаратах Луна-10 и Луна-12 (Сурков, 1985) и на орбитальных пилотируемых кораблях программы NASA Apollo (Тромбка и др., 1977). Эти исследования были продол-

жены в лунных проектах NASA Lunar Prospector (Prettyman и др., 2006) и Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) (Mitrofanov и др., 2010a), на японском орбитальном аппарате KAGUYA (Hasebe и др., 2010), на китайском спутнике Chang'E-2 (Ma и др., 2012). Впервые спектрометрия гамма-лучей поверхности Марса была выполнена прибором ВГС проекта Фобос-2 (D'Uston и др., 1989) и прибором GRS проекта NASA Mars Odyssey (Boynton и др., 2004). По данным нейтронного картографирования Марса с приборами ХЕНД и MONS этого же проекта было обнаружено присутствие значительной доли воды (Mitrofanov и др., 2002; Feldman и др., 2002). Космические аппараты NASA NEAR и MESSENGER провели ядерно-физические исследования астероида Эрос (Тромбка и др., 2000) и планеты Меркурий (Lawrence и др., 2013). Данные, полученные в ходе этих миссий, позволили построить карты распространенности элементов и грунтовой воды в приповерхностном слое этих небесных тел.

Относительно меньшее развитие получили ядерно-физические исследования небесных тел с борта посадочных космических аппаратов непосредственно на поверхности. Пионерские ядерно-физические исследования вещества непосредственно на поверхности Венеры были прове-

дены в отечественных проектах Венера-9 и Венера-10 (Surkov, 1977). Поскольку у этой планеты нет наведенного гамма- и нейтронного излучения от бомбардировки галактическими космическими лучами (так как их не пропускает толстая атмосфера этой планеты) в указанных экспериментах измерялась интенсивность собственного гамма-излучения от естественных радиоактивных изотопов калия, тория и урана.

Существенным преимуществом применения ядерно-физических приборов непосредственно на поверхности планеты по сравнению с орбитальными измерениями является возможность применения стационарных и импульсных источников нейтронов для зондирования вещества непосредственно в точке исследования. Это позволяет увеличить перечень идентифицируемых элементов и повысить точность оценки их массовой доли за счет увеличения потока зондирующих нейтронов и динамического характера импульсного зондирования. Использование нейтронного генератора дает возможность применить в космических исследованиях метод нейтронного каротажа, который широко используется в геофизических исследованиях. Первым активным ядерно-физическим экспериментом в планетных исследованиях стал ДАН (Динамическое Альbedo Нейтронов) на борту марсохода NASA Curiosity (Litvak и др., 2008; Mitrofanov и др., 2012). Импульсный нейтронный генератор (ИНГ) этого прибора излучает короткие (~1 мкс) импульсы нейтронов с энергией 14 МэВ, которые проникают в грунт на глубину до 1 м. До выхода из-под поверхности нейтроны теряют энергию вследствие столкновений с ядрами, причем при наличии в грунте водорода эффективность замедления существенно возрастает. Анализ данных измерений выходящих потоков тепловых и эпитепловых (надтепловых) нейтронов позволяет оценить концентрацию водорода, и с учетом того, что водород входит в состав молекул воды, определить массовую долю воды в грунте вдоль трассы движения марсохода (ссылки).

В данной работе представлено описание ядерно-физического эксперимента АДРОН-ЛР для активного нейтронного зондирования лунного вещества, в котором кроме измерения после импульсных потоков, выходящих с поверхности нейтронов, также регистрируется послеимпульсное гамма-излучение ядер лунного вещества. Анализ данных этих измерений позволит не только оценить массовую долю воды в точке посадки космического аппарата Луна-25, но также определить элементный состав полярного реголита.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ ПРИБОРА АДРОН-ЛР

Научная аппаратура АДРОН-ЛР разработана в ИКИ РАН на основе опыта создания приборов ДАН для марсохода NASA Curiosity, который успешно работает на поверхности Марса с августа 2012 г. (Mitrofanov и др., 2012) и МГНС для межпланетного аппарата ESA BepiColombo для исследования Меркурия (Mitrofanov и др., 2010b). Основными научными задачами космического эксперимента АДРОН-ЛР являются:

1. Определение содержания воды (вероятно, в форме льда) в поверхностном слое грунта на месте посадки на глубине до 1 м.
2. Определение элементного состава лунного грунта в поверхностном слое грунта на месте посадки на глубине до 1 м.

Прибор АДРОН-ЛР состоит из двух отдельных блоков (рис. 1):

- блока детекторов и электроники с гамма- и нейтронным спектрометром;
- блока импульсного нейтронного генератора ИНГ-10Л.

Суммарная масса прибора составляет 6.1 кг. Энергопотребление в активном режиме нейтронного зондирования равно 20 Вт.

В активном режиме работы прибора АДРОН-ЛР блок ИНГ излучает нейтронные импульсы, облучая быстрыми нейтронами поверхность под прибором. В результате взаимодействия с ядрами основных пороодообразующих элементов нейтроны теряют свою энергию до эпитепловых и тепловых значений. Часть нейтронов вылетает обратно из-под поверхности и регистрируется нейтронными детекторами АДРОН-ЛР в виде временного отклика (кривая затухания с характерной длительностью в сотни микросекунд). Процесс замедления быстрых нейтронов в облучаемом грунте определяется наличием ядер легких элементов, в особенности водорода, поскольку его масса близка к массе нейтрона и передача энергии при рассеянии наиболее эффективна. Разная концентрация и распределение по глубине ядер водорода существенно влияют на процесс замедления, что проявляется в виде значительных вариаций амплитуды и формы временного профиля выходящих нейтронов и позволяет оценить содержание воды в приповерхностном слое грунта (до глубин порядка 1 м).

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

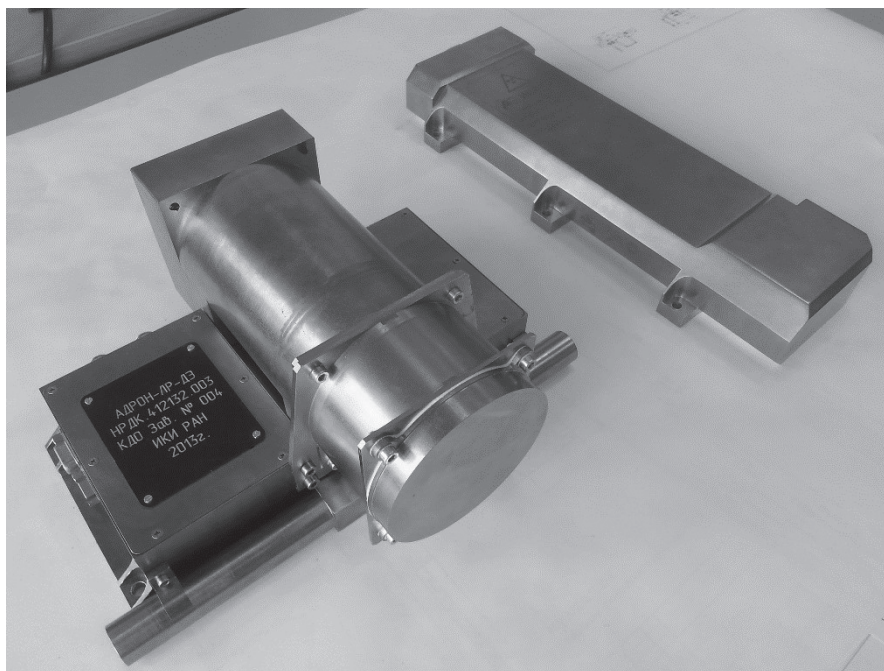


Рис. 1. Блок детекторов и электроники (слева) и блок нейтронного генератора прибора АДРОН-ЛР (справа).

часов после активации нейтронами, также излучают гамма-линии определенных энергий. Таким образом, регистрация гамма-спектров с разными временными задержками относительно исходных импульсов позволяет выделить гамма-линии от разных реакций, уменьшить фон наведенного излучения аппарата и облегчить процесс отождествления различных гамма-линий. Так, например, при захвате теплового нейтрона ядром водорода излучается гамма-линия с энергией 2.22 МэВ, поэтому для оценки содержания воды следует исследовать спектр гамма-лучей во временном окне 100–1000 мкс после нейтронного импульса, когда поток тепловых нейтронов максимален.

Для регистрации гамма-излучения используется сцинтилляционный детектор на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Такой детектор является оптимальным для данного эксперимента с точки зрения его технических характеристик (надежность работы, простота реализации, масса и потребляемая мощность) и измерительных свойств. Кристалл имеет форму цилиндра диаметром 7.6 и длиной 5.1 см. Детектор обладает спектральным разрешением 3.5% на энергии 662 кэВ и эффективность регистрации гамма-квантов не менее 15% на энергии 6 МэВ. Для спектрометрии используются 4096 спектральных каналов, покрывающих диапазон от 200 кэВ до 10 МэВ. При работе в активном режиме используются 64 логарифмических временных интервалов для записи гамма-спектров с различными временными задержками по отношению к моменту излучения

нейтронного импульса блоком ИНГ. Одно измерение формируется на основе суммирования спектров излучения в отдельных временных интервалах от большого числа импульсов от ИНГ.

Нейтроны регистрируются двумя пропорциональными счетчиками на основе ^3He с давлением 20 атмосфер, которые способны регистрировать нейтроны с энергией от долей эВ до 1 кэВ по реакции захвата $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$. Один из счетчиков окружен кадмиевым экраном, который не пропускает тепловые нейтроны с энергией менее 0.4 эВ. Таким образом, первый нейтронный детектор регистрирует все нейтроны в диапазоне от тепловых энергий до 1 кэВ, а второй – только эпитепловые нейтроны с энергией выше 0.4 эВ. Поэтому разница в темпе счета между двумя нейтронными детекторами соответствует вкладу тепловых нейтронов.

Для каждого нейтронного детектора электроника позволяет накапливать 16-канальные спектры отсчетов и строить временные профили отсчетов тепловых и эпитепловых нейтронов в 64 логарифмических временных интервалах после импульсов нейтронного генератора (таких же, как и для записи спектров гамма-лучей). Параметры временной шкалы для регистрации после импульсного излучения можно регулировать с помощью команд, стандартной является шкала с полной продолжительностью 66 мс от начала первого интервала длительностью 5 мкс до завершения 63-го интервала длительностью 7.3 мс. В последнем 64-ом интервале временной шкалы реги-

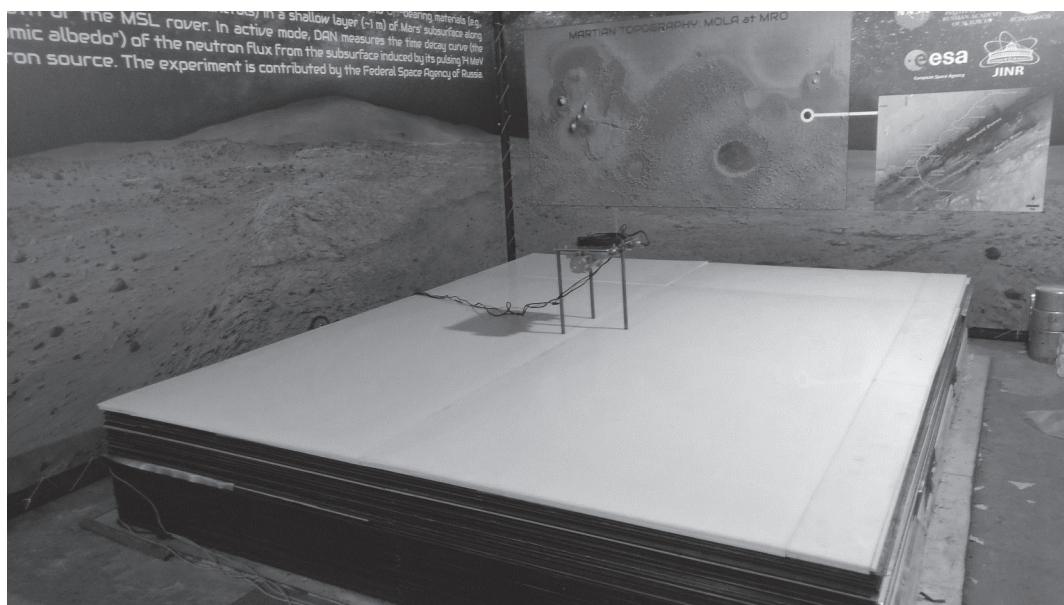


Рис. 2. Схема размещения прибора АДРОН-ЛР на “толстой мишени”, имитирующей лунное вещество.

стрируется фоновое излучение нейтронов и гамма-лучей до следующего импульса от генератора.

Блок импульсного нейтронного генератора ИНГ-10Л представляет собой отдельное устройство, соединенное с блоком нейтронного и гамма-спектрометра с помощью двух межблочных кабелей (питания и телеметрии). ИНГ включает нейтронную трубку и высоковольтную электронику для выработки ускоряющего напряжения ~ 120 кэВ. Импульс нейтронов с энергией 14 МэВ генерируется при столкновении ускоренных ионов дейтерия с мишенью из трития в результате ядерной реакции $D + T = {}^4\text{He} + n$. ИНГ способен вырабатывать нейтронные импульсы с интенсивностью до 10^7 нейтронов в импульсе и с частотой до 10 Гц. Длительность (полная ширина на полувысоте) отдельного импульса составляет около 1 мкс. Эпитепловые нейтроны и гамма-лучи от реакций неупругого рассеяния генерируются в облучаемом грунте в течение первых десятков микросекунд после нейтронного импульса, послеимпульсное излучение тепловых нейтронов и гамма-лучи от ядерных реакций захвата генерируются в течение первых сотен микросекунд после нейтронного импульса. Блок ИНГ разработан во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматике им. Н.Л. Духова. Его прототип был создан для первого применения в составе прибора ДАН на борту ровера Curiosity (см. выше).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ОТРАБОТОК

Ниже представлены результаты наземных отработок эксперимента АДРОН-ЛР для различных моделей планетного вещества в качестве облучаемой “толстой мишени”. Все работы были выполнены в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) на специально созданном экспериментальном стенде. При проведении физических измерений взаимное расположение блоков прибора и их высота над поверхностью полностью соответствовали предполагаемой конфигурации прибора на поверхности Луны (рис. 2). Эксперименты сопровождались численными расчетами кривых затухания нейтронов и гамма-излучения при воздействии нейтронных импульсов от ИНГ на модель лунного грунта.

В первой части экспериментальной отработки проводились измерения профиля затухания гамма-линии водорода 2223 кэВ для двух моделей лунного грунта с различным содержанием воды. Основой для модели лунного грунта было выбрано силикатное стекло, содержащее оксиды металлов и имеющее элементный состав, близкий к составу сухого лунного реголита. Общая высота мишени составляла около 60 см, что является достаточным с учетом глубины проникновения нейтронов с энергией 14 МэВ внутрь планетного грунта (см. Sanin и др., 2015). Для имитации воды поверх стекла был помещен слой полиэтилена толщиной 1 см для первого измерения и 3 см для второго. Блоки прибора располагались в центре “толстой мишени” на механической оснастке, имитирующей научную палубу космического ап-

парата на высоте около 30 см над поверхностью (см. рис. 2).

Длительность каждого из двух измерений в активном режиме работы составляла 15 мин, что соответствует характерному времени сеанса активных измерений на поверхности Луны. На рис. 3 представлены кривые затухания гамма-излучения линии водорода 2223 кэВ для моделей со слоем полиэтилена с толщиной 1 и 3 см.

Кривые затухания ожидаемо идут практически параллельно друг другу, причем темп счета в линии 2223 кэВ в случае более “влажной” модели вещества (3 см полиэтилена) приблизительно в 4 раза превышает темп счета для “сухой” мишени (1 см полиэтилена), что соответствует различию содержания водорода в этих двух моделях грунта.

Во второй части программы экспериментальной отработки проводились измерения кривых затухания потоков тепловых нейтронов и гамма-излучения в линиях радиационного захвата водорода (2223 кэВ) и кремния (3539 кэВ) для моделей лунного вещества с разной глубиной залегания водородосодержащего слоя. Форма профилей интенсивности гамма-линий, генерируемых при радиационном захвате тепловых нейтронов ядрами вещества, зависит не только от концентрации водорода, но также от глубины водородосодержащего слоя в веществе. Прибор располагался сверху по центру модели лунного вещества аналогично предыдущему эксперименту. Первое измерение проводилось для модели со слоем полиэтилена толщиной 5 см на глубине 5 см от поверхности. Во втором случае водородосодержащий слой находился на глубине 14 см. Длительность каждого из двух измерений в активном режиме работы генератора с частотой 10 Гц составила стандартные 15 мин. Спектр гамма-лучей, зарегистрированный прибором АДРОН-ЛР во временном интервале 1–3 мс для первой модели лунного вещества, представлен в качестве примера на рис. 4.

Численное моделирование проведенных измерений было выполнено с помощью специализированного пакета программ MCNPX, который достаточно достоверно описывает процессы переноса и рождения частиц в подобных ядерно-физических экспериментах (Sanin и др., 2015). В расчете были смоделированы основные узлы прибора АДРОН-ЛР и элементы экспериментального стенда, включая “толстую мишень” для моделей грунта.

Результаты измерений кривых затухания потока тепловых нейтронов и соответствующих численных расчетов представлены на рис. 5. Видны явные различия в положении и амплитуде максимумов кривых затухания, также наблюдается значимое различие в их форме. Значение максимума кривой затухания для модели вещества с заглублением водородосодержащего слоя на 5 см в 2.5 раза

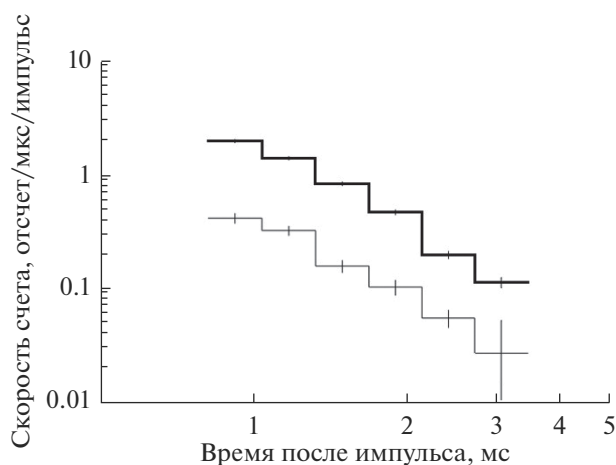


Рис. 3. Кривые затухания гамма-излучения в линии 2223 кэВ для моделей со слоем полиэтилена толщиной 1 см (тонкая линия) и 3 см (толстая линия).

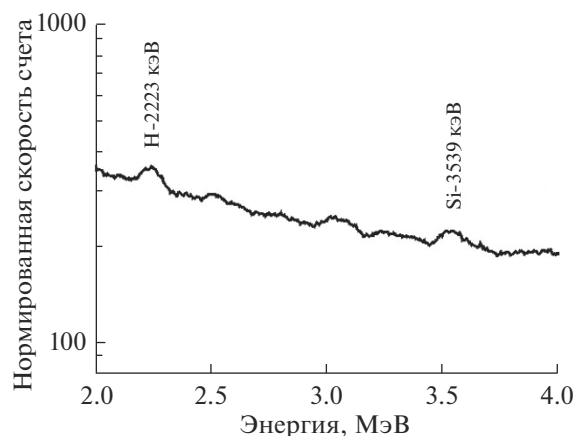


Рис. 4. Энергетический спектр гамма-лучей в диапазоне энергий 2–4 МэВ во временном интервале 1–3 мс после импульса ИНГ для модели лунного вещества со слоем полиэтилена толщиной 5 см на глубине 5 см от поверхности.

больше, чем для модели с заглублением 14 см. Поток тепловых нейтронов для модели с меньшим заглублением водородосодержащего слоя достигает максимума на 0.18 мс после импульса и на 0.25 мс для модели с большим заглублением. Статистические ошибки измерений малы, и практически не превышают толщины линии (рис. 5).

Результаты измерений кривых затухания потока гамма-излучения в линии водорода 2223 кэВ во временном интервале 1–3 мс и соответствующие данные численных расчетов представлены на рис. 6.

Следует отметить достаточно хорошее согласие между экспериментом и теорией. Значения кривой затухания для линии 2223 кэВ в случае с меньшей глубиной залегания полиэтилена при-

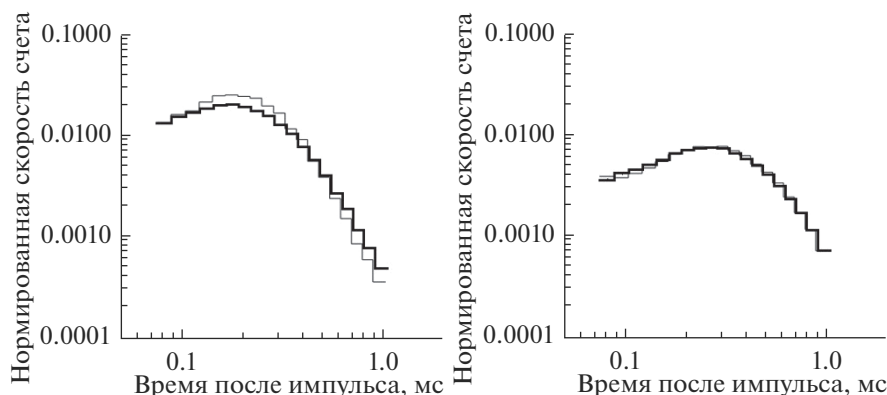


Рис. 5. Кривые затухания потока тепловых нейтронов для моделей грунта с заглублением водородосодержащего слоя на 5 см (слева) и на 14 см (справа) по результатам измерений (толстая линия) и численным расчетам (тонкая линия).

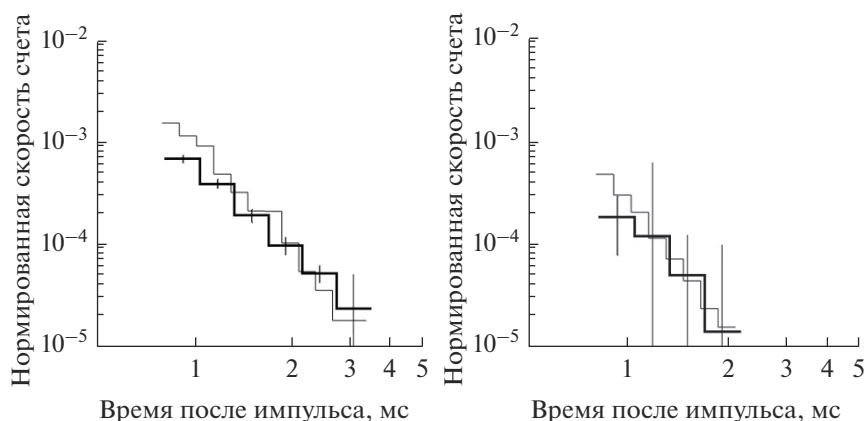


Рис. 6. Кривые затухания потока гамма-излучения в линии водорода 2223 кэВ для моделей грунта с заглублением водородосодержащего слоя на 5 см (слева) и на 14 см (справа) по результатам измерений (толстая линия) и численным расчетам (тонкая линия).

близительно в 4 раза больше значений кривой для большей глубины. Из этих данных видно, что ошибки измерений содержания водорода по гамма-линии 2223 кэВ выше, чем при измерении кривых затухания нейтронов. Таким образом, нейтронный метод определения содержания водорода в лунном веществе представляется более чувствительным, однако измерение интенсивности линии водорода показывает истинное содержание водорода в изучаемом веществе и исключает необходимость учитывать эффект поглощения тепловых нейтронов железом и хлором.

Результаты измерений кривых затухания потока гамма-излучения в линии кремния 3539 кэВ во временном интервале 1–3 мс, и численных расчетов представлены на рис. 7.

В отличие от кривых затухания для линии водорода, значения кривых затухания для линии кремния различаются только в полтора–два раза для разных глубин залегания водородосодержа-

щего слоя, что объясняется различным распределением по глубине атомов водорода и кремния в веществе мишени.

Наземная экспериментальная отработка показала, что оценки интенсивности гамма-линий, накопленных гамма-спектрометром за 15 мин работы в активном режиме, имеют большую статистическую погрешность. Однако при проведении космического эксперимента этот недостаток будет устранен увеличением количества сеансов работы прибора АДРОН-ЛР на лунной поверхности. Космический аппарат будет находиться в одном и том же месте, что позволит добиться достаточно высокой статистической достоверности выполненных измерений.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Детальная обработка данных космического ядерно-физического эксперимента, как правило,

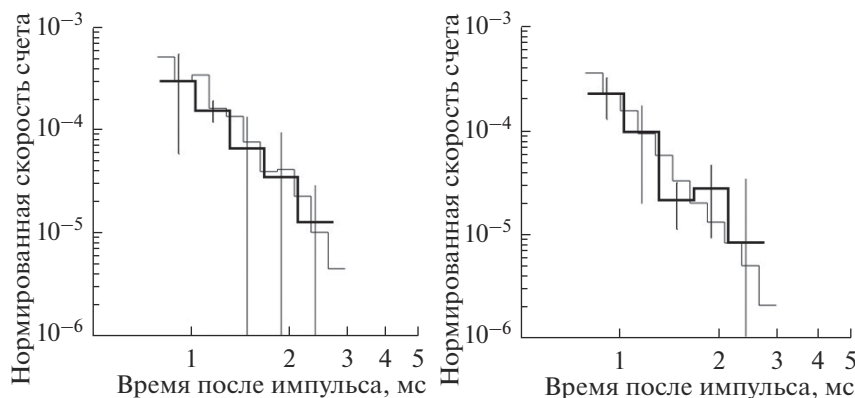


Рис. 7. Кривые затухания гамма-излучения в линии кремния 3539 кэВ для моделей грунта с заглублением водородо-содержащего слоя на 5 см (слева) и на 14 см (справа) по результатам измерений (толстая линия) и численным расчетам (тонкая линия).

основана на анализе временных профилей нейтронов и энергетических спектров гамма-лучей, основанном на сопоставлении с численными модельно-зависимыми предсказаниями для соответствующих временных профилей для грунтов с различным составом и распределением воды по глубине. При построении численных моделей параметры, определяющие состав грунта и распределение воды, являются свободными. В результате перебора моделей грунта с различными параметрами выбирается тот набор параметров, для которого выполняется наилучшее согласие между экспериментом и численными предсказаниями. Обычно для сравнения данных измерений с предсказанными значениями применяются критерий Пирсона (см., например, Lampton и др., 1976).

Данный подход требует существенных временных затрат на численное моделирование процесса взаимодействия исходных нейтронов с веществом для создания баз данных, содержащих дискретное многообразие предсказаний для кривых после импульсного излучения альбедных нейтронов гамма-лучей для различных моделей грунта с дискретным набором параметров. Данные измерений предъявляются всей совокупности предсказанных значений и наилучшие значения параметров модели определяются из условия минимума функционала, построенного в соответствии с распределением χ^2 . Для выбора наилучшей модели и для оценки погрешности для значений параметров применяются известные правила для применения критерия Пирсона при обработке данных экспериментов (Lampton и др., 1976). Полученные наилучшие значения параметров модели грунта рассматриваются как результаты измерений его состава и свойств.

Подобная методика поиска наилучшего согласия между экспериментальными данными и численными расчетами успешно использовалась при

обработке данных предшествовавших ядерно-физических экспериментов, таких как ХЕНД и ДАН (Митрофанов и др., 2004; Mitrofanov и др., 2014; Sanin и др., 2015). Аналогичный подход будет использован для выбора наиболее подходящей модели лунного грунта при сопоставлении измеренной формы кривой затухания гамма-излучения для линий детектируемых элементов.

Авторы выражают благодарность специалистам Всероссийского научно-исследовательского института им. Н.Л. Духова за создание нейтронного генератора и специалистам АО “НПО им. Лавочкина” за совместную работу по разработке и испытаниям прибора АДРОН-ЛР.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Тема ОСВОЕНИЕ, № АААА-А18-118012290370-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Козырев А.С., Санин А.Б., Третьяков В.И., Гриньков В.Ю., Бойнтон У.В., Шинохара К., Хамара Д., Саундерс Р.С. Оценка содержания воды в грунте Марса по данным нейтронных измерений прибора ХЕНД на борту космического аппарата 2001 Mars Odyssey // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. № 4. С. 291–303.
- Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М. Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы // Земля и Вселенная. 2019. № 4(328). С. 16–37.
- Сурков Ю.А. Космохимические исследования планет и спутников. М.: Наука, 1985. с. 140–153.
- Boynton W.V., Taylor G.J., Evans L.G., Reedy R.C., Starr R., Janes D.M., Kerry K.E., Drake D.M., Kim K.J., Williams R.M.S., Crombie M.K., Dohm J.M., Baker V., Metzger A.E., Karunatillake S., Keller J.M., Newsom H.E., Arnold J.R., Briuckner J., Englert P.A.J., Gasnault O., Sprague A.L., Mitrofanov I., Squyres S.W., Trombka J.I., d’Uston L., Wuhanke H., Hamara D.K. Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the low- and mid-latitude regions of Mars // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Iss.

- E12. CiteID E12S99.
<https://doi.org/10.1029/2007JE002887>
- D'Uston C., Atteia J.L., Barat C., Chernenko A., Dolidze V. Observation of the γ -ray emission from the martian surface by the APEX experiment // *Nature*. 1989. V. 341. Iss. 6243. P. 598–600.
<https://doi.org/10.1038/341598a0>
- Feldman W.C., Boynton W.V., Tokar R.L., Prettyman T.H., Gasnault O., Squyres S.W., Elphic R.C., Lawrence D.J., Lawson S.L., Maurice S., McKinney G.W., Moore K.R., Reedy R.C. Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297. Iss. 5578. P. 75–78.
<https://doi.org/10.1126/science.1073541>
- Hasebe N., Shibamura E., Miyachi T., Takashima T., Kobayashi M., Okudaira O., Yamashita N., Kobayashi S., Karouji Y., Hareyama M., Kodaira S., Hayatsu K., Iwabuchi K., Nemoto S., Sakurai K., Komatsu S., Miyajima M., Ebihara M., Hihara T., Arai T., Sugihara T., Takeda H., D'Uston C., Gasnault O., Diez B., Forni O., Maurice S., Reedy R. High performance germanium gamma-ray spectrometer on Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA) // *Trans. Space Technol. Japan*. 2010. V. 7. P. Pk 35–Pk 41.
- Lampton M., Margon B., Bowyer S. Parameter estimation in X-ray astronomy // *Astrophys. J.* 1976. V. 208. P. 177–190.
<https://doi.org/10.1086/154592>
- Lawrence David J., Feldman William C., Goldsten John O., Maurice Sylvestre, Peplowski Patrick N., Anderson Brian J., Bazel David, McNu, Ralph L., Nittler Larry R., Prettyman Thomas H., Rodgers Douglas J., Solomon Sean C., Weider Shoshana Z. Evidence for Water Ice near Mercury's North Pole from MESSENGER Neutron Spectrometer Measurements // *Science*. 2013. V. 339. Iss. 6117. P. 292.
<https://doi.org/10.1126/science.1229953>
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Barmakov Yu.N., Behar A., Bitulev A., Bobrovniksky Yu., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Bragin S.I., Churin S., Grebennikov A.S., Konovalov A., Kozyrev A.S., Kurdumov I.G., Krylov A., Kuznetsov Yu.P., Malakhov A.V., Mokrousov M.I., Ryzhkov V.I., Sanin A.B., Shvetsov V.N., Smirnov G.A., Sholeninov S., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tuvakin D.V., Tret'yakov V.I., Troshin V.S., Uvarov V.N., Varenikov A., Vostrukhin A. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8. № 3. P. 605–612.
- Ma T., Chang J., Zhang N., Jian W., Cai M.S., Gong Y.Z., Tang A.S., Zhag R.J., Wang N.S., Yu M., Mao J.P., Hu Y.M., Xu A., Zhu M.H. Gamma-Ray Spectrometer On-board Chang'E-2 // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2012. V. 726. P. 113–115.
- Mitrofanov I., Anfimov D., Kozyrev A., Litvak M., Sanin A., Tret'yakov V., Krylov A., Shvetsov V., Boynton W., Shinohara C., Hamara D., Saunders R.S. Maps of subsurface hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297. P. 78–81.
<https://doi.org/10.1126/science.1073616>
- Mitrofanov I.G., Bartels A., Bobrovniksky Y.I., Boynton W., Chin G., Enos H., Evans L., Floyd S., Garvin J., Golovin D.V., Grebennikov A.S., Harshman K., Kazakov L.L., Keller J., Konovalov A.A., Kozyrev A.S., Krylov A.R., Litvak M.L., Malakhov A.V., McClanahan T., Milikh G.M., Mokrousov M.I., Ponomareva S., Sagdeev R.Z., Sanin A.B., Shevchenko V.V., Shvetsov V.N., Starr R., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tret'yakov V.I., Trombka J., Troshin V.S., Uvarov V.N., Varennikov A.B., Vostrukhin A.A. Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2010a. V. 150. Iss. 1. P. 183–207.
<https://doi.org/10.1007/s11214-009-9608-4>
- Mitrofanov I.G., Kozyrev A.S., Konovalov A., Litvak M.L., Malakhov A.A., Mokrousov M.I., Sanin A.B., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.V., Bobrovnikskiy Yu.I., Tomilina T.M., Gurvits L., Owens A. The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) on board the planetary orbiter of the BepiColombo mission // *Planet. and Space Sci.* 2010b. V. 58. P. 116–124.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.01.005>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Barmakov Yu.I., Behar A., Bobrovniksky Yu.I., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Harshman K., Kan E., Kozyrev A.S., Kuzmin R.O., Malakhov A.V., Mokrousov M.I., Ryzhkov V.I., Sanin A.B., Smirnov G.A., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tret'yakov V.I., Varenikov A.B., Vostrukhin V. Experiment for measurements of Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) onboard NASA's Mars science laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 559–582.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9924>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Starr R.D., Lisov D.I., Kuzmin R.O., Behar A., Boynton W.V., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Milliken R.E., Mischna M.A., Moersch J.E., Tate C.G. Water and chlorine content in the Martian soil along the first 1900 m of the Curiosity rover traverse as estimated by the DAN instrument // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. V. 119. Iss. 7. P. 1579–1596.
- Prettyman T.H., Hagerty J.J., Elphic R.C., Feldman W.C., Lawrence D.J., McKinney G.W., Vaniman D.T. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. E12007.
<https://doi.org/10.1029/2005JE002656>
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Lisov D.I., Starr R., Boynton W., Behar A., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A.S., Kuzmin R.O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M.I., Nikiforov S., Shvetsov V.N., Tate C., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A. Data processing of the active neutron experiment DAN for a Martian regolith investigation // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2015. V. 789. P. 114–127.
- Surkov I.A. Geochemical studies of Venus by Venera 9 and 10 automatic interplanetary stations // *Lunar Sci. Conf.*, 8th, Houston, Tex., March 14–18. 1977. Proc. V. 3. (A78-41551 18-91). P. 2665–2689.
- Trombka J., Dyer C.S., Evans L.G., Bielefeld M.J., Seltzer S.M., Metzger A.E. Reanalysis of the Apollo cosmic gamma-ray spectrum in the 0.3 to 10 MeV energy region // *Astrophys. J.* 1977. V. 212. Pt 1. P. 925–935.
<https://doi.org/10.1086/155117>
- Trombka J.I., Squyres S.W., Brückner J., Boynton W.V., Reedy R.C., McCoy T.J., Gorenstein P., Evans L.G., Arnold J.R., Starr R.D., Nittler L.R., Murphy M.E., Mikheeva I., McNutt R.L., McClanahan T.P., McCartney E., Goldsten J.O., Gold R.E., Floyd S.R., Clark P.E., Burbine T.H., Bhargoo J.S., Bailey S.H., Petaev M. The elemental composition of asteroid 433 Eros: Results of the NEAR-Shoemaker X-ray spectrometer // *Science*. 2000. V. 289. Iss. 5487. P. 2101–2105.
<https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2101>