

УДК 520.6

ГАММА- И НЕЙТРОННЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА БОРТ ЛУНОХОДА

© 2020 г. М. Л. Литвак^{а,*}, Д. В. Головин^а, М. В. Дьячкова^а, Д. В. Калашников^а, А. С. Козырев^а,
И. Г. Митрофанов^а, М. И. Мокроусов^а, А. Б. Санин^а, В. И. Третьяков^а

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: litvak@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.11.2019 г.

После доработки 30.12.2019 г.

Принята к публикации 13.02.2020 г.

В статье представлены научные задачи, описание и сравнение различных гамма- и нейтронных спектрометров, которые могут быть установлены на борт лунохода среднего класса массой до 100 кг. В качестве конкретного примера рассмотрена научная аппаратура, предложенная для будущей российской миссии Луна-Грунт, основной целью которой является доставка на Землю образцов лунного полярного реголита. Предполагается, что в состав полезной нагрузки этой миссии может быть включен малый луноход массой от 30 до 100 кг. Поэтому в статье рассмотрены варианты гамма- и нейтронного спектрометра, позволяющие найти оптимальное соотношение между научными требованиями и ресурсами, доступными на борту такого лунохода.

Ключевые слова: гамма- и нейтронные спектрометры

DOI: 10.31857/S0320930X20040076

ВВЕДЕНИЕ

Гамма- и нейтронные спектрометры часто используются в космических экспериментах для получения информации о химическом составе поверхности планет и малых тел Солнечной системы. Можно указать значительное количество научных космических миссий, где такие эксперименты уже были успешно реализованы (см., например, Boynton и др., 2002; 2004; 2006; Hasebe и др., 2010; Goldsten и др., 2007; Mitrofanov и др., 2002; 2010; 2014; 2018; Prettyman и др., 2006; 2011; 2012; Surkov и др., 1987). За исключением миссии NASA Mars Science Laboratory (Grotzinger и др., 2012) и советских посадочных миссий на Венеру — это орбитальные космические аппараты (КА), в задачи которых входит (входило) глобальное картирование элементного состава и содержания подповерхностной воды/водяного льда.

В настоящее время с высоким приоритетом рассматриваются исследования локальных окружающих условий на самой поверхности и проведение комплексных (с забором и анализом образцов грунта) измерений для сопоставления с данными приборов, установленных на орбитальных КА. Поэтому сейчас активно обсуждаются и планируются различные посадочные миссии к Луне, Марсу и другим объектам Солнечной системы. Некоторые из этих проектов уже реализуются, как, например, вышеупомянутый Mars Science

Laboratory, а другие находятся на завершающей стадии разработки. К таким миссиям относятся совместный проект ESA и Роскосмоса ExoMars-2020 (Vago и др., 2017), марсоход NASA Mars — 2020 или лунные посадочные миссии, предлагаемые космическими агентствами разных стран.

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

соединениями (см., например, Mitrofanov и др., 2002).

Взаимодействие нейтронов с ядрами вещества по каналам неупругого рассеяния (быстрые нейтроны) и радиационного захвата (тепловые и эпитепловые нейтроны) приводит к возбуждению ядер, которое снимается излучением моноэнергетических гамма-квантов, характерных для данного элемента. В результате поверхность излучает гамма-спектр с большим количеством ядерных линий. Присутствие в спектре определенных гамма-линий и их интенсивность являются уникальной особенностью данного типа поверхности и напрямую отражает ее химический состав (Boyn-ton и др., 2006; Evans и др., 2006; 2012; Prettyman и др., 2012). Наблюдение такого спектра с помощью гамма-спектрометра позволяет построить глобальную карту вариаций элементного состава, если это орбитальные наблюдения, или детально изучать локальную окрестность места посадки с борта посадочной станции или планетохода. Комплекс наблюдений, основанный на измерении естественного нейтронного и гамма-фона называется пассивной гамма-спектроскопией поверхности планет.

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

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

Активные методы нейтронной и гамма-спектроскопии прошли апробацию на Земле, где они обычно используются в геологии, безопасности, транспорте, медицине и других областях (Vys-tritsky и др., 2008; 2013). Они также неоднократно предлагались для космического эксперимента. Частичная верификация уже была выполнена в

марсианских условиях. Первый активный нейтронный спектрометр для поиска подповерхностной воды успешно реализован на борту марсохода NASA Curiosity (Litvak и др., 2008; Mitrofanov и др., 2012).

В этом исследовании мы сравнили различные варианты нейтронных и гамма-спектрометров, пригодных для установки на борт малого лунохода (до 100 кг) и сопоставили решаемый ими комплекс научных задач с ресурсами, имеющимися на таком луноходе.

В качестве конкретного примера был рассмотрен гамма- и нейтронный спектрометр, предложенный для российской посадочной миссии Луна–Грунт (Луна-28), в составе которой предусмотрен луноход малого или среднего класса.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ГАММА- И НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

(1) Из-за разного пространственного разрешения и чувствительности по глубине, лунные орбитальные измерения, проведенные различными приборами (нейтронные спектрометры, ультрафиолетовые и инфракрасные спектрометры, радар), расходятся в оценках того, где и как может быть распределен локальный водяной лед в полярных районах единственного естественного спутника нашей планеты. Для верификации и сопоставления имеющихся глобальных карт требуются измерения на самой лунной поверхности с возможностью взятия подтверждающих проб грунта с разной глубины. Поэтому одной из основных научных задач лунохода будет поиск подповерхностного водяного льда в окрестности места посадки. Кроме решения чисто научных задач это позволит собрать информацию о наиболее пригодных местах для расположения будущей лунной базы. С учетом предполагаемых возможностей лунохода поиск включает исследуемую область с радиусом до 30 км от исходного места посадки. Таким образом, гамма- и нейтронный спектрометр должен обеспечить измерение среднего содержания воды/водяного льда в подстилающей поверхности на глубину до 0.5–1 м вдоль трассы движения лунохода. Должна быть обеспечена быстрая идентификация локальных мест на лунной поверхности, где среднее содержание водорода может достигать не менее 500 ppm или 0.5% по массовой доле водного эквивалента. Эта величина примерно в 10 раз превышает среднее значение водного эквивалента в сухом реголите и может указывать на то, что луноход проезжает локальную область с возможными залежами подповерхностного водяного льда. Быстрое определение таких участков по ходу движения позволит принять своевременное решение об остановке лунохода и его возврату в обнаруженную область.

Во время остановки может быть проведена расширенная программа исследований, включая изучение слоистой структуры подповерхностного вещества с помощью георадара, а также забор образцов грунта с разной глубины.

(2) В окрестности предполагаемого места посадки водяной лед, скорее всего, мог сохраниться лишь на некоторой глубине, так как посадки лунных миссий, как правило, не планируются в бассейны вечно затененных полярных кратеров. В качестве возможных кандидатов, скорее всего, будут отобраны частично освещенные южные высокоширотные области, где сохранение водяного льда обеспечивается за счет его экранировки от внешней среды верхним сухим слоем лунного реголита. Из этого следует, что необходимо провести поиск слоистых отложений водяного льда под поверхностью. В рамках таких исследований гамма- и нейтронный спектрометр должен обеспечить обнаружение водородосодержащего слоя (500 ppm), находящегося на глубине до 0.5 м. Эти исследования могут быть произведены на остановках лунохода, которые должны быть выбраны в соответствии с пунктом 1 (см. выше). Для максимально эффективного обнаружения подповерхностных слоев водяного льда должна быть обеспечена совместная калибровка гамма- и нейтронного спектрометра и георадара, если таковой будет иметься в составе комплекса научной аппаратуры.

(3) Так же методы нейтронной спектроскопии позволяют определять не только содержание водорода/воды, но и некоторых химических элементов, являющихся эффективными поглотителями тепловых нейтронов. В этот список входят хлор, железо, бор и различные редкоземельные элементы, такие как, например, гадолиний и самарий. Таким образом, получаемые данные с гамма- и нейтронного спектрометра должны быть использованы для поиска вариаций среднего сечения поглощения тепловых нейтронов, чтобы выявить наличие повышенного или пониженного содержания нейтронных поглотителей. Эти данные могут быть использованы для геохимического анализа подстилающей поверхности, анализа минерального состава и оценки ресурсного потенциала для создания и функционирования будущей лунной базы.

(4) Кроме этого, гамма-спектроскопия позволяет бесконтактным способом определить валовый элементный состав подповерхностного слоя на глубину до 0.5 м по основным порообразующим элементам, таким как O, Na, Mg, Al, Si, K, Ti и Fe. Чтобы сопоставить различные типы лунных грунтов гамма- и нейтронный спектрометр должен обеспечить измерения в приповерхностном слое на глубину до 0.5 м средней концентрации железа, алюминия, магния с точностью $\pm 1\%$, кремния с точностью $\pm 0.5\%$, титана и натрия с

точностью $\pm 0.1\%$, калия с точностью $\pm 0.05\%$, и тория – с точностью 1 ppm. Эти данные могут быть использованы для геохимического анализа подстилающей поверхности, анализа возможных залежей различных минералов и оценки ресурсного потенциала для создания и функционирования будущей лунной базы. Результаты измерений должны использоваться как целеуказание для выбора локаций, где будет осуществляться либо поверхностный забор образцов грунта с помощью манипулятора, либо глубинный забор с помощью грунтозаборного устройства (ГЗУ), в том случае, если луноход будет оснащен таким устройством.

(5) Кроме среднего содержания различных химических элементов в лунном грунте, необходимо оценить, насколько их распределение неоднородно по глубине, так как химический состав на самой поверхности отличается от химического состава более глубоких слоев грунта. Активное нейтронное зондирование подстилающей поверхности позволяет изучать временную структуру ее гамма-отклика, возникшего в результате такого зондирования. Излучение с более глубоких слоев приходит позже, поэтому изучая особенности на временном профиле излучения в различных гамма-линиях, можно судить о возможной неоднородности химического состава по глубине. Поэтому необходимо предусмотреть применение подобных методов в ядерной научной аппаратуре, чтобы обеспечить поиск неоднородностей подповерхностного слоя на глубину до 0.5–1 м. Данные таких измерений могут быть использованы для комплексного анализа с данными других экспериментов для принятия решения о выборе мест забора образцов лунного грунта.

Конфигурация нейтронной и гамма-спектрометрической научной аппаратуры может быть оптимизирована, исходя из поставленных научных задач и имеющихся на борту лунохода ресурсов по массе и энергопотреблению. На текущем этапе планирования миссии Луна-Грунт оценка массы лунохода колеблется в диапазоне от 30 до 150 кг в зависимости от того, как будет реализован космический комплекс. Это означает, что масса всего комплекса научной аппаратуры лунохода может составлять от 5 до 25 кг. Таким образом, масса отдельного прибора, даже имеющего высокий приоритет, не будет превышать 1.5–10 кг. В следующих разделах представлены различные конфигурации нейтронных и гамма-спектрометров, которые попадают в этот диапазон, и указаны научные задачи, решение которых они смогут обеспечить в соответствии с разрешенной массой.

РАЗЛИЧНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

В этом разделе мы рассмотрели варианты пассивного и активного нейтронных спектрометров,

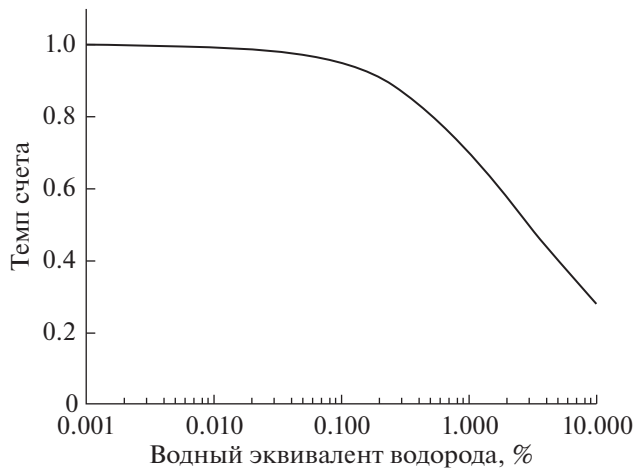


Рис. 1. Зависимость темпа счета в эпитепловом детекторе нейтронов, установленном на луноходе в зависимости от содержания воды в подстилающем грунте.

которые позволяют решить часть научных задач, представленных выше.

Компактный пассивный нейтронный спектрометр. Это наименее массивный вариант прибора, хорошо зарекомендовавший себя в предыдущих космических экспериментах, состоящий только из блока управляющей электроники и двух нейтронных детекторов, собранных на основе газоразрядных пропорциональных счетчиков и заполненных газом ^3He . Каждый счетчик имеет высокую эффективность при регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов в диапазоне энергий от долей эВ до 1 кэВ за счет реакции $^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{He} + ^1\text{H}$. Один из счетчиков полностью окружен кадмиевым экраном (который является эффективным поглотителем тепловых нейтронов), что позволяет регистрировать только надкадмиевые нейтроны с энергией более 0.4 эВ. Второй счетчик окружен кадмиевой оболочкой только частично. Его кадмиевая оболочка снабжена окном, ориентированным в сторону подстилающей поверхности под луноходом. Разница в темпах счетов таких детекторов определяется только потоком тепловых нейтронов, идущим от поверхности и попадающим в это окно в кадмиевой оболочке. Таким образом, представленная компоновка позволяет регистрировать эпитепловые нейтроны в диапазоне от 0.4 эВ до 1 кэВ и тепловые с энергией ниже 0.4 эВ, причем тепловые нейтроны регистрируются с высоким отношением «сигнал/шум», так как паразитные тепловые нейтроны, образовавшиеся в корпусе самого лунохода, исключаются из анализа. Такой вариант позволит успешно решить научную задачу (1), а также получить данные для решения научных задач (2) и (3), представленных в разделе «Научные задачи...».

На рис. 1 представлена зависимость темпа счета (полученная численным расчетом) в эпитепловом детекторе от содержания водорода в лунном грунте. По оси X отложен водный эквивалент, а по оси Y — темп счета, нормированный на единицу для абсолютно сухого лунного грунта. Из этого рисунка хорошо видно, что при изменении содержания воды от сухого грунта с 50 ppm (0.045% в водном эквиваленте) до 500 ppm (~0.45% в водном эквиваленте) темп счета падает примерно на 20%. Расчеты показывают, что темп счета C_e в эпитепловом детекторе может составлять примерно два отсчета в секунду для сухого реголита. Это позволяет оценить, сколько понадобится времени, чтобы обнаружить участок поверхности по ходу движения лунохода с повышенным содержанием водорода/водяного льда используя следующее соотношение:

$$\frac{(C_e^{50} - C_e^{500})}{\sqrt{(\Delta C_e^{50})^2 + (\Delta C_e^{500})^2}} = \frac{(C_e^{50} - C_e^{500}) \Delta t_{exp}}{\sqrt{C_e^{50} \Delta t_{exp} + C_e^{500} \Delta t_{exp}}} = 3, \quad (1)$$

где C_e^{50} и C_e^{500} — это темп счета в эпитепловом детекторе для лунного грунта, содержащего 50 и 500 ppm водорода или (0.045 и 0.45% в водном эквиваленте), ΔC_e^{50} и ΔC_e^{500} — их статистические ошибки, которые определяются исходя из времени измерения t_{exp} . Величина «3» означает количество сигм (стандартных отклонений) измеренного сигнала над фоном. Получается, что для статистически значимого определения разницы $C_e^{50} - C_e^{500}$ понадобится время $t_{exp} = 200$ с.

С учетом того, что средняя скорость лунохода (особенно в режиме автонавигации) будет составлять не более 5–10 см в секунду, луноход проедет за это время расстояние порядка 10–20 м. Таким образом, если на пути лунохода встретится протяженный участок с соответствующими размерами и имеющий содержание воды более 0.5%, то он будет обнаружен во время движения, и луноход сможет по команде остановиться (и, если надо, вернуться обратно), чтобы провести детальные измерения в этом районе с использованием другой доступной научной аппаратуры, включая георадар и грунтозаборное устройство.

Нейтроны разных энергий приходят с разных глубин — чем меньше энергия нейтрона, тем с большей глубины он пришел. Поэтому соотношение между темпами счета нейтронных детекторов можно использовать для изучения слоистой структуры грунта. Численные расчеты показывают, что в предложенной конфигурации нейтронный спектрометр сможет определить неоднородность подстилающей поверхности на небольшой глубине. Так, слой, содержащий 0.5% в водном эквиваленте, может быть статистически значимо

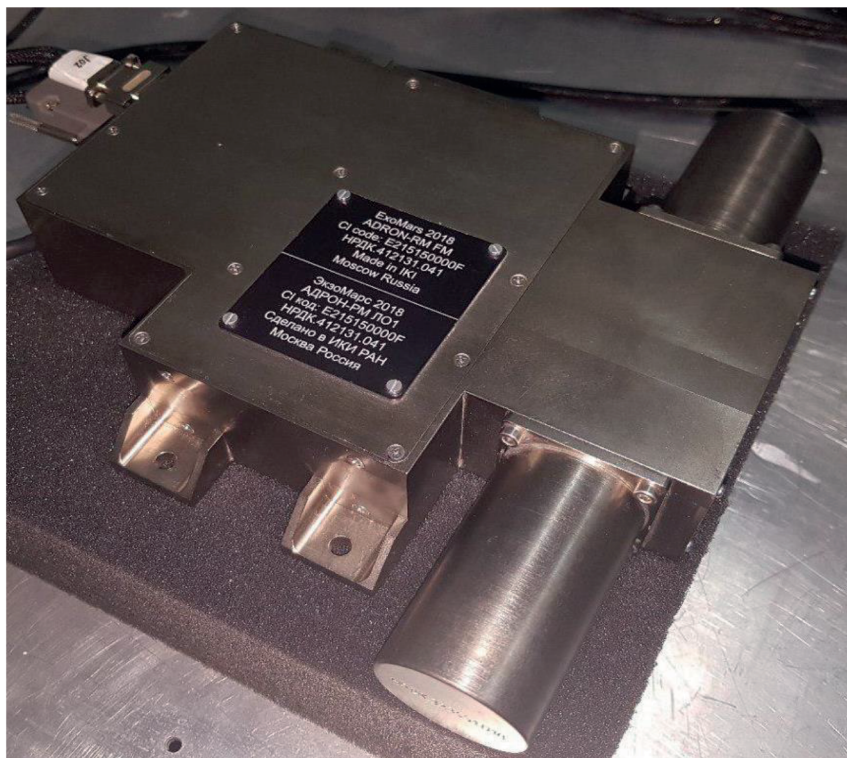


Рис. 2. Летный образец прибора АДРОН-РМ, предназначенный для установки на борт марсохода проекта ЭкзоМарс-2020.

обнаружен, если он залегает на глубине порядка 10 см. Для этого потребуются примерно сутки непрерывных измерений, что может быть сделано во время долгой остановки лунохода. Если по ходу движения лунохода была обнаружена область с повышенным содержанием водорода, то длительные измерения в этом месте позволят определить, насколько однородно водород распределен по глубине.

Наконец, предложенный пассивный нейтронный спектрометр сможет предоставить информацию о содержании нейтронных поглотителей, так как небольшие изменения в содержании редкоземельных элементов (Gd, Sm и др.), имеющих огромные сечения поглощения тепловых нейтронов, могут приводить к значимым (десятки процентов) изменениям потока тепловых нейтронов.

В качестве прототипа компактного пассивного нейтронного спектрометра может использоваться научная аппаратура АДРОН-РМ, специально разработанная для посадочной миссии ЭкзоМарс-2020 (Mitrofanov и др., 2017). Сейчас создан летный образец, прошедший все наземные испытания. Его масса не превышает 1.7 кг, а энергопотребление 5 Вт (см. рис. 2 и табл. 2). Кроме этого, на марсоходе Curiosity много лет работает российский прибор ДАН, в составе которого используется похожий блок нейтронных детекторов. Таким образом, можно заключить, что для компактного

нейтронного спектрометра, предлагаемого для лунохода, есть уже готовые прототипы, прошедшие не только наземные, но и летные испытания.

Активный нейтронный спектрометр. В следующей конфигурации к блоку пассивных детекторов добавляется блок импульсного нейтронного генератора. В этом случае получается полный аналог научной аппаратуры ДАН (Litvak и др., 2008; Mitrofanov и др., 2012).

Блок импульсного нейтронного генератора (ИНГ) указанного прибора разработан во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова для использования в космических экспериментах на поверхности Марса и Луны. На посадочном аппарате, марсоходе или луноходе, он устанавливается на свои собственные посадочные места и соединяется с блоком детекторов и управляющей электроники только с помощью межблочного кабеля. В зависимости от доступных ресурсов по массе и энергопотреблению это позволяет гибко подходить к его включению в состав научной аппаратуры без переработки прибора в целом. Внутри блока ИНГ находится нейтронная трубка, высоковольтная электроника и источник дейтронов. При подаче импульса напряжения на управляющий электрод источника дейтронов с амплитудой в несколько киловольт развивается разряд и происходит локальный разогрев катода, из которого десорбиру-

ется дейтерий. Для генерации нейтронного импульса освобожденные ионы дейтерия ускоряются в электрическом поле (внутри нейтронной трубки генерируется высокое напряжение до 120 киловольт), сталкиваются с мишенью, насыщенной тритием, и производят поток быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ в результате ядерной реакции $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$. Длительность импульса составляет около одной микросекунды, и за это время излучается до 10^7 нейтронов. Работа нейтронного генератора и блока детекторов синхронизована по времени. В момент генерации каждого нейтронного импульса детекторы начинают регистрировать отсчеты в 64 квазилогарифмических временных бинах, что позволяет измерить кривые затухания нейтронного альbedo поверхности для тепловых и эпитепловых нейтронов. Форма и амплитуда этих кривых сильно зависят от наличия водорода/воды и их распределения по глубине в подстилающей поверхности. Основное преимущество активного нейтронного спектрометра перед пассивным заключается в гораздо большей статистике отсчетов (за счет огромной интенсивности нейтронного импульса) и возможности изучения структуры подповерхностного реголита. Кривые затухания эпитепловых и тепловых нейтронов показывают, как быстрые нейтроны термализуются в грунте в зависимости от времени, прошедшего с момента генерации нейтронного импульса. Соответственно неоднородности в распределении водорода по глубине будут проявляться в виде особенностей на временном профиле этих кривых.

Использование активного нейтронного спектрометра позволит полностью решить задачи (1)–(3), но за меньшее время и на более высоком качественном уровне. Во время движения лунохода нейтронный генератор не включается, а прибор работает в пассивном режиме, поэтому решение задачи (1) по обнаружению водородосодержащих соединений в ходе движения лунохода обеспечивается точно также, как и в случае пассивного нейтронного спектрометра. На остановках лунохода работа в активном режиме позволяет получить точные оценки среднего содержания водорода (с ошибкой в 25 ppm) примерно в 4 раза быстрее (для пассивного нейтронного спектрометра требуется около двух часов). Для обнаружения слоистой структуры с заглубленным слоем водородосодержащего материала и оценки содержания нейтронопоглощающих элементов также потребуется гораздо меньше времени. Эти методики оценки уже прошли успешную апробацию для научной аппаратуры ДАН на марсоходе Curiosity в марсианском кратере Гейл и показали, что научная аппаратура подобного типа способна измерять эквивалентные содержания воды до 5% и хлора до 3% (для Марса – это наиболее распространенный элемент, являющийся сильным ней-

тронным поглотителем) в марсианском реголите с характерной неопределенностью 0.1%. Кроме этого, методики, разработанные для научной аппаратуры ДАН, позволяющие выявлять неоднородную структуру грунта и разделять однородные модели подповерхностного слоя от многослойных моделей (Litvak и др., 2014; 2016; Mitrofanov и др., 2014).

Прямым аналогом активного нейтронного спектрометра является как описанная выше научная аппаратура ДАН, так и научная аппаратура АДРОН-ЛР, разработанная для российских лунных посадочных миссий Луна-25 и Луна-27 (Golovin и др., 2014). Полная масса такого прибора составит около 4 кг, а его энергопотребление в активном режиме около 20 Вт (см. табл. 2).

РАЗЛИЧНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ АППАРАТУРЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ В СЕБЯ НЕЙТРОННЫЙ И ГАММА-СПЕКТРОМЕТРЫ

В предыдущем разделе было показано, что с помощью нейтронной спектрометрии можно изучить распределение подповерхностного водяного льда и даже оценить содержание в лунном грунте некоторых химических элементов. Это позволяет решить ряд приоритетных задач на поверхности Луны (см. раздел “Научные задачи...”), но не дает полной картины о химическом составе лунной поверхности. Для этого нужно привлекать методы гамма-спектрометрии. В этом разделе мы рассмотрели варианты комплексной научной аппаратуры, включающей и нейтронные, и гамма-спектрометры, и постарались оценить “плату” за расширение списка решаемых научных задач с точки зрения ресурсов, доступных на борту небольшого лунохода.

Пассивный гамма- и нейтронный спектрометр. В этой конфигурации к блоку нейтронных детекторов добавляется гамма-спектрометр, представляющий собой сцинтилляционный детектор гамма-излучения на основе кристалла CeBr_3 . Этот кристалл принадлежит к последнему поколению современных сцинтилляторов. Он имеет сравнительно высокое разрешение среди всех сцинтилляционных детекторов (порядка 4% на энергии 661 кэВ) и высокую эффективность регистрации жестких гамма-квантов (не менее 15% на энергии 6 МэВ). Кроме этого, по сравнению со сцинтилляционными детекторами на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$, к достоинствам которых относят высокое спектральное разрешение (<3% на энергии 661 кэВ), детекторы на основе бромиды церия не имеют собственного значительного радиационного фона (в 30 меньше чем у $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$), что существенно облегчает идентификацию гамма-линий в диапазоне до 3 МэВ.

Использование гамма-спектрометра позволяет дополнительно решить задачу (4) и определить элементный состав лунного вещества. Во введении уже упоминалось, что гамма-излучение поверхности возникает под воздействием бомбардировки заряженными частицами космических лучей и последующего взаимодействия образовавшихся вторичных нейтронов с ядрами породообразующих элементов, в результате которого в излучаемом гамма-спектре образуется лес характеристических гамма-линий. Можно предположить, что интенсивность гамма-линии пропорциональна концентрации соответствующего химического элемента в лунном грунте, а статистическая ошибка при оценке интенсивности определяет предельную точность, с которой эта концентрация может быть измерена. Статистическая ошибка может быть оценена по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{\sqrt{\delta C^2 + \delta B^2}}{S} \times 100\%, \quad (2)$$

где δC – статистическая ошибка полного темпа счета в гамма-детекторе в энергетическом диапазоне, содержащем гамма-линию; δB – статистическая ошибка фонового (под профилем гамма-линии) темпа счета, $S = (C - B)$ – интенсивность гамма-пика.

Используя численное моделирование и данные гамма-измерений на борту китайской лунной орбитальной миссии ChangE-2 (там использовался сцинтилляционный детектор $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$), можно оценить длительность измерений, необходимых для регистрации характеристических гамма-линий основных породообразующих элементов с требуемой точностью Δ , заложенных в требованиях к космическому эксперименту. Так, чтобы измерить концентрацию железа и алюминия с точностью $\pm 1\%$, кремния – с точностью $\pm 0.5\%$ и титана – с точностью $\pm 0.1\%$ потребуется от 10 до 20 ч непрерывных измерений. Это может быть реализовано во время длительных остановок лунохода.

В табл. 1 приведены список характеристических гамма-линий и оценки длительности гамма-измерений, необходимых для определения концентрации разных элементов, включая естественные радионуклиды с очень большим периодом полураспада, такие как калий и торий. Для некоторых элементов может потребоваться очень значительное время, измеряемое в днях, поэтому определение их содержания может быть выполнено либо на одной очень длительной остановке, либо за счет усреднения по данным измерений на нескольких остановках. В этом случае мы теряем пространственное разрешение, усредняя по большому пути, пройденному луноходом.

В качестве непосредственного прототипа пассивного нейтронного и гамма-спектрометра

можно рассматривать научную аппаратуру МГНС, установленную на борту КА ESA Veri-Colombo (Mitrofanov и др., 2010). Эта аппаратура прошла все наземные испытания, а сама миссия успешно стартовала к Меркурию в ноябре 2018 г. Сейчас на борту проводятся первые полетные калибровки по регистрации гамма-фона от КА. Общий вид научной аппаратуры МГНС показан на рис. 3. Исходя из характеристик МГНС, можно оценить, что полная масса пассивного нейтронного и гамма-спектрометра составит около 4 кг, а энергопотребление около 6 Вт (см. табл. 2).

Активный гамма- и нейтронный спектрометр. В этой конфигурации научной аппаратуры к нейтронному и гамма-спектрометру добавляется отдельный блок нейтронного генератора. Поэтому гамма-измерения можно будет проводить не только в пассивном (когда гамма-излучение поверхности возникает за счет ГКЛ), но и в активном (за счет искусственного облучения поверхности быстрыми нейтронами) режимах. В такой конфигурации есть два существенных преимущества по сравнению с пассивным гамма-спектрометром. Во-первых, существенно возрастает интенсивность облучения поверхности, а с ней и интенсивность гамма-отклика поверхности. Это приводит к большой статистике отсчетов в гамма-детекторе, и, как результат, к уменьшению времени наблюдения, необходимого для достижения заданной точности. Во-вторых, в эксперименте возникают дополнительные измерительные возможности за счет использования временной развертки гамма-сигнала, которая представляет собой временной профиль, измеряемый от момента генерации нейтронного импульса.

Как уже упоминалось выше, набор характеристических гамма-линий возникает в результате различных реакций нейтронов с ядрами основных породообразующих элементов. Взаимодействие быстрых нейтронов происходит по каналу неупругих реакций, а тепловые и эпитепловые нейтроны могут генерировать гамма-излучение за счет реакций радиационного захвата. Кроме этого, и быстрые, и тепловые нейтроны могут образовывать короткоживущие изотопы, распад которых также сопровождается излучением характеристических гамма-линий. Измеряя гамма-спектр в различных временных окнах, можно отделить эти реакции друг от друга. Во время нейтронного импульса возникает большое количество быстрых нейтронов, поэтому пока длится импульс в гамма-спектре доминируют процессы генерации гамма-линий по каналам неупругих реакций. Во временном промежутке от 100 мкс до 1 мс после нейтронного импульса происходит термализация быстрых нейтронов до эпитепловых и тепловых энергий и в гамма-спектре соответственно начинают доминировать реакции радиационного захвата. Во временном промежутке более 1 мс ос-

Таблица 1. Сравнение измерений гамма-спектрометра в пассивном и активном режимах работы

Химический элемент	Среднее содержание в лунной поверхности (%)	Требуемая точность измерений (%)	Активный режим		Пассивный режим	
			энергия гамма-линий (keV)	требуемое время измерений (час)	энергия гамма-линий (keV)	требуемое время измерений (час)
Na	0.3	+/-0.1	440, 472, 1636	6.5	440, 472, 1636	Несколько дней
Mg	5	+/-0.5	1369, 2754	2.1	1369, 2754	Несколько дней
Al	10	+/-1	844, 1014, 1369, 2211, 2754, 3004	0.6	1014, 2211, 3004	<10*
Si	20	+/-0.5	1779, 3538	1.5	1779, 3538	<15*
Ti	1	+/-0.1	6417, 6758	5	6417, 6758	22
Fe	10	+/-1	847, 1811, 2113, 7627, 7642	5	7627, 7642	7
K	0.2	+/-0.05	Только в пассивном режиме работы	Только в пассивном режиме работы	1461	1
Ca	9	+/-1	1942	35	1942, 3736, 3904	37
Th	3×10^{-6}	$\pm 1 \times 10^{-6}$ (1 ppm)	Только в пассивном режиме работы	Только в пассивном режиме работы	2615	2

* – оценка сверху.

новным процессом генерации гамма-линий уже является распад короткоживущих изотопов. Таким образом, грамотный подбор временных ин-

тервалов позволит уменьшить фоновую нагрузку, провести селекцию между различными процессами генерации гамма-излучения, и тем самым су-

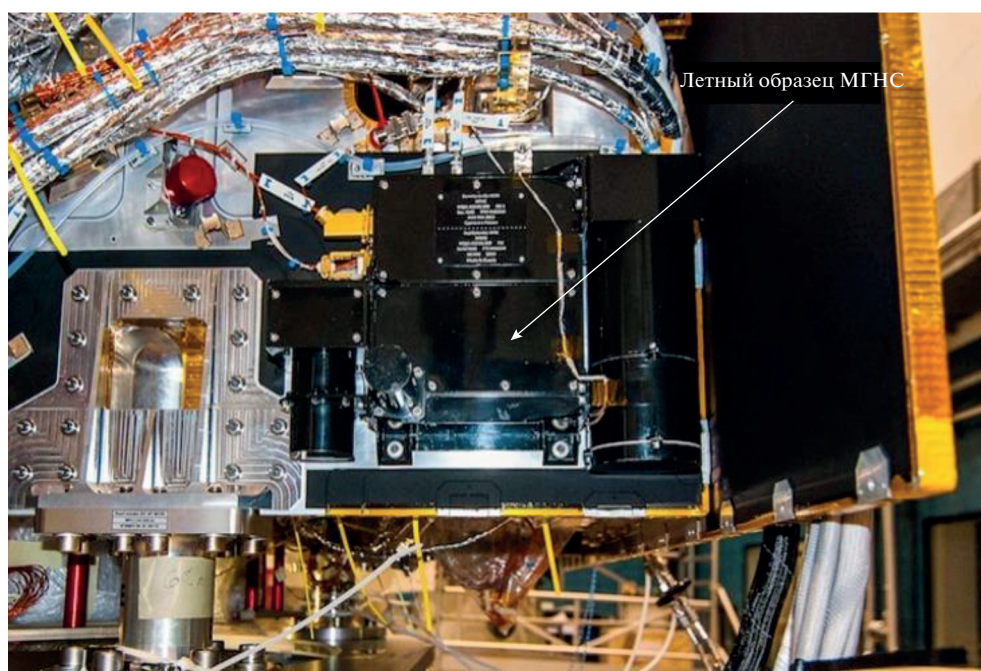


Рис. 3. Летный образец прибора МГНС, установленный на борт КА ЕКА BerColombo.

Таблица 2. Различные конфигурации гамма- и нейтронного спектрометра

Конфигурация	Масса/ Энергопотребление	Научные задачи	Уровень разработки
№ 1. Пассивный нейтронный спектрометр. Малогабаритный нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ^3He счетчиков	Масса: 1.7 кг Энергопотребление: 4.5 Вт Размеры: 43 × 204 × 210 мм	Полностью решает научную задачу (1) и частично научные задачи (2) и (3). (см. раздел “Научные задачи...”)	Очень высокий. Существует готовый летный образец АДРОН-PM, созданный для марсохода проекта ЭкзоМарс-2020, а также блок детекторов прибора ДАН, работающего на борту марсохода НАСА Curiosity
№ 2. Активный нейтронный спектрометр. Нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ^3He счетчиков (НС) и блока импульсного нейтронного генератора (ИНГ)	Масса: 4.2 кг Энергопотребление: 18 Вт Размеры: 43 × 204 × 210 мм (НС) 331 × 125 × 45 мм (ИНГ)	Полностью решает научные задачи (1)–(3) (см. раздел “Научные задачи...”) за гораздо меньшее время по сравнению с пассивным нейтронным спектрометром	Очень высокий. Существует летный прототип ДАН, много лет работающий на борту марсохода Curiosity
№ 3. Пассивный нейтронный и гамма-спектрометр. Малогабаритный нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ^3He счетчиков и гамма-спектрометр на основе сцинтилляционного детектора CeBr_3 с размером 2 × 2 или 3 × 3 дюйма	Масса: 3.5 кг Энергопотребление: 6 Вт Размеры: 260 × 217 × 135 мм	Полностью решает научные задачи (1), (3), (4) и частично научную задачу (2) (см. раздел “Научные задачи...”)	Очень высокий. Существует летный образец МГНС, работающий сейчас на борту КА ЕКА VeriColombo
№ 4. Активный нейтронный и гамма-спектрометр. Нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ^3He счетчиков, гамма-спектрометра на основе сцинтилляционного детектора CeBr_3 с размером 2 × 2 или 3 × 3 дюйма (НГС) и блока импульсного нейтронного генератора (ИНГ)	Масса: 7.0 кг Энергопотребление: 20 Вт Размеры: 260 × 217 × 135 мм (НГС) 331 × 125 × 45 мм (ИНГ)	Полностью решает научные задачи (1)–(4) и частично научную задачу (5) (см. раздел “Научные задачи...”) за гораздо меньшее время по сравнению с пассивным гамма- и нейтронным спектрометром	Высокий. Существует летный прототип АДРОН-ЛР, разработанный для лунных посадочных миссий Луна-25 и Луна-27 и прошедший все наземные испытания
№ 5. Нейтронный и гамма-спектрометр на основе меченых нейтронов. Нейтронный спектрометр тепловых и эпитепловых нейтронов, состоящий из двух пропорциональных ^3He счетчиков, гамма-спектрометра на основе сцинтилляционного детектора CeBr_3 с размером 2 × 2 или 3 × 3 дюйма (НГС) и блока нейтронного генератора с функцией меченых нейтронов (МНГ)	Масса: 10.0 кг Энергопотребление: <50 Вт	Полностью решает научные задачи (1)–(5) с (см. раздел “Научные задачи...”)	Низкий. Существуют промышленные прототипы, которые используются в различных отраслях народного хозяйства. Они требуют существенной оптимизации в соответствии с требованиями космического эксперимента.

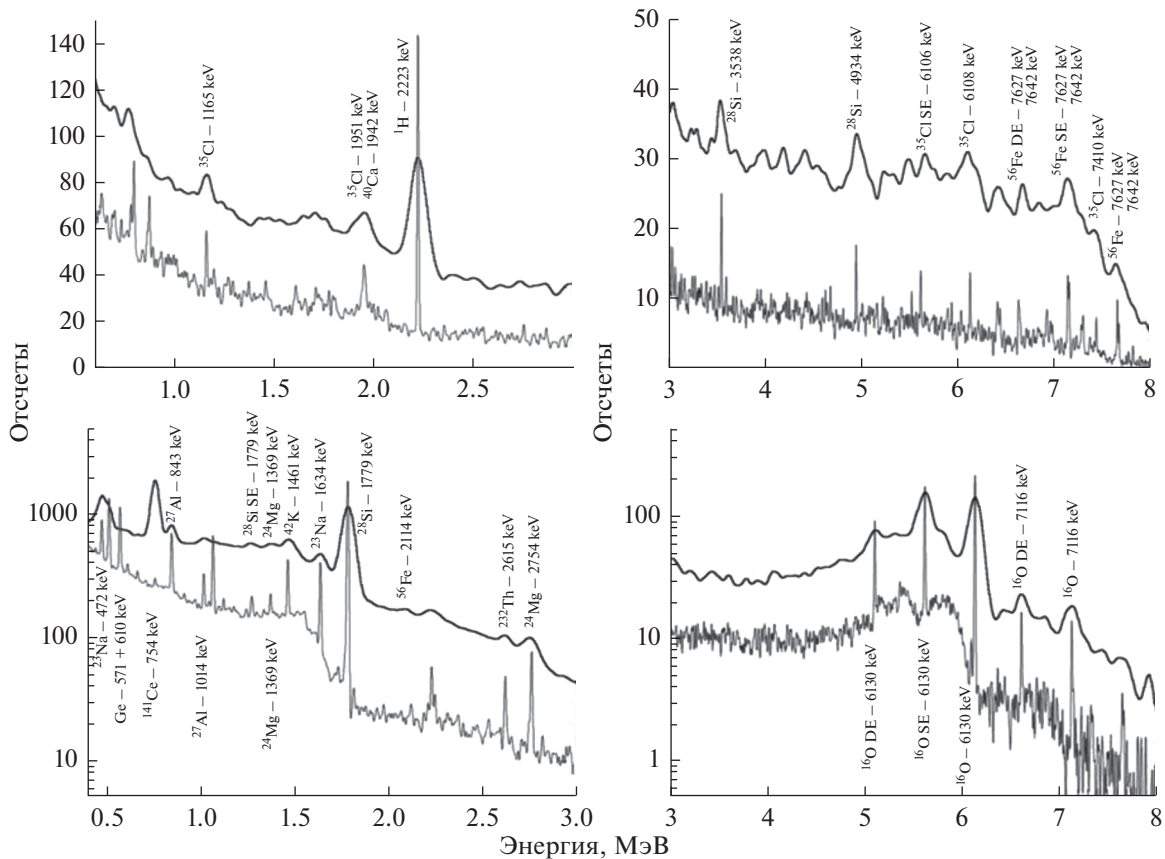


Рис. 4. Гамма-спектры, измеренные во временном окне 100–1000 мкс после нейтронного импульса (верхние графики) и гамма-спектры, измеренные во временном окне 10–100 мс после нейтронного импульса (нижние графики). На каждом графике тонкой линией показан спектр, полученный от эталонного детектора из высокоочищенного германия с высоким энергетическим разрешением. Толстой линией показаны гамма-спектры, измеренные сцинтилляционным детектором CeBr_3 .

щественно облегчить процедуру идентификации гамма-линий (см., например Parsons и др., 2011).

Дополнительным преимуществом временной развертки является возможность изучения вариаций химического состава с глубиной. Более поздние гамма-фотоны приходят в детектор с больших глубин, поэтому наблюдение за тем, как меняется интенсивность гамма-линии со временем, может помочь понять, на какой глубине она образовалась. Это позволит сделать соответствующий вывод о распределении по глубине данного химического элемента. На рис. 4 показаны результаты наземных испытаний активного гамма- и нейтронного спектрометра на модели планетного реголита, в которой имитируется средний химический состав основных породообразующих элементов (O, Na, Mg, Al, Si, Cl, Fe) и наличие водяного/ледяного слоя на небольшой глубине (10–20 см). Измерения проводились в различных временных окнах: 10–1000 мкс, где доминируют процессы радиационного захвата тепловых нейтронов, и 10–100 мс, где доминируют процессы распада короткоживущих изотопов (Golovin

и др., 2018). Для сравнения показаны измерения, сделанные с помощью сцинтилляционного детектора на основе кристалла CeBr_3 и эталонного детектора из высокоочищенного германия. В табл. 1 представлены оценки времени измерений в активном режиме, которое понадобится, чтобы определить среднюю концентрацию данного элемента с заданной точностью. Из табл. 1 хорошо видно, что это время меняется от минут до нескольких часов для большинства породообразующих элементов, что существенно меньше, чем если бы измерения проводились только в пассивном режиме. Это означает, что выбор конфигурации научной аппаратуры, в которую входят нейтронный и гамма-спектрометр и нейтронный генератор, является наиболее эффективной с точки зрения решения всех поставленных выше научных задач.

В качестве непосредственного летного прототипа активного гамма- и нейтронного спектрометра можно привести научную аппаратуру АДРОН-ЛР, которая создана для российских лунных посадочных миссий Луна-25 и Луна-27 (Golovin и др., 2014). Эта аппаратура прошла квалификацион-

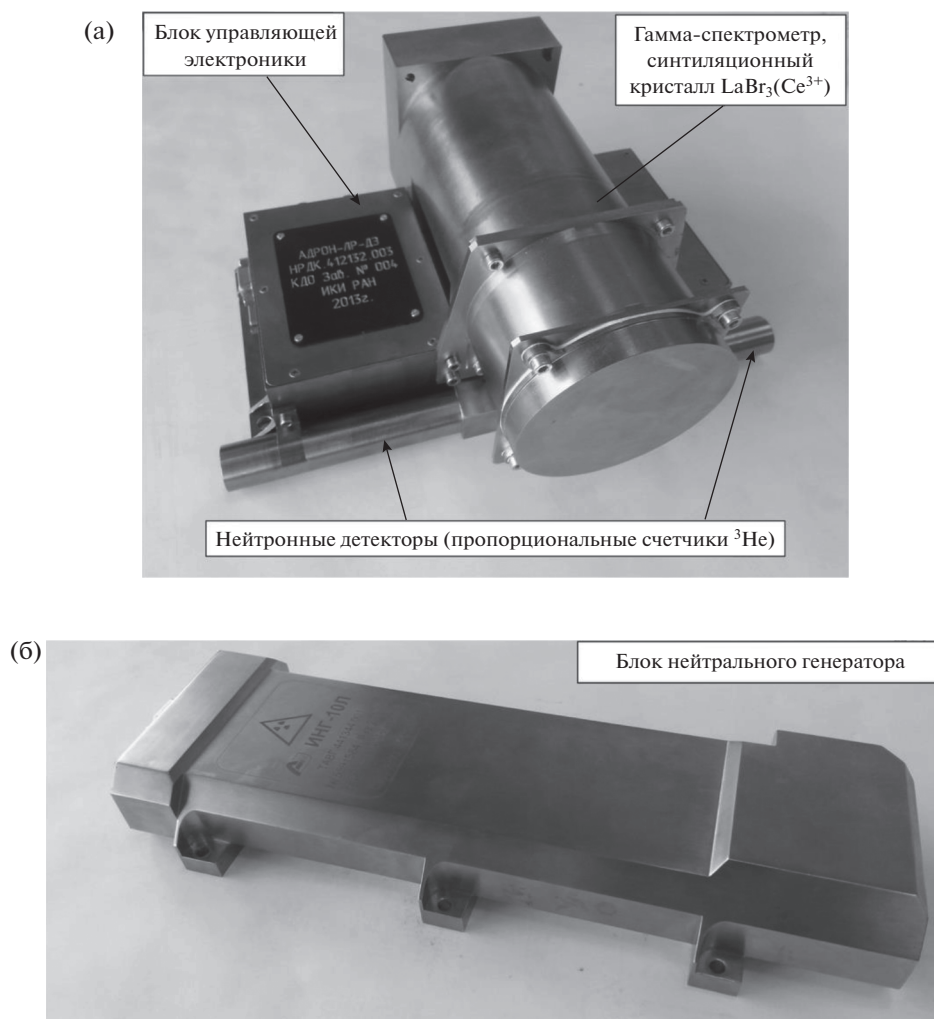


Рис. 5. (а) Блок гамма- и нейтронного спектрометра, входящий в состав научной аппаратуры АДРОН-ЛР, предназначенной для российских посадочных миссий Луна-25 и Луна-27. (б) Блок нейтронного генератора, входящего в состав научной аппаратуры АДРОН-ЛР, предназначенной для российских посадочных миссий Луна-25 и Луна-27.

ные наземные испытания и калибровки. Ее общий вид показан на рис. 5. Исходя из этого, полная масса активного гамма- и нейтронного спектрометра составит 7 кг, а энергопотребление в активном режиме – 21 Вт (см. табл. 2).

Активный гамма- и нейтронный спектрометр с функцией меченых нейтронов. В этой конфигурации гамма-спектрометр оснащается наносекундной регистрирующей электроникой, призванной обеспечить регистрацию временного профиля гамма-излучения поверхности с точностью не хуже, чем 1 нс. Для сравнения, характерная быстрота управляющей электроники для активного гамма- и нейтронного спектрометра без функции меченых нейтронов составляет всего ~1 мкс. Кроме этого, должен быть переработан и сам блок нейтронного генератора. В него добавляется позиционно-чувствительный детектор альфа-частиц, установленный внутри нейтронной трубки. Во

время нейтронного импульса он регистрирует альфа-частицу (возникшую в реакции $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$) и определяет ее направление вылета. Это в свою очередь дает возможность определить время и направление вылета быстрого нейтрона (по закону сохранения он вылетает в противоположном направлении) и тем самым “пометить” его. Если детектирование альфа-частиц синхронизовать с детектированием гамма-излучения, то можно определить место образования данного гамма-кванта. Действительно, селекция по углу вылета позволяет выделить определенный телесный угол, например, небольшое пятно на лунной поверхности под космическим аппаратом. Временная развертка позволит уточнить, с какой глубины из этого телесного угла прилетел гамма-квант. Быстрый нейтрон движется со скоростью примерно 5 см/нс, а гамма-квант – со скоростью 30 см/нс. Если научная аппаратура находится на

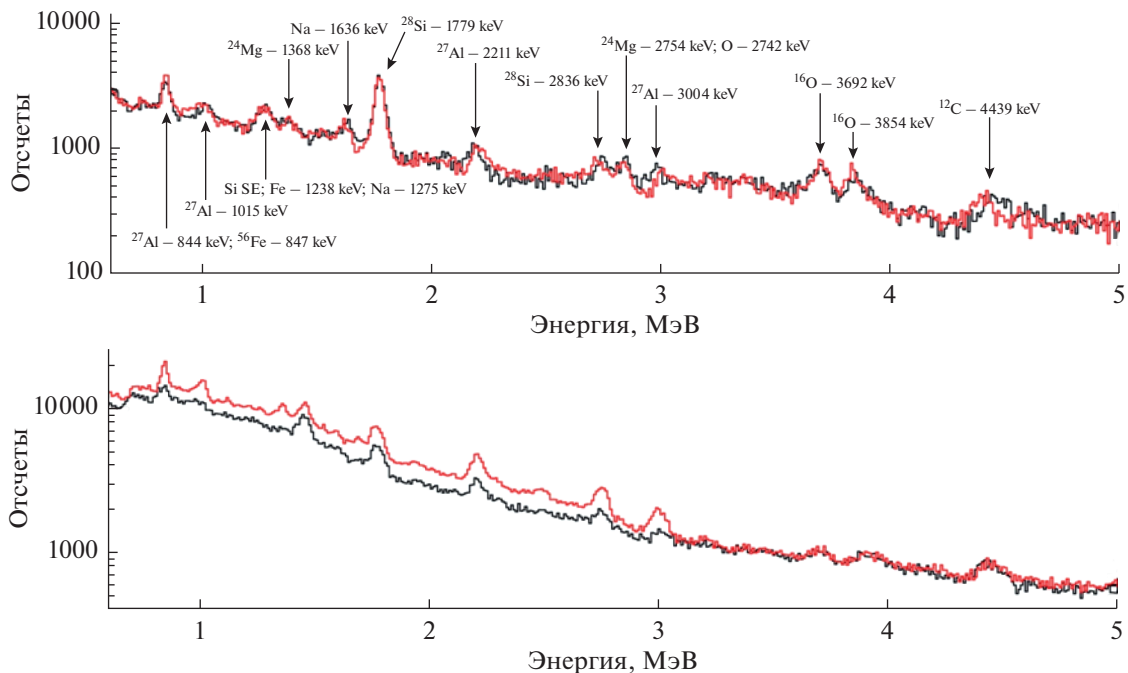


Рис. 6. Измерения гамма-спектров от мишени-аналога планетного вещества, выполненные с помощью активной гамма-спектроскопии с функцией меченых нейтронов (вверху) и без функции меченых нейтронов (внизу). Красным цветом показаны измерения, сделанные в присутствии симулятора посадочного аппарата, а черным цветом — без симулятора посадочного аппарата.

высоте 50 см над поверхностью (наиболее вероятное расположение на борту КА), то первый сигнал от поверхности появится примерно через 12 нс. Это время складывается из времени пролета нейтрона от нейтронного генератора до поверхности, времени, необходимого для первого неупругого взаимодействия нейтрона с ядрами основных породообразующих элементов с последующей генерацией гамма-кванта, и времени, которое требуется, чтобы образовавшийся гамма-квант смог достичь гамма-детектора. Гамма-спектр, например, измеренный в диапазоне 12–14 нс, будет уже соответствовать гамма-сигналу от верхнего слоя грунта толщиной не более 10 см. Таким образом, с характерной точностью управляющей электроники в 1 нс можно обеспечить сканирование подповерхностного слоя лунного вещества на глубину до 50 см с шагом 5 см. Поэтому применение этой технологии позволяет построить грубую 3-D модель лунного грунта для различных химических элементов, которые имеют большие сечения неупругих реакций.

К очевидным достоинствам данного метода, вследствие которых он получил широкое развитие в земных условиях, также относится возможность проведения низкофоновых измерений. Известно, что в отличие от многих других бесконтактных методов измерений, гамма-спектроскопия за счет проникающего излучения позволяет “заглянуть внутрь” исследуемого объекта. Платой за это

является большой фоновый сигнал, так как из-за изотропности излучения облучается не только исследуемый объект, но и его окружение. В случае космического эксперимента — это прежде всего массивный космический аппарат, на котором установлен гамма-спектрометр. Чтобы разделить полезный сигнал от исследуемого объекта (для планетных исследований — это поверхность грунта) и паразитный сигнал от космического аппарата, необходимо проводить сложные наземные калибровки и численное моделирование. В случае меченых нейтронов можно на порядки понизить фон за счет выбора телесного угла и временного диапазона, в котором измеряется гамма-спектр. При таком выборе в детекторе будут преобладать отсчеты от гамма-квантов, пришедших из определенной области пространства, в которой находится исследуемый объект.

Гамма-спектрометр меченых нейтронов еще не разработан в космическом исполнении, но уже существуют первые лабораторные прототипы и проведены первые лабораторные опыты для оценки применимости этой методики для космического эксперимента (Litvak и др., 2019). На рис. 6 представлены гамма-спектры, измеренные лабораторным гамма-спектрометром меченых нейтронов с имитаторами планетного грунта и космического аппарата. В качестве имитатора планетного реголита использовалась многослойная сборка, состоящая из силикатного стекла и

различных металлических сплавов, позволяющая подогнать ее химический состав под средний состав планетного вещества по основным породообразующим элементам (H, O, Si, Al, Mg, Fe, Ca), см. Litvak и др., 2017. В качестве имитатора посадочного аппарата в части наиболее его массивных конструктивных элементов использовались несколько сотен килограмм алюминиевого сплава, окружавших гамма-детектор (Litvak и др., 2019). Из рис. 6 хорошо видно, как сильно меняется гамма-спектр при добавлении в схему эксперимента имитатора космического аппарата, если измерения проводить методами стандартной гамма-спектроскопии. Так, фон и интенсивность гамма-линий от алюминия возрастает в несколько раз (Litvak и др., 2019). В тоже время при использовании метода меченых нейтронов фон и интенсивность гамма-линий остаются неизменными.

Основываясь на лабораторных опытах, можно оценить, что для полноценного летного образца потребуется около 10 кг массы и 50 Вт энергопотребления. По своим измерительным характеристикам он превосходит активный гамма- и нейтронный спектрометр, но при этом потребует больше ресурсов на луноходе. Кроме этого, нужно будет найти ряд конструкторских решений, чтобы обеспечить его выживаемость в сложных тепловых условиях и условиях повышенного механического нагружения.

ВЫВОДЫ

В табл. 2 мы суммировали все представленные выше конфигурации гамма- и нейтронного спектрометра и оценили эффективность их применения на борту лунохода в соответствии с решаемыми научными задачами, необходимыми ресурсами по массе и энергопотреблению и текущей зрелости конструкции (наличию летных прототипов).

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

ноходом, можно рассмотреть использование гамма- и нейтронного спектрометра, созданного с использованием метода меченых нейтронов. В этом случае можно построить трехмерную картину распределения основных породообразующих элементов в верхних слоях лунного грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Beyerle A., Hurley J.P., Tunnell L.* Design of an associated particle imaging system // Nuclear Instruments and Methods. 1990. V. 299. №1–3. P. 458–462.
- Boynton W.V., Feldman W.C., Squyres S.W., Prettyman T.H., Bruckner J., Evans L.G., Reedy R.C., Starr R., Arnold J.R., Drake D.M., Englert P.A., Metzger A.E., Mitrofanov I., Trombka J., d'Uston C., Wanke H., Gasnault O., Hamara D.K., Janes D.M., Marcialis R.L., Maurice S., Mikheeva L., Taylor G.J., Tokar R., Shinohara C.* Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: evidence for subsurface ice deposits // Science. 2002. V. 297. P. 81–85.
- Boynton W.V., Feldman W.C., Mitrofanov I.G., Evans L.G., Reedy R.C., Squyres S.W., Starr R., Trombka J., D'Uston C., Arnold J.R., Englert P.A., Metzger A.E., Wanke H., Bruckner J., Drake D.M., Shinohara C., Fellows C., Hamara D.K., Harshman K., Kerry K., Turner C., Ward M., Barthe H., Fuller K.R., Storms S.A., Thornton G.W., Longmire J.L., Litvak M.L.* The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer instrument suite // Space Sci. Rev. 2004. № 110. P. 37–83.
- 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., Brückner J., Englert P.A.J., Gasnault O., Sprague A.L., Mitrofanov I., Squyres S.W., Trombka J.I., d'Uston L., Wanke 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. 2006. V. 112. E12S99.
- Bystritsky V.M., Gerasimov V.V., Kadyshesky V.G., Kobzev A.P., Nozdrin A.A., Rogov Yu.N., Rapatsky V.L., Sadovsky A.B., Salamatin A.V., Sapozhnikov M.G., Sissakian A.N., Slepnev I.V., Slepnev V.M., Utkin V.A., Zamyatin N.I., Peredery A.N., Likhachev N.P., Romanov I.V., Safonov M.V., Sedin A.N., Scherbakov A.G.* DVin – stationary setup for identification of explosives // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5. P. 441–446.
- Bystritsky V.M., Zamyatin N.I., Zubarev E.V., Rapatsky V.L., Rogov Yu.N., Romanov I.V., Sadovsky A.B., Salamatin A.V., Sapozhnikov M.G., Safonov M.V., Slepnev V.M., Philipov A.V.* Stationary setup for identifying explosives using the tagged neutron method // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. № 10. P. 442–446.
- Evans L.G., Reedy R.C., Starr R.D., Kerry K.E., Boynton W.V.* Analysis of gamma ray spectra measured by Mars Odyssey // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. E03S04.
- Evans L.G., Peplowski P.N., Rhodes E.A., Lawrence D.J., McCoy T.J., Nittler L.R., Solomon S.C., Sprague A.L., McStall-Cahill K.R., Starr R.D., Weider S.Z., Boynton W.V., Hamara D.K., Goldsten J.O.* Major-element abundances on the surface of Mercury: Results from the MES-

- SENGER Gamma-Ray Spectrometer // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E00L07.
- Goldsten J.O., Rhodes E.A., Boynton W.V., Feldman W.C., Lawrence D.J., Trombka J., Smith D.M., Evans L.G., White J., Madden N.W., Berg P.C., Murphy G.A., Gurnee R.S., Strohbehn K., Williams B.D., Schaefer E.D., Monaco C.A., Cork C.P., Eckels J.D., Miller W.O., Burks M.T., Hagler L.B., DeTeresa S.J., Witte M.C. The MESSENGER Gamma-Ray and Neutron Spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2007. № 131. P. 339–391.
- Golovin D., Litvak M., Kozyrev A., Tret'yakov V., Sanin A., Vostrukhin A., Mitrofanov I., Malakhov A. Neutron activation analysis on the surface of the Moon and other terrestrial planets // 40th COSPAR Scientific Assembly. 2014. Abstract B0.1-43-14.
- Golovin D.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Vostrukhin A.A., Dubasov P.V., Zontikov A.O., Kozyrev A.S., Krylov A.R., Krylov V.A., Mokrousov M.I., Repkin A.N., Sanin A.B., Timoshenko G.N., Udovichenko K.V., Shvetsov V.N. Comparison of Sensitivities of Semiconductor (HPGe) and Scintillation (CeBr3) Detectors in the Measurement of Gamma Spectra Induced by Neutrons in the Model of Planetary Soil // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15. № 5. P. 524–530.
- Grotzinger J.P., Crisp J., Vasavada A.R., Anderson R.C., Baker C.J., Barry R., Blake D.F., Conrad P., Edgett K.S., Ferdowski B., Gellert R., Gilbert J.B., Golombek M., Gomez-Elvira J., Hassler D.M., Jandura L., Litvak M., Mahaffy P., Maki J., Meyer M., Malin M.C., Mitrofanov I., Simmonds J.J., Vaniman D., Welch R.V., Wiens R.C. Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // *Space Sci. Rev.* 2012. № 170. P. 5–56.
- 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.C. High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer on Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA) // *Transactions of Space Techn. Japan.* 2010. V. 7. P. Pk_35-Pk_41.
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Barmakov Yu.N., Behar A., Bitulev A., Bobrovniitsky 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.
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Lisov D.I., Behar A., Boynton W.V., Deflores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A.S., Kuzmin R.O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M.A., Moersch J.E., Mokrousov M., Nikiforov S., Shvetsov V.N., Stack K., Starr R., Tate C., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A. Local Variations of Bulk Hydrogen and Chlorine Content Measured at the Contact Between the Sheepbed and Gillespie Lake Units in Yellowknife Bay, Gale Crater, Using the DAN Instrument Onboard Curiosity // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. № 6. P. 1259–1275.
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Hardgrove C., Stack K.M., Sanin A.B., Lisov D., Boynton W.V., Fedosov F., Golovin D., Harshman K., Jun I., Kozyrev A.S., Kuzmin R.O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M., Nikiforov S., Starr R., Tate C., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A. Hydrogen and chlorine abundances in the Kimberley formation of Gale crater measured by the DAN instrument on board the Mars Science Laboratory Curiosity rover // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 21. № 5. P. 836–845.
- Litvak M.L., Sanin A.B., Golovin D.V., Jun I., Mitrofanov I.G., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Vostrukhin A.A. Ground tests with prototype of CeBr3 active gamma ray spectrometer proposed for future Venus surface missions // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. Section A.* 2017. V. 848. P. 9–18.
- 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 // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A.* 2019. V. 922. P. 19–27.
- 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. № 5578. P. 78–81.
- 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., Bobrovniitskiy 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.* 2010. V. 58. № 1–2. P. 116–124.
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Barmakov Yu.I., Behar A., Bobrovniitskiy 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. № 1–4. P. 559–582.
- 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 // *Journal of Geophysical Research.* 2014. V. 119. № 7. P. 1579–1596.
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Jun I., Bobrovniitskiy Y.I., Golovin D.V., Grebennikov A.S., Fedosov F.S., Kozyrev A.S., Lisov D.I., Malakhov A.V., Mokrousov, M.I., Sanin A.B., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.A. The ADRON-RM Instrument Onboard the ExoMars Rover // *Astrobiology.* 2017. V. 17. № 6–7. P. 585–594.

- 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 Sci. Rev.* 2018. V. 214. № 5. Article id. 86. 26 p.
- Parsons A., Bodnarik J., Evans L., Floyd S., Lim L., McClanahan T., Namkung M., Nowicki S., Schweitzer J., Starr R., Trombka J.* Active neutron and gamma-ray instrumentation for in situ planetary science applications // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A.* 2011. V. 652. P. 674–679.
- 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. № E12. CiteID E12007.
- Prettyman T.H., Feldman W.C., McSween H.Y., Dingler R.D., Enemark D.C., Patrick D.E., Storms S.A., Hendricks J.S., Morgenthaler J.P., Pitman K.M., Reedy R.C.* Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 163. № 1–4. P. 371–459.
- Prettyman T.H., Mittlefehldt D.W., Yamashita N., Lawrence D.J., Beck A.W., Feldman W.C., McCoy T.J., McSween H.Y., Toplis M.J., Titus T.N., Tricarico P., Reedy R.C., Hendricks J.S., Forni O., Le Corre L., Li J.-Y., Mizzon H., Reddy V., Raymond C.A., Russell C.T.* Elemental Mapping by Dawn Reveals Exogenic H in Vesta's Regolith // *Science.* 2012. V. 338. № 6104. P. 242–246.
- Surkov Yu.A., Kirnozov F.F., Glazov V.N., Dunchenko A.G., Tatsy L.P., Sobornov O.P.* Uranium, thorium, and potassium in the Venusian rocks at the landing sites of VEGA 1 and 2 // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 1987. V. 92. № B4. P. E537–E540.
- Vago J.L., Westall F., Coates A.J., Jaumann R., Korablev O., Ciarletti V., Mitrofanov I., Josset J.-L., De Sanctis M.C., Bibring J.-P., Rull F., Goesmann F., Steininger H., Goetz W., Brinckerhoff W., Szopa C., Raulin F., Westall F., Edwards H.G.M., Whyte L.G., Fairén A.G., Bridges J., Hauber E., Ori G.G., Werner S., Loizeau D., Kuzmin R.O., Williams R.M.E., Flahaut J., Forget F., Rodionov D., Svedhem H., the ExoMars Project Team.* Habitability on Early Mars and the Search for Biosignatures with the ExoMars Rover // *Astrobiology.* 2017. V. 17. № 6–7. P. 471–510.