

УДК 520.66+523.4

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОМ НА БОРТУ МОБИЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ, МАРСА И ДРУГИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ БЕЗ АТМОСФЕРЫ ИЛИ С ТОНКОЙ АТМОСФЕРОЙ

© 2021 г. А. А. Аникин¹, *, М. В. Дьячкова¹, М. Л. Литвак¹, И. Г. Митрофанов¹,
М. И. Мокроусов¹, С. Ю. Никифоров¹, А. Б. Санин¹

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

*a.anikin@np.cosmos.ru

Поступила в редакцию 13.12.2019 г.

После доработки 03.02.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

В статье предложена новая концепция космического эксперимента с гамма-спектрометром на борту мобильного космического аппарата для изучения состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой на основе метода меченых заряженных частиц галактических космических лучей. Предложенная методика позволяет практически полностью исключить фон гамма-излучения от космического аппарата, на борту которого установлен прибор, и значительно повысить пространственное разрешение при изучении элементного состава вещества вдоль траектории движения мобильного космического аппарата.

DOI: 10.31857/S0023420621010015

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–6], что за 60 лет космической эры было реализовано несколько десятков экспериментов по гамма-спектральному анализу состава вещества небесных тел (Луна, Марс, Венера, Меркурий, астероиды), которые позволили определить содержание в грунте основных породообразующих элементов и естественных радиоактивных изотопов (калия, урана и тория). За исключением экспериментов на борту автоматических станций “Венера”, все эти эксперименты проводились на орбитальных космических аппаратах. На основе данных измерений спектров гамма-лучей были построены карты распространенности естественных радиоактивных изотопов и основных породообразующих элементов с пространственным разрешением порядка сотен километров.

В настоящее время становятся актуальными эксперименты по анализу состава вещества Луны и Марса непосредственно на поверхности с мобильных автоматических аппаратов. Это необходимо для лунных исследований для изучения распространенности элементов в потенциальных районах размещения лунной базы и также для разведки лунных ресурсов. В случае Марса детальная информация о составе вещества вдоль траектории движения марсохода позволит обнару-

жить наиболее интересные области для детального анализа его образцов бортовыми приборами. Следует отметить, что до настоящего времени эксперименты по гамма-спектральному анализу состава вещества на борту планетных мобильных аппаратов не проводились. Первой попыткой проведения активного ядерно-физического эксперимента на поверхности другого небесного тела можно считать эксперимент ДАН на борту марсохода НАСА *Curiosity*, в котором применялся метод активного нейтронного зондирования верхнего слоя марсианской поверхности [7, 8], но при этом спектр наведенного гамма-излучения не измерялся.

В настоящее время на этапе разработки находятся перспективные космические гамма-спектрометры для будущих исследовательских миссий на поверхности Луны (космические аппараты *Луна-25* и *Луна-27*, [9]) и Марса (космический проект *экзоМарс 2020*, [10]). В этих экспериментах измерения будут проводиться с борта стационарной посадочной платформы. Аналогичные эксперименты на борту мобильных аппаратов, насколько нам известно, в настоящее время не разрабатываются. Основная трудность при проведении таких экспериментов связана, во-первых, со статистической обеспеченностью измере-

ний спектров гамма-лучей и, во-вторых, с наличием локального фона этого излучения от самого космического аппарата.

Первое требование статистической обеспеченности может быть реализовано за счет увеличения размеров и повышения спектрального разрешения применяемых гамма-детекторов, или благодаря увеличению времени измерения.

В этом случае основным ограничением является допустимая масса полезной нагрузки, которую может взять на борт автоматический мобильный аппарат, а также скорость его передвижения и в целом планируемая длительность его работы. Обычно масса одного прибора на борту мобильного планетного аппарата составляет менее 10 кг, и в этих случаях для гамма-спектроскопии могут применяться сцинтилляционные детекторы с максимально высоким спектральным разрешением, работающие при нормальных температурах [11, 12]. Если для установки на борт мобильного аппарата допустим более тяжелый прибор, около 30 кг и более, то в этих случаях можно использовать более массивные полупроводниковые детекторы из высокочистого германия с системой криогенного охлаждения, которые при сопоставимых размерах чувствительного объема имеют гораздо более высокое спектральное разрешение по сравнению с самыми совершенными сцинтилляторами [13–16].

Проблема устранения локального фона представляется гораздо более сложной. Космический аппарат на поверхности небесного тела без атмосферы (Луна) или с тонкой атмосферой (Марс) подвергается воздействию галактических космических лучей (ГКЛ) и является таким же источником вторичного гамма-излучения, как и само изучаемое вещество поверхности. Его основные порообразующие элементы, как правило, также входят в состав вещества космического аппарата, и поэтому измеряемый поток фотонов в ядерных линиях гамма-лучей содержит как вклады вещества небесного тела в непосредственной окрестности аппарата (что можно рассматривать как “сигнал”), так и вклады от удаленных участков поверхности и от конструкции самого аппарата (что, в данном случае, соответствует “локальному фону”).

Для решения этой проблемы детектор гамма-лучей может быть помещен в коллиматор, который поглотит гамма-лучи от космического аппарата и от удаленных участков поверхности (пассивная коллимация) и/или также выработает сигнал для системы антисовпадения, которая исключит из регистрации отсчеты от фоновых гамма-квантов (активная коллимация). Другой метод ослабления “полного фона” основан на выносе детектора на значительное расстояние от основной массы космического аппарата. Этот метод достаточно хорошо себя заре-

комендовал для орбитальных космических аппаратов, однако его технически трудно реализовать для экспериментов непосредственно на поверхности.

Сравнительно недавно для решения проблемы “полного фона” в гамма-спектральном анализе состава планетного вещества было предложено применить метод активного нейтронного зондирования с мечеными нейтронами [17]. В этом методе применяемый импульсный нейтронный генератор имеет позиционно-чувствительный детектор альфа-частиц. Они являются вторым продуктом реакции генерации нейтронов высоких энергий ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow n + \alpha$ и вылетают относительно них в противоположных направлениях. Если при построении спектра вторичных фотонов будут учитываться только те отсчеты, которые сопровождаются временной меткой регистрации альфа-частиц, то полученные с прибора данные позволяют исследовать только выделенный объем вещества, который находится в выделенном телесном угле противоположном направлениям регистрируемых альфа-частиц. Очевидной технической трудностью практической реализации этого метода является необходимость применения импульсного нейтронного генератора с достаточно сложной конструкцией, включающей детектор меченных альфа-частиц.

Ниже обсуждается новая концепция гамма-спектрометра для космического аппарата на поверхности Луны, в котором проблема устранения “локального фона” и выделения “сигнала” решается методом меченых ГКЛ [18]. Физическая идея метода состоит в том, что регистрируемые гамма-лучи от локального объема вещества поверхности сопровождаются метками от заряженных частиц ГКЛ, которые попали в этот объем. Включив в состав гамма-спектрометра дополнительный детектор для регистрации этих частиц, можно будет обеспечить меткой совпадения те гамма-фотоны, которые образовались в выделенном локальном объеме в окрестности космического аппарата. Такой прибор можно назвать космическим гамма-спектрометром с метками от галактических космических лучей КГС-МГКЛ.

2. ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НЕБЕСНОГО ТЕЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГКЛ: ПОЛНОЕ И РАННЕЕ АЛЬБЕДО ПОВЕРХНОСТИ

Поток заряженных частиц ГКЛ на поверхности Луны в период средней фазы солнечного цикла 550 МВ составляет около $f_{\text{ГКЛ}} = 3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [19]. Численное моделирование альbedo поверхности Луны в гамма-лучах под воздействием такого потока ГКЛ позволяет получить оценки полного числа фотонов гамма-лучей $\eta_{\text{пол}}$ в спектральном

диапазоне 0.1–10.0 МэВ в пересчете на 1 частицу ГКЛ (состав лунного вещества принимался в соответствии с моделью FAN, [20]). Эти оценки соответствуют $\eta_{\text{пол}} = 5.3$ фотона за все время послесвечения после воздействия на вещество одиночной частицы ГКЛ (так называемое полное динамическое альbedo). Процесс послесвечения включает генерацию гамма-лучей в реакциях раскола ядер вещества с образованием нейтронов, в реакциях неупругого рассеяния нейтронов или частиц ГКЛ на ядрах породообразующих элементов, в реакциях захвата замедлившихся нейтронов этими ядрами и также в реакциях распада образовавшихся радиоактивных изотопов.

С учетом физических особенностей процесса послесвечения можно ввести понятие раннего динамического альbedo, которое соответствует гамма-лучам, испущенным веществом за время до 100 нс непосредственно после воздействием на него отдельной частицы ГКЛ в реакциях раскола и неупругого рассеяния. Расчеты показали, что раннее альbedo соответствует $\eta_{\text{ран}} = 2.1$ фотону в пересчете на одну частицу ГКЛ, то есть отношение потоков гамма-лучей для раннего и полного альbedo лунной поверхности составляет $\lambda = \eta_{\text{ран}}/\eta_{\text{пол}} = 0.4$. Таким образом, если поток полного альbedo гамма-лучей лунного вещества составляет $f_{\text{па}} = \eta f_{\text{ГКЛ}} \approx 16 (\eta/5.3) (f_{\text{ГКЛ}}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, то поток фотонов раннего альbedo, которые генерируются в течение 100 нс после воздействия частиц ГКЛ, составляет $f_{\text{ра}} = \lambda \eta f_{\text{ГКЛ}} \approx 6(\lambda/0.4)(\eta/5.3) (f_{\text{ГКЛ}}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Спектральный состав гамма-лучей для полного и раннего альbedo существенно различается. В первом случае в спектре присутствуют ядерные линии от всех реакций и процессов, происходящих в веществе небесного тела под воздействием ГКЛ (см. выше). Во втором случае вклад с спектр вносят только те реакции, которые происходят в интервале до 100 нс после попадания энергичной заряженной частицы вещество – в этом случае ядерное гамма-излучение связано только с расколом ядер под воздействием ГКЛ и с реакциями неупругого рассеяния частиц ГКЛ и быстрых вторичных нейтронов на ядрах породообразующих элементов.

Ниже показано, что метод “меченых космических лучей” позволяет изучать спектры излучения ядер только для гамма-лучей раннего альbedo, что вполне достаточно для оценки состава вещества с борта стационарного или мобильного космического аппарата на поверхности Луны или Марса.

3. КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА КГС-МГКЛ ПО ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ НА БОРТУ МОБИЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Прибор КГС-МГКЛ состоит из детектора гамма-лучей (ДГЛ), детектора галактических космических лучей (ДГКЛ) и блока электроники (БЭ). Упрощенный вариант реализации эксперимента с таким прибором схематично представлен на рис. 1. ДГЛ расположен на борту мобильного аппарата на небольшой высоте над поверхностью небесного тела. Этот детектор может быть создан с применением современных сцинтилляционных кристаллов с относительно большой эффективностью и высоким спектральным разрешением. В качестве примера такого сцинтиллятора можно назвать кристалл CeBr_3 [11].

Условие регистрации излучения ядерной линии с поверхности небесного тела соответствует условию прозрачности вещества от точки излучения до детектора, так как даже однократное рассеяние фотона изменяет его энергию и переводит из линии в континуум. Поэтому длина свободного пробега L для фотона гамма-линии в веществе определяет характерный линейный масштаб объема вещества под мобильным аппаратом, из которого выходит излучение ядерной линии. Его можно назвать “объемом прозрачности” $W_{\text{пр}}$ для гамма-линии с заданной энергией. Линейный размер этого объема вдоль поверхности определяет физический предел для пространственного разрешения гамма-спектрального анализа состава вещества при измерениях с поверхности небесного тела. На рис. 1 схематично показана граница объема прозрачности, от которого в ДГЛ регистрируется поток гамма-лучей с поверхности небесного тела. Следует отметить, что вклад в полный темп счета гамма-квантов в ДГЛ также вносит вторичное излучение от массы космического аппарата, что не позволяет достоверно исследовать состав тех элементов вещества поверхности, которые также входят в состав вещества элементов конструкции аппарата.

ДГКЛ представляет собой две плоские пластины из сцинтиллятора, расположенные параллельно поверхности друг над другом (рис. 1). Такой вариант конструкции ДГКЛ позволяет на основе применения схемы совпадения отсчетов в двух плоских сцинтилляторах ограничить телесный угол на небесной сфере, из которого приходят заряженные частицы ГКЛ, производящие гамма-фотоны в части “объема прозрачности” (рис. 1). Этот объем можно определить, как “объем исследования” $W_{\text{исс}} = \delta W_{\text{пр}}$, где параметр δ определяет его долю относительно “объема прозрачности”. Линейный размер этих объемов по глубине одинаков и определяется длиной пробега гамма-излучения в грунте. Поэтому уменьшение

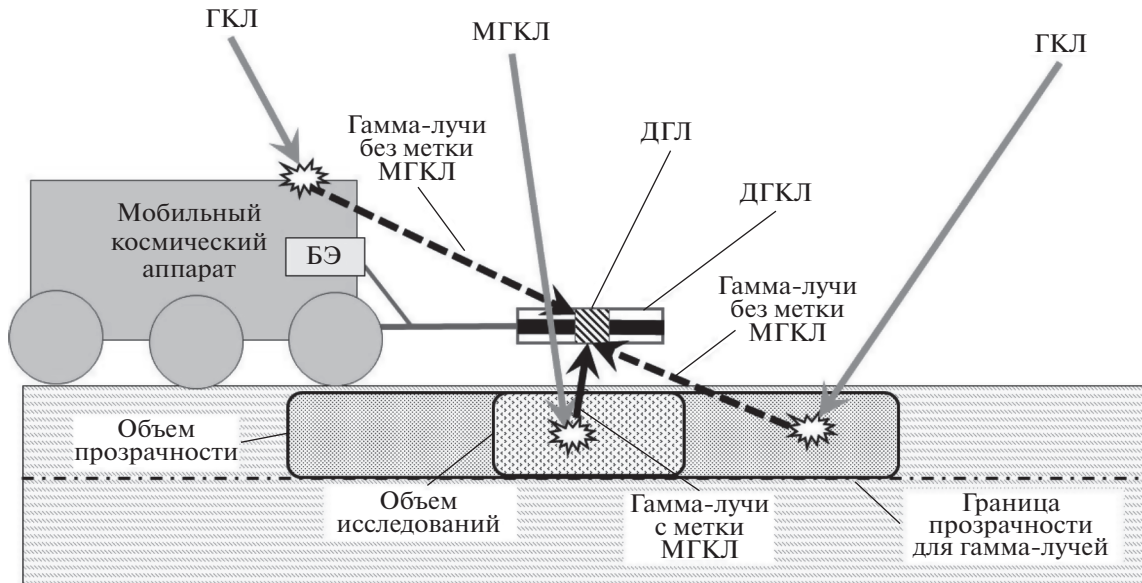


Рис. 1. Схема концепции эксперимента с космическим гамма-спектрометром с применением метода меченых космических лучей на борту мобильного аппарата на поверхности небесного тела.

объема $W_{исс}$ относительно $W_{пр}$ связано в первом приближении с уменьшением площади $S_{исс}$ “пятна исследования” на поверхности, которая определяется размером телесного угла для меченых ГКЛ. По порядку величины $S_{исс} = \delta S_{пр}$ (рис. 1), поэтому варьируя геометрические параметры ДГКЛ можно изменять величину параметра δ , тем самым изменять пространственное разрешение измерений элементного состава вещества поверхности.

Блок электроники БЭ формирует кадры телеметрической информации, содержащие “байтовые слова ГКЛ” для отсчетов в детекторе ДГКЛ и “байтовые слова ГЛ” для отсчетов в детекторе ДГЛ, накопленные за один цикл измерения. Слова для ГКЛ содержат данные о времени регистрации заряженных частиц ГКЛ с точностью порядка наносекунды. Слова для ГЛ содержат данные об амплитудах и временах регистрации отсчетов от фотонов гамма-лучей также с точностью порядка наносекунды.

Таким образом, принцип работы КГС-МГКЛ состоит в отборе гамма-фотонов, испущенных из “объема изучения” под поверхностью небесного тела по факту совпадения моментов их регистрации с отсчетами от ГКЛ.

Ниже для оценок чувствительности метода “меченых космических лучей” используются следующие характерные параметры прибора КГС-МГКЛ: эффективная площадь ДГКЛ 10^3 см^2 ; эффективная площадь ДГЛ 10^2 см^2 ; параметр $\delta = 0.3$; критерий совпадения для отсчетов в ДГКЛ и в ДГЛ определяется промежутком времени между ними τ менее 100 нс.

4. ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА КГС-МГКЛ НА БОРТУ ПЕРСПЕКТИВНОГО МОБИЛЬНОГО АППАРАТА НА ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ниже в качестве примера обсуждаются условия реализации эксперимента с КГС-МГКЛ на поверхности Луны. Полученные результаты легко переносятся на другие небесные тела без атмосферы или с тонкой атмосферой.

4.1. Оценка величины “сигнала” от ядерных гамма-линий для прибора КГС-МГКЛ

Фотоны гамма-лучей раннего альbedo с меткой ГКЛ (МГКЛ) излучаются участком поверхности $S_{исс}$, который со стороны неба перекрыт детектором ДГКЛ. Поток таких фотонов составляет долю δ от полного потока фотонов раннего альbedo от всего участка поверхности $S_{пр}$, с которого в детектор ДГЛ попадает основная доля гамма-излучения от поверхности Луны. Соответственно, темп счета фотонов детектором ДГКЛ с МГКЛ для раннего альbedo от поверхности Луны составит

$$F_{ра} = \delta f_{ра} S_{ДГЛ} \approx 200 (\lambda/0.4) (\eta/5.3) (\delta/0.3) \times (f_{ГКЛ}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) (S_{ДГЛ}/10^2 \text{ см}^2) \text{ с}^{-1}. \quad (1)$$

Полная статистика отсчетов от фотонов, которые сопровождаются МГКЛ за характерное время наблюдений 1 мин, составит

$$N_{сигнал} = F_{ра} t_{набл} \approx 10^4 (\lambda/0.4) (\eta/5.3) (\delta/0.3) \times (f_{ГКЛ}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) (S_{ДГЛ}/10^2 \text{ см}^2) (t_{набл}/1 \text{ мин}). \quad (2)$$

Таблица 1. Оценки числа фотонов ядерных гамма-линий основных породообразующих элементов лунного грунта для вариантов состава FAN и A11 для измерения продолжительностью 1 мин прибором КГС-МГКЛ (погрешности указаны как статистические флуктуации числа фотонов в линиях)

| Гамма-линия конкретного элемента | Поток фотонов на одну частицу ГКЛ, см ⁻² с ⁻¹ | | Количество фотонов, приходящих в ДГЛ за 1 мин | | Разница интенсивностей линий (в скобках приведена статистическая значимость) |
|--|--|----------------------|--|----------------|--|
| | FAN | A11 | FAN | A11 | |
| ⁴⁸ Ti 983.5 кэВ | $2.48 \cdot 10^{-4}$ | $4.97 \cdot 10^{-3}$ | 2.5 ± 1.5 | 50.0 ± 7 | 47.5 ± 7 (6.8σ) |
| ²⁷ Al 1014.4 кэВ | $7.04 \cdot 10^{-3}$ | $2.98 \cdot 10^{-3}$ | 70.0 ± 8.5 | 30.0 ± 5.5 | 40 ± 10 (4.0σ) |
| ⁵⁶ Fe 1238.3 кэВ | $1.94 \cdot 10^{-4}$ | $1.90 \cdot 10^{-3}$ | 1.9 ± 1.4 | 19.0 ± 4.4 | 17 ± 4.5 (3.8σ) |
| ²⁴ Mg 1368.6 кэВ | $1.17 \cdot 10^{-3}$ | $6.93 \cdot 10^{-3}$ | 11.7 ± 3.5 | 69.3 ± 21 | 57.6 ± 9.0 (6.4σ) |
| ²⁸ Si 1779.0 кэВ | $2.60 \cdot 10^{-2}$ | $2.78 \cdot 10^{-2}$ | 260 ± 16 | 278 ± 16.4 | 18 ± 23 (0.8σ) |
| ¹⁶ O 6128.6 кэВ | $1.87 \cdot 10^{-2}$ | $1.87 \cdot 10^{-2}$ | 187 ± 14 | 187 ± 14 | 0 ± 19 |

4.2. Оценка статистической обеспеченности ядерных линий для гамма-лучей “раннего альbedo”

Численное моделирование эксперимента КГС-МГКЛ позволило рассчитать энергетические спектры для отсчетов от гамма-лучей, которые генерируются в течение 100 нс после воздействия каждой единичной частицы ГКЛ на вещество. Представленные результаты расчетов соответствуют составу лунного реголита FAN, соответствующего лунным высокогорьям [20] и составу реголита в месте посадки экспедиции *Apollo 11* в юго-западном районе Моря Спокойствия. Данные типы лунных грунтов максимально различаются по содержанию магния, алюминия, железа и титана, при практически равных концентрациях кремния и кислорода (см. табл. 1). Распределение фотонов по энергии в рассчитанных спектрах отнормировано на одну частицу ГКЛ. Для того, чтобы определить полную статистику отсчетов в конкретной ядерной линии, следует умножить представленную величину ее относительной интенсивности на полную статистику отсчетов от фотонов, зарегистрированных за время наблюдения (см. (2)).

В табл. 1 приведены оценки статистики отсчетов для этих линий при измерениях в течение 1 мин. Видно, что за это время на основе данных измерений линий магния, алюминия, железа и титана можно обнаружить изменение состава вещества между типами FAN и A11. Следует отметить, что интенсивности линий кремния и кислорода при сравнении этих типов реголита не меняются — их можно использовать в качестве реперных величин для внесения нормировочных поправок, учитывающих временные вариации потока ГКЛ.

Полученные в расчетах результаты подчеркивают преимущества методики измерений спектра гамма-лучей с учетом меток регистрации МГКЛ галактических космических лучей. Действитель-

но, такие элементы как магний, алюминий, железо и титан практически наверняка должны входить в состав вещества космического аппарата и поэтому ядерные линии излучения от этих элементов будут присутствовать в полном спектре гамма-лучей. Благодаря применению методики меченых ГКЛ вклад этих линий в спектр излучения поверхности будет практически полностью исключен (см. ниже раздел 4.3).

Очевидно, что наиболее ярко различие между двумя типами реголита FAN и A11 проявляется в линиях титана и магния — при экспозиции в течение 1 мин изменение интенсивности линий этих элементов имеет значимость на уровне 6–7 стандартных отклонений. Это означает, что в принципе при заданных параметрах прибора КГС-МГКЛ время экспозиции можно уменьшить до 15 с, и при этом изменение интенсивности все еще будет измеряться на уровне значимости около 3-х стандартных отклонений. При измерениях с борта движущегося мобильного аппарата такое время экспозиции будет соответствовать расстоянию, пройденному за 15 с. При движении аппарата со скоростью 12 м в минуту это расстояние равно 3 м.

В данных оценках “объем исследования”, в котором генерируются ГЛ с МГКЛ, составляет долю $\delta = 0.3$ от полного “объема прозрачности” приповерхностного слоя, в котором генерируются все регистрируемые прибором гамма-кванты (см. (2)). Если принять, что полный размер излучающего пятна составляет около 5–6 м, то для параметра $\delta = 0.3$ размер при использовании методики меченых ГКЛ должен уменьшиться в 1.7 раз и составить около 3 м. Таким образом, в рассмотренном случае физическое разрешение при измерениях переменности типа реголита прибором КГС-МГКЛ будет соответствовать параметрам его чувствительности при заданной скорости передвижения.

4.3. Оценки “фона” от космического аппарата и всей окружающей поверхности при измерении ядерных гамма-линий прибором КГС-МГКЛ

Очевидно, что детектор ДГЛ на поверхности Луны будет регистрировать все гамма-лучи, возникающие в “объеме прозрачности” вещества под воздействием ГКЛ. Для представленной выше оценки потока полного альбеда гамма-лучей от всей видимой лунной поверхности темп счета в детекторе ДГЛ с эффективной площадью 10^2 см^2 составит $F_{\text{па}} = f_{\text{па}} S_{\text{ДГЛ}} \approx 1.6 \cdot 10^3 (\eta/5.3) (f_{\text{ГКЛ}}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) \times (S_{\text{ДГЛ}}/10^2 \text{ см}^2) \text{ с}^{-1}$. К этой величине следует добавить отсчеты от регистрации наведенного гамма-излучения от находящегося вблизи детектора ДГЛ космического аппарата. Для простоты можно предположить, что вклад аппарата в темп счета сопоставим с вкладом всей поверхности, и таким образом полный суммарный темп счета в ДГЛ составляет около $F_{\text{полн}} \approx 2F_{\text{па}} = 3.2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Очевидно, что в качестве отсчетов фона при измерениях прибором КГС-МГКЛ будет выступать та доля отсчетов от суммарного потока гамма-лучей, которые случайно совпадут по времени регистрации с моментами регистрации ГКЛ в ДГКЛ. Эти отсчеты будут в принципе неотличимы от “меченых” отсчетов от гамма-лучей из “объема исследования”. Величину этого “фона” можно оценить, как число случайных совпадений отсчетов ДГЛ и ДГКЛ.

Для приведенной выше оценки потока ГКЛ около $3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ темп счета заряженных частиц в ДГКЛ составит около $F_{\text{ГКЛ}} = f_{\text{ГКЛ}} S_{\text{ДГКЛ}} = 3.1 \cdot 10^3 \times (f_{\text{ГКЛ}}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) (S_{\text{ДГКЛ}}/10^3 \text{ см}^2) \text{ с}^{-1}$.

Каждому отсчету в ДГКЛ соответствует интервал времени совпадения $\tau = 100 \text{ нс}$, в течение которого регистрация любого гамма-кванта в ДГЛ будет рассматриваться, как детектирование фотона из “объема исследования” вещества поверхности. Суммарная доля времени в течение 1 с, за которое может произойти случайное совпадение отсчета в ДГЛ от фотона испущенного за пределами “объема исследования” и отсчета от ГКЛ в ДГКЛ составляет $\tau \cdot F_{\text{ГКЛ}} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Отсюда следует оценка для темпа счета фотонов “фона”, сопровождаемых меткой регистрации частицы МГКЛ:

$$F_{\text{фон}} = \tau F_{\text{ГКЛ}} F_{\text{полн}} = 2\tau \eta f_{\text{ГКЛ}} S_{\text{ДГКЛ}} S_{\text{ДГЛ}} \approx 1 (\tau/100 \text{ нс}) (\eta/5.3) (f_{\text{ГКЛ}}/3.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1})^2 \times (S_{\text{ДГКЛ}}/10^3 \text{ см}^2) (S_{\text{ДГЛ}}/10^2 \text{ см}^2) \text{ с}^{-1} \quad (3)$$

Сопоставление оценок (1) и (3) показывает, что при измерениях с применением метода “меченых космических лучей” темп счета от фотонов “фона” пренебрежимо мал по сравнению с темпом счета фотонов “сигнала”. Можно ввести величину среднего времени регистрации отсчетов

ГКЛ в детекторе ДГКЛ, как $\langle t \rangle = 1/F_{\text{ГКЛ}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Тогда отношение “сигнал”/“фон” можно представить в виде:

$$\text{“сигнал”/“фон”} = F_{\text{ра}} / (\tau F_{\text{ГКЛ}} F_{\text{полн}}) = \delta \lambda \langle t \rangle / 2\tau \approx 2 \cdot 10^2 (\delta/0.3) (100 \text{ нс}/\tau) \quad (4)$$

Очевидно, что уменьшение доли телесного угла для детектора ДГКЛ, в котором находится изучаемая область поверхности, покрытая ДГКЛ, приводит к уменьшению отношения “сигнал”/“фон”. Отношение (4) также существенно зависит от величины времени совпадения τ , которое в данном случае было выбрано равным 100 нс. Его увеличение уменьшает данное отношение и не представляется целесообразным. Выбранная величина τ вполне соответствует характеру ядерно-физических процессов в веществе при воздействии на него энергичных заряженных частиц.

ВЫВОДЫ

Среди основных пороодообразующих элементов планетного вещества присутствуют такие элементы, как алюминий, магний, титан, железо и др., которые также входят в состав вещества аппарата. Поэтому основным преимуществом измерений состава поверхности небесного тела прибором КГС-МГКЛ является возможность исключить вклад фонового излучения от космического аппарата, на борту которого установлен этот прибор.

Особый интерес представляют измерения с прибором КГС-МГКЛ на борту мобильного исследовательского аппарата. Детектор космических лучей, в котором вырабатывается метка для отбора отсчетов от гамма-квантов, определяет размер области на поверхности, с которой излучаются меченые фотоны. Этот размер может составлять от 2–3 м до десятков сантиметров. При перемещении мобильного аппарата происходит “сканирование” изучаемой поверхности с пространственным разрешением, которое соответствует размеру области меченных ГКЛ. Очевидно, что уменьшение темпа счета фотонов при сокращении размера этой области должно компенсироваться соответствующем увеличением суммарного времени экспозиции.

Немаловажным преимуществом прибора КГС-МГКЛ является его относительно небольшая масса по сравнению с гамма-спектрометром, узкое поле зрения которого обеспечивается активной или пассивной коллимацией гамма-лучей. При сопоставлении двух вариантов гамма-спектрометров с аналогичными чувствительностями и пространственным разрешением масса прибора КГС-МГКЛ оказывается в разы меньше.

Космический прибор на основе применения методики меченных ГКЛ предполагается применять в будущих проектах по изучению элементно-

го состава вещества Луны, Марса и других небесных тел с тонкими атмосферами или без атмосфер. Он также сможет найти применение в проектах по разведке космических природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lawrence D.J., Feldman W.C., Barraclough B.L. et al.* Global elemental maps of the Луны: The Lunar Prospector Gamma-Ray Spectrometer // *Science*. 1998. V. 281. P. 1484–1489.
2. *Kobayashi S. et al.* Determining the Absolute Abundances of Natural Radioactive Elements on the Lunar Surface by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer // *Space Science Reviews*. 2010. № 154. P. 193–218.
3. *Evans L.G., Reedy R.C., Starr R.D. et al.* Analysis of gamma ray spectra measured by Марса Odyssey // *J. Geophysical Research: Planets*. 2006. V. 111. E03S04.
4. *Evans L.G., Peplowski P.N., Rhodes E.A. et al.* Major-element abundances on the surface of Mercury: Results from the MESSENGER Gamma-Ray Spectrometer // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2012. V. 117. E00L07.
5. *Surkov I.A.* Geochemical studies of Venus by Venera 9 and 10 automatic interplanetary stations. Lunar Science Conference, 8th, Houston, Tex., March 14–18. 1977. Proceedings. V. 3. (A78-41551 18-91). P. 2665–2689.
6. *Prettyman T.H. et al.* Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector // *Space Science Reviews*. 2011. V. 163. P. 371–459.
7. *Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Barmakov Yu.I. et al.* Experiment for measurements of Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) onboard NASA's Марса Science Laboratory // *Space Science Reviews*. 2012. V. 170. Issue 1–4. P. 559–582.
8. *Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Barmakov Yu.N. et al.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment NASA's 2009 Марса Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8. № 3. P. 605–612.
9. *Golovin D.V. et al.* Neutron activation analysis on the surface of the Луны and other terrestrial planets, 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2–10 August 2014. Moscow, Russia. Abstract B0.1-43-14.
10. *Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Nikiforov S.Y. et al.* The ADRON-RM Instrument Onboard the ExoМарса Rover // *Astrobiology*. 2017. V. 17. Issue 6–7. P. 585–594.
11. *Quarati F.G.A., Dorenbos P., van der Biezen J. et al.* Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity CeBr₃ gamma-ray spectrometers // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2013. A 729. P. 596–604.
12. *Kozyrev A., Mitrofanov I., Owens A. et al.* A comparative study of LaBr₃(Ce³⁺) and CeBr₃ based gamma-ray spectrometers for planetary remote sensing applications // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. P. 085112.
13. *Boynton W.V., Feldman W.C., Mitrofanov I.G. et al.* The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer Instrument Suite // *Space Sci. Rev.* 2004. V. 110. P. 37–83.
14. *Goldsten J.O. et al.* The MESSENGER gamma-ray and neutron spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 131. P. 339–391.
15. *Hasebe N. et al.* Gamma-ray spectrometer (GRS) for lunar polar orbiter SELENE // *Earth Planets Space*. 2008. V. 60. P. 299–312.
16. *Golovin D.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G. et al.* 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. Nuclei Lett.* 2018. V. 15. P. 524–530.
17. *Litvak M.L., Barmakov Y.N., Belichenko S.G. et al.* Associated particle imaging instrumentation for future planetary surface missions // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2019. A A922.
18. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Nikiforov S.Y. et al.* Cosmic gamma-ray spectrometer with tagged charged particles of Galactic Cosmic Rays // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*
19. *McCinney G.W., Lawrence D.J., Prettyman T.H. et al.* MCNPX benchmark for cosmic ray interactions with the Луны // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2006. V. 111. E06004.
20. *Lawrence D.J., Feldman W.C., Elphic R.C. et al.* Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. E08001.