

УДК 523.43

ОБ ИЗУЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ СОСТАВА ВЕЩЕСТВА МАРСА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ НА БОРТУ МОБИЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА “МЕЧЕНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ”

© 2022 г. И. Г. Митрофанов^а, А. Б. Санин^а, Д. В. Головин^а *,
С. Ю. Никифоров^а, М. Л. Литвак^а, Б. Н. Бахтин^а

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 16.11.2021 г.

После доработки 03.03.2022 г.

Принята к публикации 09.03.2022 г.

Обсуждаются методы изучения переменности в пространстве состава вещества поверхности Марса в экспериментах по гамма-спектроскопии на борту мобильного аппарата — “марсохода”. Показано, что данные о элементном составе вещества в локальных объемах вещества с характерным линейным размером порядка нескольких метров вдоль трассы движения марсохода могут быть получены с применением метода “меченых заряженных частиц” (МЗЧ). Этот метод позволяет исключить из рассмотрения как отсчеты, обусловленные гамма-излучением окружающей поверхности за пределами тестируемого локального района, так и излучение от самого космического аппарата. Также обсуждается метод отождествления состава вещества в тестируемом объеме с известными типами марсианского реголита согласно данным эксперимента APXS. Этот метод основан на сопоставлении измеренных интенсивностей основных характеристических ядерных линий со значениями, соответствующими этим линиям для известных типов реголита. Отмечается, что предложенный метод позволяет экспериментально обнаружить новые типы реголита, состав которых отличается от состава всех ранее известных типов марсианского вещества.

Ключевые слова: Марс, состав вещества Марса, гамма-спектрометрия, ядерное излучение

DOI: 10.31857/S0320930X2205005X

ВВЕДЕНИЕ: КОНЦЕПЦИЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МЗЧ

Марс имеет относительно тонкую атмосферу, поэтому поток энергичных частиц галактических космических лучей (ГКЛ) практически свободно проникает в верхний слой вещества поверхности с толщиной около метра и взаимодействует с ядрами основных порообразующих элементов. В результате этих взаимодействий образуются вторичные нейтроны с энергиями около 0.5–20 МэВ (см., например, Reedy, 1978). В марсианском веществе нейтроны имеют свободный пробег, много меньший толщины слоя проникновения ГКЛ, поэтому они диффундируют в этом слое, взаимодействуя с ядрами порообразующих элементов. В этих реакциях ядра переходят на возбужденные энергетические уровни или образуют новые ядра также на возбужденных уровнях. Кроме того, возбужденные ядра могут образовываться в грунте в прямых реакциях с высоко-

энергичными частицами ГКЛ. Возбужденные ядра переходят в основное состояние с излучением гамма-квантов с энергиями, соответствующими их возбужденным уровням.

Регистрируя линии ядерного гамма-излучения с локального участка на поверхности Марса, можно определить типы излучающих ядер, а по оценке интенсивностей этих линий — измерить массовую долю соответствующих ядер в веществе. Такие линии называются “характеристическими”, так как позволяют отождествить ядра, которые их излучают. Однако, как отмечалось ранее (Санин и др., 2020), основная трудность практического применения метода спектрального гамма-анализа состоит в том, что под воздействием ГКЛ вся окружающая поверхность и марсоход, на борту которого находится прибор, также излучают в гамма-диапазоне. Таким образом, спектрометр на борту марсохода будет регистрировать суммарный поток гамма-излучения как от тестируемого объема планетного вещества непосредственно под космическим аппаратом, так и от

Таблица 1. Составы основных породообразующих элементов для четырех типов марсианского реголита с предельными минимальными и максимальными концентрациями железа и алюминия (Thompson и др., 2016) и для характерного состава марсианского вещества (Taylor, McLennan, 2009)

№	Название типа реголита	Обозначение	Массовая доля O, (%)	Массовая доля Si, (%)	Массовая доля Fe, (%)	Массовая доля Al, (%)	Массовая доля Mg, (%)	Массовая доля Ca, (%)	Массовая доля Ti, (%)	Сумма, (%)
1	Aver. crust	AV	44.0	22.4	13.8	5.4	5.3	4.8	0.6	96.2
2	Et Then	ET	42.2	20.6	20.6	4.4	2.4	2.5	0.4	93.1
3	Buckskin	BU	50.1	31.0	3.3	3.1	2.0	2.7	0.9	93.2
4	Jake M	JM	45.3	23.3	8.7	8.4	1.8	4.0	0.3	91.8
5	Greenhorn	GR	47.8	25.6	7.1	2.8	2.8	4.2	0.6	90.9

излучения от полного излучения всей поверхности составляет 0.3. Этой величине соответствует диаметр ЛОВ_{ДМЗЧ} на поверхности около 0.6 м.

На рис. 2 представлены рассчитанные интегральные спектры (ИС) отсчетов в традиционном гамма-спектрометре для полного излучения однородной поверхности Марса с составами реголита типов AV, ET, BU, JM и GR. Для этих же составов реголита однородной поверхности были рассчитаны спектры отсчетов (С/МЗЧ) для “раннего альбедо” гамма-излучения, которые в аналогичных условиях должен регистрировать прибор КГС-МЗЧ (рис. 3).

Очевидно, что интегральные спектры ИС излучения от поверхности с однородными составами AV, ET, BU, JM и GR заметно различаются между собой (рис. 2). Моделирование показало,

что спектры С/МЗЧ, измеренные прибором КГС-МЗЧ для указанных выше пяти вариантов состава однородной поверхности, также заметно различаются между собой (рис. 3). В спектрах хорошо заметны ядерные линии “раннего альбедо” от реакций, которые имеют место в течение короткого времени порядка десятков наносекунд после регистрации заряженной частицы в ДМЗЧ. Это линия 847 кэВ от реакции неупругого рассеяния вторичного нейтрона на ядре железа ($^{56}\text{Fe} (n, n\gamma)$), линия 1367 кэВ, образующаяся в реакциях скола $^{27}\text{Al} (p, \alpha\gamma)$ ^{24}Mg под воздействием протонов ГКЛ, линия 1779 кэВ от реакции неупругого рассеяния вторичного нейтрона на ядре кремния ($^{28}\text{Si} (n, n\gamma)$). При этом очевидно, что в случае поверхности с однородным составом вещества метод МЗЧ не дает заметного преимущества для оценки эле-

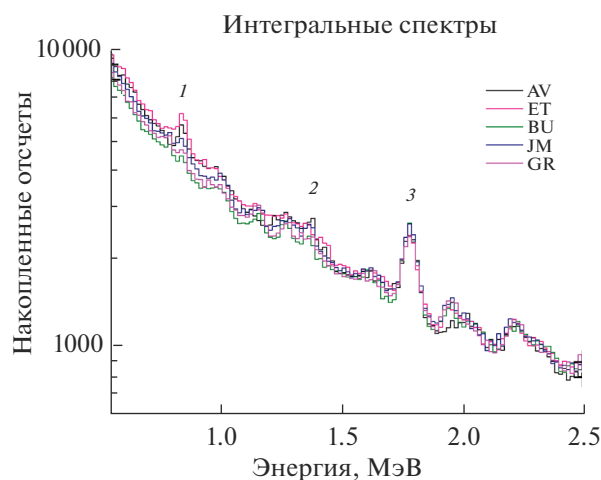


Рис. 2. Интегральные спектры отсчетов, накопленные за 15 мин наблюдения в четырех детекторах на основе бромида церия, расположенных над однородной поверхностью с составами типов AV, ET, BU, JM и GR. Цифрами обозначены спектральные особенности, соответствующие линиям излучения: 1 – 847 кэВ ($^{56}\text{Fe} (n, n\gamma)$), 2 – 1369 кэВ ($^{27}\text{Al} (p, \alpha\gamma)$), 3 – 1779 кэВ ($^{28}\text{Si} (n, n\gamma)$).

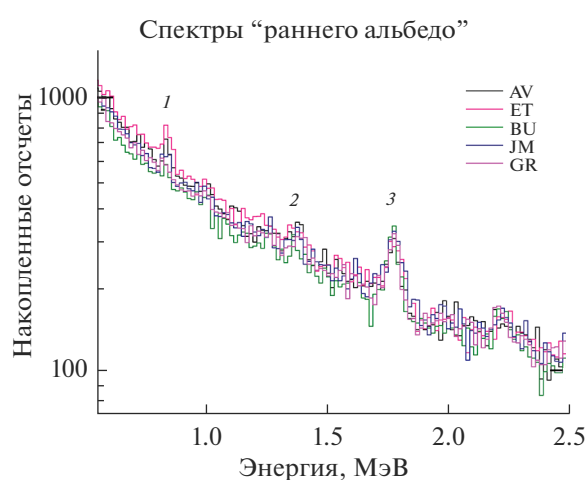


Рис. 3. Спектры С/МЗЧ отсчетов “раннего альбедо”, накопленные за 15 мин наблюдения в четырех детекторах на основе бромида церия, расположенных над однородным грунтом с составами типов AV, ET, BU, JM и GR. Цифрами обозначены спектральные особенности, соответствующие линиям излучения: 1 – 847 кэВ ($^{56}\text{Fe} (n, n\gamma)$), 2 – 1367 кэВ ($^{27}\text{Al} (p, \alpha\gamma)$), 3 – 1779 кэВ ($^{28}\text{Si} (n, n\gamma)$).

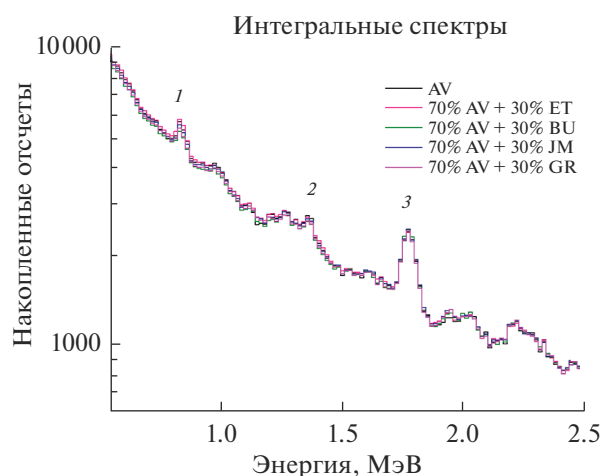


Рис. 4. Интегральные спектры отсчетов, накопленные за 15 мин наблюдения в четырех детекторах на основе бромида церия, расположенных над поверхностью с неоднородным составом — локальный объем вещества с составами типов ET, BU, JM и GR окружен поверхностью с составом типа AV. Цифрами обозначены спектральные особенности, соответствующие линиям излучения: 1 — 847 кэВ (^{56}Fe (n, γ)), 2 — 1367 кэВ (^{27}Al (p, $\alpha\gamma$)), 3 — 1779 кэВ (^{28}Si (n, γ)).

ментного состава вещества по сравнению с традиционной гамма-спектрометрией.

Также было проведено численное моделирование интегральных спектров (ИС) для гамма-спектрометра КГС над марсианской поверхностью с неоднородным составом. Для постановки задачи предполагалось, что состав вещества в пределах ЛОВ_{ДМЗЧ} непосредственно под детектором ДМЗЧ соответствует одному из указанных предельных типов (ET, BU, JM и GR), в то время как вещество за пределами этого объема имеет состав типа AV (табл. 1). Результаты моделирования подтвердили, что локальная неоднородность состава вещества в локальном объеме с линейным размером около 0.6 м не может быть достоверно обнаружена при анализе ИС, полученных при использовании обычного гамма-спектрометра (см. рис. 4). Детальный количественный анализ модельных ИС для излучения поверхности с различными составами вещества в объеме ЛОВ_{ДМЗЧ} показал практически полное отсутствие различий между ними (см. раздел “Результаты численного моделирования экспериментов по изучению локальных вариаций состава марсианской поверхности методом обычной гамма-спектрометрии и методом МЗЧ”).

Следует отметить, что в модельных спектрах ИС и С/МЗЧ, рассчитанных для вещества с различным составом (рис. 2 и 3), присутствуют линии ядерного излучения от всех основных породообразующих элементов. Поэтому гамма-спек-

тральный анализ состава марсианского реголита не может быть основан на поиске и отождествлении каких-то особых характеристических линий, присущих конкретным типам грунтов. Необходимо проводить количественное сопоставление интенсивностей основных характеристических линий породообразующих элементов. Очевидно, что необходимость такого количественного анализа делает практически невозможным поиск и тестирование локальных неоднородностей состава поверхности на основе сравнения интегральных спектров, так как вклады в интенсивности линий от излучения разных участков поверхности суммируются и усредняются.

Ранее было показано (Санин и др., 2020), что метод космической гамма-спектрометрии с метками от заряженных частиц прибора КГС-МЗЧ в принципе позволяет изучать переменность состава лунного вещества на основе сравнения спектров С/МЗЧ излучения от ЛОВ_{ДМЗЧ} в случае, если этот пробный объем совпадает с объемом ЛОВ_{ДМЗЧ}, который определяется параметрами детектора заряженных частиц ДМЗЧ. Однако до перехода к анализу этих модельных спектров необходимо рассмотреть еще одну проблему, связанную с необходимостью количественного анализа интенсивностей характеристических линий в спектрах гамма-излучения от поверхности Марса (см. раздел “Использование безразмерных спектрометрических параметров для сравнения гамма-излучения поверхности Марса с различным составом”).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАРСА С РАЗЛИЧНЫМ СОСТАВОМ

Важным обстоятельством, которое следует учитывать при проведении экспериментов по гамма-спектральному анализу состава вещества небесного тела является собственная переменность потока ГКЛ. Эти лучи, как следует из названия, имеют галактическое происхождение, и их поток за пределами Солнечной системы постоянен. Однако во внутренней области Солнечной системы поток ГКЛ испытывает переменность. Долгопериодическая переменность потока ГКЛ возникает вследствие расширения и сжатия границы гелиосферы в межзвездном пространстве вследствие 11-летнего цикла солнечной активности. Короткопериодическая переменность на масштабах суток возникает вследствие рассеяния заряженных частиц ГКЛ на неоднородностях замагниченной межпланетной плазмы в окрестности точки измерения. Очевидно, что изменение потока ГКЛ вызывает сопутствующую переменность вторичного гамма-излучения с поверхно-

сти небесного тела, включая интенсивности линий ядерного излучения.

Если при проведении гамма-спектрометрического эксперимента по изучению поверхности Марса с борта мобильного аппарата эффект собственной переменности ГКЛ окажется неучтенным, то обнаруженная переменность интенсивностей гамма-линий, измеренных в разных местах в разные моменты времени, может быть ошибочно интерпретирована, как изменение состава вещества планеты вдоль трассы движения аппарата. Аналогично, ложный вывод об изменении состава вещества может быть сделан на основе наблюдаемой переменности интенсивностей гамма-линий, связанной с вариациями средней плотности вещества вдоль трассы движения марсохода.

Для исключения эффектов, обусловленных переменностью потока ГКЛ или изменениями плотности вещества вдоль трассы марсохода в качестве измеряемых спектрометрических параметров следует использовать не абсолютные величины интенсивностей линий ядерного гамма-излучения, а их отношения для различных пороодообразующих элементов.

Данные прибора APXS показали, что все типы марсианского реголита (табл. 1) имеют относительно мало меняющуюся долю кремния, входящего в состав основного химического соединения вещества планеты SiO_2 (см. табл. 1). Фактор переменности массовой доли кремния составляет всего 1.5. Реакции неупругого рассеяния нейтронов на основном изотопе кремния ^{28}Si ($n, n\gamma$) сопровождаются излучением нескольких линий: 1779, 2235, 2839 кэВ и других. Целесообразно выбрать среди них одну, которая может служить в качестве “реперной” для измерения переменности линий других элементов относительно этой линии. Известно, что при неупругом рассеянии нейтронов на ядрах кремния интенсивность линии 1779 кэВ превышает интенсивность остальных линий во много раз (см. рис. 2–4). Этот факт делает линию 1779 кэВ наиболее предпочтительной. Однако недостатком использования этой линии в качестве реперной является близость ее энергии 1779 кэВ к линии 1809 кэВ, возникающей, например, в реакции ^{26}Mg ($n, n\gamma$) или ^{27}Al (n, γ). Поэтому при проведении спектрометрии достоверность оценки интенсивности линии кремния 1779 кэВ будет зависеть от качества спектрального разрешения гамма-спектрометра. Следует отметить, что выбор “реперной” линии не влияет на методику проведения измерений и может быть сделан на этапе анализа полученных данных. Ниже результаты численного моделирования спектрометрического эксперимента с прибором КГС-МЗЧ представлены для варианта ис-

пользования в качестве “реперной” линии 1779 кэВ.

Ниже для количественного анализа модельных спектров (рис. 2–4) использовались безразмерные спектрометрические параметры (БСП), равные отношению интенсивностей характеристических линий железа и алюминия к интенсивности выбранной “реперной” линии для кремния 1779 кэВ. В качестве простейшего примера ниже рассмотрен случай сравнения модельных спектров (рис. 2–4) для пяти типов реголита (табл. 1). Параметры БСП для алюминия и железа были определены на основе измерений линии 1369 кэВ и 847 кэВ, соответственно. При таком рассмотрении каждый тип реголита может быть однозначно сопоставлен точке на двумерной “плоскости сравнения” с координатами $\text{БСП}(A) = Y_A/Y_{\text{Si}}$ (где A — тип элемента, алюминий или железо, Y_A — интенсивность характеристической ядерной линии элемента A , а Y_{Si} — интенсивность реперной линии кремния).

Очевидно, что значения спектрометрических параметров $\text{БСП}(A)$ не могут напрямую сопоставляться с отношениями массовых долей элементов A к массовой доле кремния. Во-первых, интенсивности излучения конкретных линий ядер разных элементов определяется физическими параметрами “силы осциллятора” для соответствующего квантового перехода. Во-вторых, характеристические линии разных элементов имеют разные энергии и, соответственно, фотоны излучения этих линий имеют разные сечения взаимодействия с веществом поверхности. Однако следует учесть, что использование в рамках одного эксперимента одинаковых ядерных линий для оценок $\text{БСП}(A)$ позволяет обнаружить эффект переменности состава вещества и затем на основе численного моделирования оценить массовые доли соответствующих элементов в этом веществе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЛОКАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ СОСТАВА МАРСИАНСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ОБЫЧНОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ И С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МЗЧ

Рис. 5 представляет результаты численного моделирования ИС гамма-излучения, измеренных с обычным КГС, от однородной поверхности с составом вещества типов AV, ET, BU, JM и GR, представленные в виде параметров БСП на плоскости {БСП(Al), БСП(Fe)}. Положение точек указывает на различие массовых долей алюминия и железа для случаев, когда однородная по составу поверхность соответствует разным типам реголи-

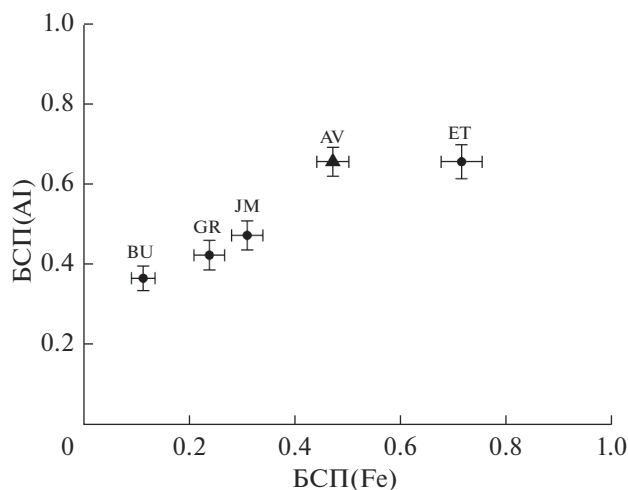


Рис. 5. Распределение пяти типов грунтов по параметрам БСП(Al) и БСП(Fe) при регистрации полного потока гамма-излучения с обычным гамма-спектрометром для случая однородной поверхности с составом вещества типов AV, ET, BU, JM и GR. Значения указанных параметров для однородного грунта типа AV показаны треугольными символами. Исходные данные соответствуют модельным спектрам ИС, накопленным за 15 мин наблюдений (см. рис. 2).

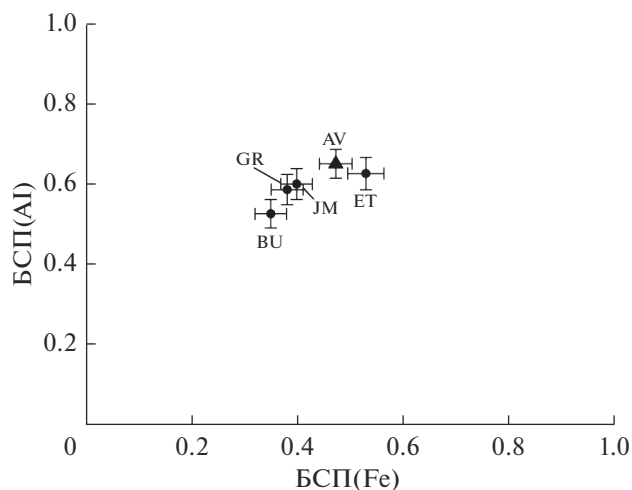


Рис. 6. Распределение пяти типов грунтов по параметрам БСП(Al) и БСП(Fe) при регистрации полного потока гамма-излучения с обычным гамма-спектрометром для случая присутствия в грунте с составом типа AV локальной неоднородности с составом ET, BU, JM и GR. Значения указанных параметров для однородного грунта типа AV показаны треугольными символами. Исходные данные соответствуют модельным спектрам ИС, накопленным за 15 мин наблюдений (см. рис. 4).

та (табл. 1). Наблюдаемое качественное различие модельных спектров ИС, заметное на рис. 2, можно количественно характеризовать “параметрическими расстояниями” между соответствующими точками для параметров БСП на указанной плоскости. Модельный эксперимент, результаты которого представлены на рис. 5, с очевидностью подтверждает тот известный факт, что данные обычного гамма-спектрометра позволяют обнаружить различие состава вещества в пределах всего наблюдаемого участка поверхности.

С другой стороны, численное моделирование показало, что локальные неоднородности состава вещества типов ET, BU, JM и GR в объеме ЛОВ_{ДМЗЧ}, доля излучения которого составляет 30% от полного потока поверхности с составом вещества типа AV, при наблюдениях ИС с обычным спектрометром окажутся практически незаметными (рис. 4). Этот качественный вывод также подтверждается на основе количественных оценок параметров {БСП(Al), БСП(Fe)} (рис. 6). Относительное расположение точек БСП для реголита с максимальным и минимальным содержанием железа, ET и BU, соответственно, отличается по параметру БСП(Fe) на фактор 1.5, в то время как для поверхности с однородным составом этот фактор составляет около 6.6 (см. рис. 5). Относительное расположение точек БСП для реголитов с максимальным и минимальным содержанием алюминия, соответственно JM и GR, в пределах ошибок не различается. Очевидно, что точки БСП для локальных объемов вещества с со-

ставами типов ET, BU, JM и GR смещаются к точке для состава типа AV, которая соответствует составу окружающей поверхности (рис. 6). Следует отметить, что рассмотренный случай локальной неоднородности соответствует доле излучения 0.3 из объема неоднородности относительно полного излучения поверхности. При уменьшении этой доли точки БСП для ET, BU, JM и GR должны приближаться к точке БСП для AV и в пределе совпасть с этой точкой.

На рис. 7 представлены параметры {БСП(Al), БСП(Fe)} для характеристических линий Al и Fe спектров С/МЗЧ гамма-излучения “раннего альbedo”, которое регистрирует прибор КГС-МЗЧ, от локального объема, совпадающего с ЛОВ_{ДМЗЧ}, и имеющего различные составы типов ET, BU, JM и GR (см. рис. 3). В этом случае переменность характеристических линий алюминия и железа проявляется достаточно ярко. Очевидно, что регистрация гамма-излучения только от выделенного локального объема вещества ЛОВ_{ДМЗЧ} значительно уменьшает статистическую обеспеченность спектров С/МЗЧ. На верхней части рис. 7 статистические погрешности значений БСП соответствует статистике модельного спектра (рис. 3), время измерения которого составило 15 мин. При увеличении времени измерения до 1 ч погрешности в оценках БСП становятся значительно меньше относительного расстояния между ними для вещества с различными составами типов ET, BU, JM и GR.

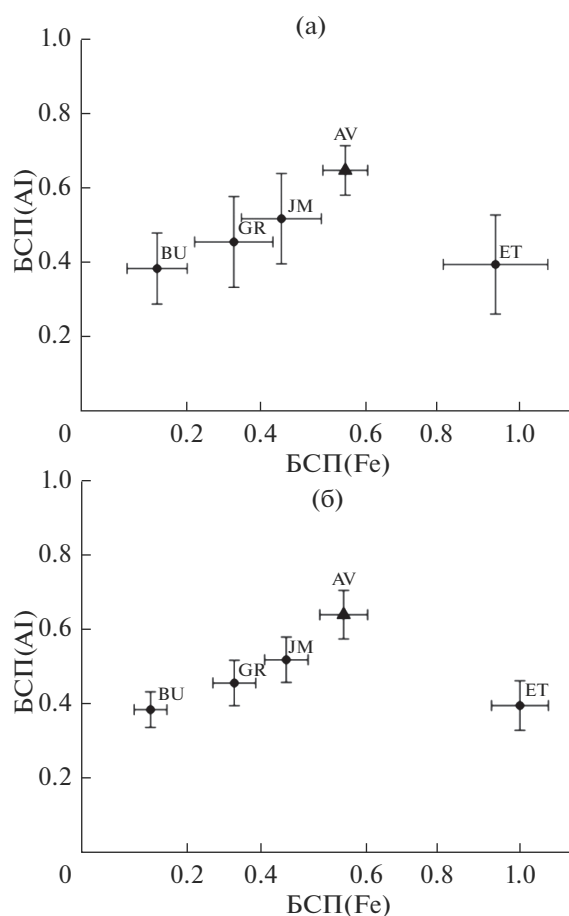


Рис. 7. Распределение пяти типов грунтов по параметрам БСП(Al) и БСП(Fe) при регистрации “раннего альbedo” гамма-излучения с гамма-спектрометром КГС-МЗЧ для случая присутствия в грунте локальной неоднородности состава типов ET, BU, JM и GR. Значения указанных параметров для однородного грунта типа AV показаны треугольными символами. Для верхнего рисунка исходные данные соответствуют модельным спектрам С/МЗЧ, накопленным с прибором КГС/МЗЧ за 15 мин наблюдений (см. рис. 3). При увеличении времени измерения до 1 ч погрешности уменьшаются в два раза, и относительные расстояния в пространстве параметров БСП значительно превышают статистически погрешности измерений (нижний рисунок).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После публикации о практическом применении нового метода планетной гамма-спектрометрии для исследований Луны (Санин и др., 2020), в данной статье на основе численного моделирования показано, что метод гамма-спектрометрии с использованием КГС-МЗЧ также позволяет исследовать пространственную переменность состава вещества Марса с борта мобильного аппарата-марсохода с пространственным разрешением порядка десятков сантиметров. На примере анализа модельных спектров гамма-излучения от известных типов марсианского вещества с макси-

мальными и минимальными концентрациями железа и алюминия показано, что наличие локальной пространственной неоднородности состава поверхности оказывается практически незаметным в интегральных спектрах, полученных с обычным гамма-спектрометром (рис. 4), но хорошо проявляется в спектрах С/МЗЧ, построенных для таких условий на основе данных измерений с прибором КГС-МЗЧ (рис. 3).

В статье показано, что данные спектральных измерений с КГС-МЗЧ характеристических ядерных линий от локальных областей поверхности с различным составом могут быть представлены в виде тестовых точек БСП в многомерном параметрическом “объеме сравнения”. Размерность этого объема определяется полным числом измеренных характеристических линий минус 1 (это вычитание учитывает использование линии кремния в качестве реперной). В данной статье рассмотрен простейший случай учета только характеристических линий алюминия и железа. Численное моделирование показало, что объединение метода гамма-спектрологии с КГС-МЗЧ с применением параметров БСП для анализа характеристических ядерных линий позволяет обнаружить локальные вариации состава вещества с характерным линейным разрешением порядка десятков сантиметров. В статье рассмотрен конкретный вариант эксперимента с прибором КГС-МЗЧ, для которого линейное пространственное разрешение вариаций состава составляет около 60 см.

С учетом того, что 12 типов реголита с различными составами уже известны, значения БСП для параметрического объема сравнения могут быть заранее рассчитаны для каждого известного состава, и соответствующие им “базовые” точки могут быть заранее распределены в этом объеме. В ходе проведения эксперимента данные каждого отдельного измерения тестового спектра С/МЗЧ должны преобразовываться в соответствующие значения БСП. Статистическая погрешность измерений преобразуется в область статистической погрешности значений БСП вокруг положения измеренной точки. Оценка параметрических “расстояний” от тестовой точки до базовых точек, соответствующих различным типам реголита, позволяет определить, к какому типу относится реголит в районе, где было проведено измерение. “Расстояние” оценивается с учетом статистических погрешностей для измеренных интенсивностей, и сопоставление между оценками “расстояний” от тестовой точки до базовых точек позволяет определить наиболее вероятный тип тестируемого реголита и степень достоверности такого отождествления. В том случае, когда такая достоверность мала для всех базовых точек, можно утверждать, что реголит в тестируемой области имеет ранее неизвестный состав, отличающийся от всех известных типов реголита.

Авторы благодарят Российский научный фонд за поддержку исследований, результаты которых представлены в данной статье (грант РНФ № 18-12-00487).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митрофанов И.Г., Головин Д.В., Никифоров С.Ю., Санин А.Б., Аникин А.А., Дьячкова М.В., Карпушкина Н.Е., Лисов Д.И., Литвак М.Л., Мокроусов М.И., Тимошенко Г.Н., Крылов А.Р., Швецов В.Н., Мицин Г.В., Молоканов А.Г., Дубасов П.А., Зонтиков А.О.* Результаты экспериментальной верификации гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами на протонном пучке ускорителя ОИЯИ // Письма в журн. “Физика элементарных частиц атомного ядра”. 2019. С. 233–239.
<https://doi.org/10.1134/S1547477119030142>
- Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Головин Д.В., Никифоров С.Ю., Санин А.Б., Аникин А.А., Мокроусов М.И., Тимошенко Г.Н., Крылов А.Р., Швецов В.Н., Мицин Г.В., Молоканов А.Г.* Гамма-спектрометрия составных мишеней-аналогов планетного вещества на протонном пучке ускорителя ОИЯИ с использованием метода меченых протонов // Письма в журн. “Физика элементарных частиц атомного ядра”. 2020. С. 299–313.
<https://doi.org/10.1134/S1547477120030115>
- Санин А.Б., Митрофанов И.Г., Бахтин Б.Н., Литвак М.Л., Аникин А.А., Головин Д.В., Никифоров С.Ю.* Об изучении пространственной переменности состава вещества Луны в экспериментах по гамма-спектропии на борту мобильного аппарата с применением метода “меченых космических лучей” // Астрон. вестн. 2020. С. 508–519. Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. P. 477–487.
<https://doi.org/10.1134/S0038094620060052>
<https://doi.org/10.31857/S0320930X20060055>
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Nikiforov S.Y., Golovin D.V., Anikin A.A., Djachkova M.V., Karpushkina N.E., Lisov D.I., Litvak M.L., Mokrousov M.I., Dubasov P.A., Zontikov A.O.* Cosmic Gamma-Ray Spectrometer with Tagged Charged Particles of Galactic Cosmic Rays // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2019. (163148).
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163148>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Anikin A.A., Mokrousov M.I., Golovin D.V., Nikiforov S.Y., Timoshenko G.N., Shvetsov V.N.* Laboratory demonstration of space experiment for spectrometry of planetary gamma-rays with tags of Galactic Cosmic Rays producing them // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research Section A. 2021. V. 1003. (165286). article id. 165286.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165286>
- Reedy R.C.* Planetary gamma-ray spectroscopy // Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf. 9th. 1978. P. 2961–2984.
- Thompson L.M., Schmidt M.E., Spray J.G., Berger J.A., Fairén A.G., Campbell J.L., Perrett G.M., Boyd N., Gellert R., Pradler I., VanBommel S.J.* Potassium-rich sandstones within the Gale impact crater, Mars: The APXS perspective // J. Geophys. Res. Planets. 2016. V. 121. P. 1981–2003.
<https://doi.org/10.1002/2016JE005055>
- Taylor S.R., McLennan S.M.* Planetary Crusts: Their Composition, Origin and Evolution. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. 378 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511575358>