Письма в ЖЭТФ, том 99, вып. 3, с. 131 – 137 © 2014 г. 10 февраля

К вопросу о распределениях фотоэлектронов над освещенной частью Луны

С. И. Попель[+*×1)], *А. П. Голубь*[+], *Ю. Н. Извекова*[+*×], *В. В. Афонин*[*], *Г. Г. Дольников*[*], *А. В. Захаров*[*], *Л. М. Зеленый*[*×], *Е. А. Лисин*[°], *О. Ф. Петров*[×°]

[+]*Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, Россия*

[*]*Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия*

[×]*Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия*

[°]*Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 25 декабря 2013 г.

Существующие представления о фотоэмиссионных свойствах лунного реголита не дают однозначной трактовки относительно параметров и распределений фотоэлектронов над освещенной частью Луны. На это указывают проведенные в данной работе вычисления концентрации, температуры и функции распределения фотоэлектронов. Продемонстрировано, что основным параметром, влияющим на генерацию фотоэлектронов у поверхности Луны, является квантовый выход лунного реголита. На сегодняшний день имеется весьма существенная неоднозначность в определении его величины. В качестве варианта решения указанной проблемы предлагается проведение экспериментов по измерению квантового выхода реголита непосредственно на поверхности Луны. Последнее может быть осуществлено в рамках будущих лунных миссий.

DOI: 10.7868/S0370274X14030011

Особенностью окололунного пространства является наличие плазменно-пылевой системы. Этот факт нашел свое отражение в современных лунных исследованиях [2–4]. В России готовятся миссии Луна-25, Луна-26, Луна-27, Luna Sample Return и т.д. На посадочных модулях станций Луна-25 и Луна-27 предполагается разместить аппаратуру, которая будет исследовать свойства пылевой плазмы над поверхностью Луны (см. рис. 1). В американской миссии LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer), запущенной в 2013 г., пылевая плазма будет изучаться с помощью наблюдений с орбиты.

Важной составляющей плазменно-пылевой системы над освещенной частью Луны наряду с заряженными пылевыми частицами, электронами и ионами солнечного ветра являются фотоэлектроны. Фотоэлектроны испускаются лунной поверхностью при ее взаимодействии с солнечным излучением, а также пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Концентрация фотоэлектронов может существенно превосходить концентрацию электронов солнечного ветра. Таким образом, исследования фотоэлектронов в приповерхностном слое освещенной части Луны представляют существенный интерес как с научной, так и с технологической точки зрения для устанавливаемой на лунных станциях аппаратуры, выбора места посадки и т.д.

Верхняя часть датчиков электрического поля ES на посадочных модулях Луна-25 и Луна-27 представляет собой аналог классического зонда Ленгмюра, который будет диагностировать прежде всего свойства фотоэлектронов. Чтобы осуществить успешные измерения, необходимо при разработке датчиков электрического поля учитывать расчетные параметры фотоэлектронов. Однако при таком расчете возникают трудности, которые могут быть устранены только прямыми экспериментальными методами. Данная работа посвящена расчету параметров фотоэлектронов у поверхности Луны, обсуждению трудностей, возникающих при определении их численных значений, а также описанию экспериментов, которые необходимо провести в рамках будущих лунных миссий.

Фотоэлектроны у поверхности Луны возникают главным образом от самой поверхности при ее взаимодействии с солнечным излучением. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям Φ_e опре-

[1)]e-mail: s_i_popel@mtu-net.ru

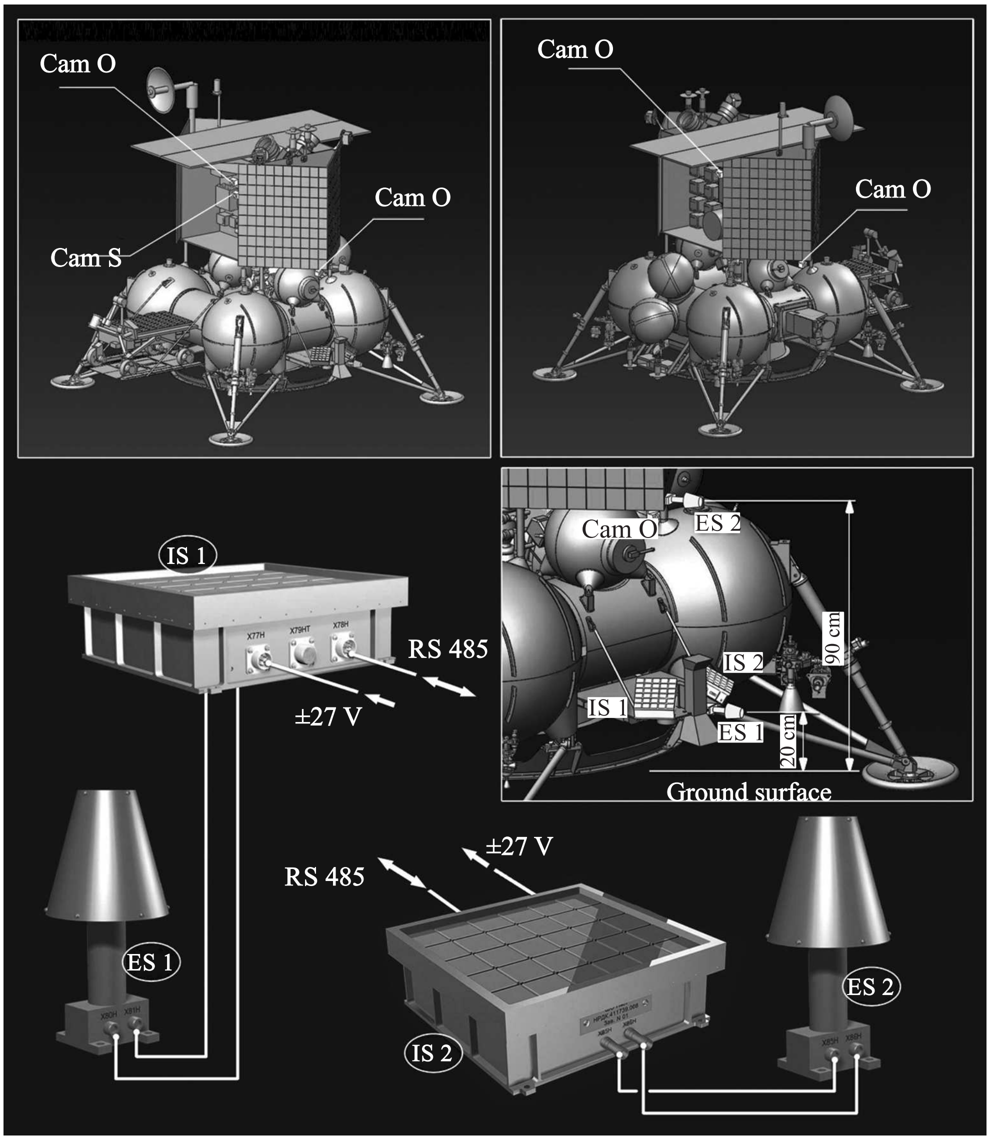

Рис. 1. Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станциях Луна-25 и Луна-27. Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и обзорные камеры Cam O)

деляется стандартным образом [5] на основе расчета плотности потока фотоэлектронов, испускаемых твердым телом под действием излучения:

$$\Phi_e(E_e)dE_e = 2\cos\theta\sqrt{\frac{2m_e}{E_e}}\int_{E_e+W}^{\infty} Y(E_{ph})F_{ph}d\rho dE_{ph}, \tag{1}$$

где E_e – энергия фотоэлектрона, E_{ph} – энергия фотона, W – работа выхода фотоэмиссии, θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце, m_e – масса электрона, $Y(E_{ph})$ – квантовый выход, зависящий от энергии фотонов, $F_{ph}dE_{ph}$ – число фотонов солнечного излучения с энергией E_{ph} в интервале dE_{ph}, пересекающих в единицу времени единичную площадку, перпендикулярную к направлению движения фотонов,

$$d\rho = \frac{6(E_m - E_e)}{E_m^3}E_e dE_e \quad (0 \le E_e \le E_m = E_{ph} - W)$$

есть вероятность [5] того, что в результате поглощения фотона с энергией E_{ph} испускается электрон с энергией E_e в интервале энергий dE_e. Коэффициент “2” в правой части (1) обусловлен тем, что в стационарном состоянии количества электронов, покидающих и поглощаемых поверхностью твердого тела, равны. При выводе (1) пренебрегалось возможной анизотропией функции распределения фотоэлектронов в пространстве скоростей, обусловленной неровностью поверхности Луны.

Функция распределения (1) может быть использована для нахождения концентрации N_0 и температуры T_e фотоэлектронов в приповерхностном слое Луны:

$$N_0 = \int_0^\infty \Phi_e(E_e)dE_e, \tag{2}$$

$$T_e = \frac{2}{3}\langle E_e\rangle \equiv \frac{2}{3N_0}\int_0^\infty E_e\Phi_e(E_e)dE_e. \tag{3}$$

При вычислении функции распределения фотоэлектронов, их концентрации и температуры важными параметрами являются спектр солнечного излучения, квантовый выход и работа выхода лунного реголита. Как полагают [6], типичные значения работы выхода для лунного реголита варьируются в пределах 5–6 эВ.

Что касается спектров солнечного излучения, то они существенно варьируются в течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. На рис. 2 приводятся спектры, характеризующие различную солнечную активность [7, 8]. Однако несмотря на вариации количества энергии, излучаемой Солнцем в ультрафиолетовом диапазоне (основном с точки зрения испускания фотоэлектронов), в указанном цикле не происходит существенных (на порядки величины) изменений значений N_0 и T_e.

Квантовый выход, определяющий число электронов, выбиваемых с поверхности одним фотоном, является весьма важным параметром, требующим дальнейших уточнений. Действительно, в работах, посвященных исследованию плазменно-пылевой системы и/или фотоэлектронам у поверхности Луны, как правило, используются зависимости значения квантового выхода, приведенные в работах [5] и [9]. Наиболее вероятный квантовый выход вещества лунной поверхности, приведенный в [5] (рис. 11), может быть аппроксимирован следующим образом:

$$\begin{aligned} &Y(E_{ph}) = 0, && E_{ph} < 6,\\ &Y(E_{ph}) \approx 0.02 + 0.06(E_{ph} - 6), && 6 \le E_{ph} \le 9,\\ &Y(E_{ph}) \approx 0.2, && E_{ph} \ge 9, \end{aligned} \tag{4}$$

где E_{ph} выражается в эВ. Здесь подразумевается, что работа выхода $W = 6$ эВ. Квантовый выход, полученный в [9], является результатом экспериментального исследования, выполненного на образцах лунной пыли, доставленных на Землю в миссиях

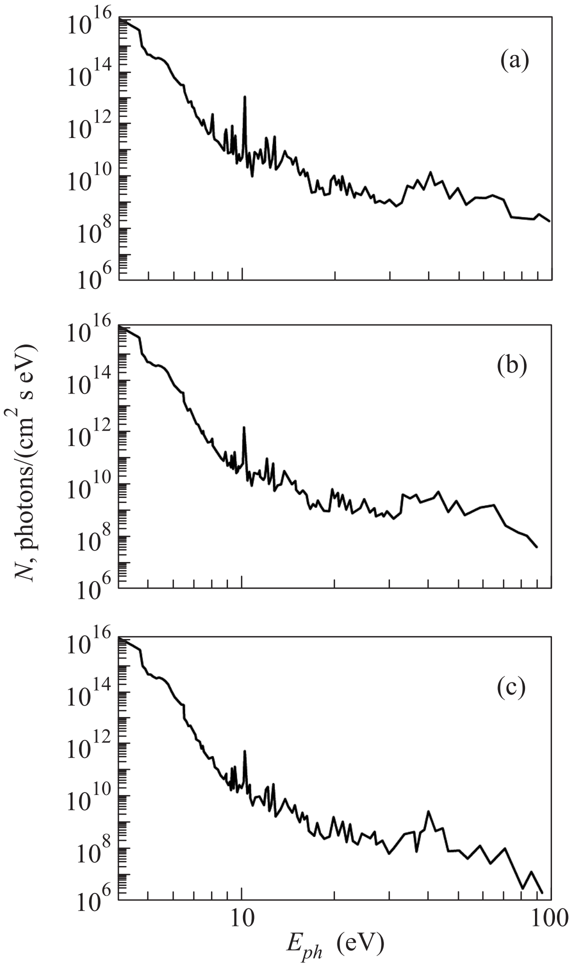

Рис. 2. Потоки солнечного излучения в зависимости от энергии фотонов (в логарифмическом масштабе), соответствующие солнечной вспышке класса X28 (a), солнечному максимуму (b) и солнечному минимуму (c) [7, 8]

Аполлон-14 и 15. Зависимость квантового выхода [9] существенным образом отличается от теоретической (полуэмпирической) зависимости (4). Прежде всего, максимальное значение $Y(E_{ph})$ из [9], приблизительно равное 0.09 ± 0.003, достигается при длине электромагнитной волны около 900 Å, что соответствует $E_{ph} \approx 13.7$ эВ. При значениях E_{ph}, отличных от 13.7 эВ, величина квантового выхода существенным образом уменьшается (на несколько порядков величины). Так, при $E_{ph} \approx 7$ эВ она падает до значения $\sim 10^{-6}$, а при приближении E_{ph} к работе выхода уменьшается еще на 1–2 порядка.

В таблице приведены параметры фотоэлектронов, рассчитанные по формулам (1)–(3) при $\cos\theta = 1$ (т.е. вблизи экватора) в приповерхностном слое освещенной части Луны для солнечной активности, соответствующей солнечной вспышке класса X28 (столбец I), солнечному максимуму (столбец II) и солнечному минимуму (столбец III), для различных значений квантового выхода (строки, характеризуемые индексом "1", соответствуют квантовому выходу (4), а индексом "2" – квантовому выходу из работы [9]). Видно, что существенная разница в значениях квантового выхода [5] и [9] приводит к совершенно различным характеристикам фотоэлектронов у поверхности Луны, полученным в расчетах. Зависимость параметров N_0 и T_e от солнечной активности не столь велика. Различия в квантовом выходе [5] и [9] также существенно сильнее сказываются на расчетах, чем вариации работы выхода (5–6 эВ). Значения N_0 при $\cos\theta \neq 1$ получаются умножением данных таблицы на величину $\cos\theta$. Электронная температура T_e от $\cos\theta$ не зависит.

Параметры фотоэлектронов в приповерхностном слое освещенной части Луны для различной солнечной активности и различных значений квантового выхода

	I	II	III
N_{01}, см$^{-3}$	$2.2 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^5$
T_{e1}, эВ	0.2	0.1	0.1
N_{02}, см$^{-3}$	$8.6 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$
T_{e2}, эВ	2.1	1.9	1.3

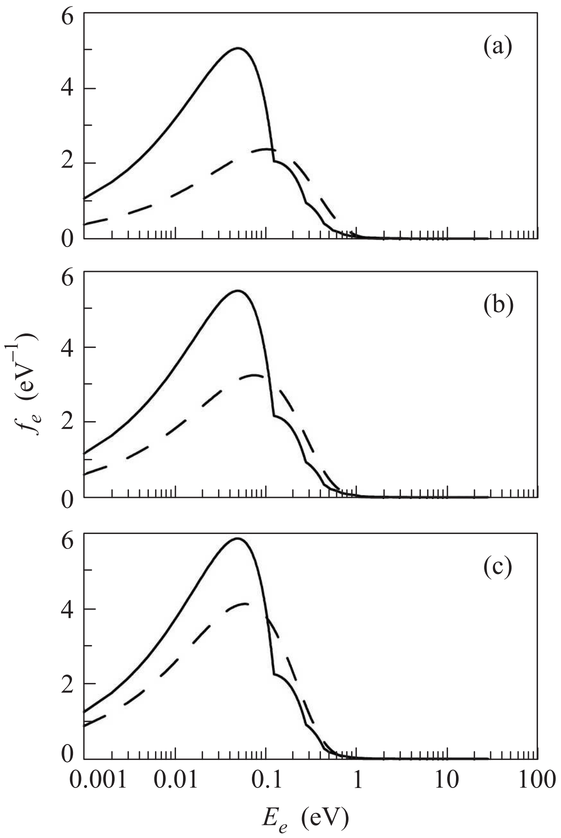

Рис. 3. Функции распределения фотоэлектронов по энергиям (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (a), солнечному максимуму (b) и солнечному минимуму (c). Работа выхода лунного реголита $W = 6$ эВ. Квантовый выход определяется выражением (4). Штриховыми линиями показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми

Разница в расчетах с квантовыми выходами [5] и [9] обусловлена тем, что в первом случае существенный вклад вносят фотоны с энергиями, близкими к работе выхода. Именно эти фотоны, число которых велико, приводят к испусканию основной части фотоэлектронов. Во втором случае квантовый выход для энергий, достаточно близких к работе выхода, чрезвычайно мал. Здесь генерация фотоэлектронов обусловлена в основном фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения, связанному с линией H Лайман-альфа (H Lyman-alpha) в его спектре. Соответственно во втором случае число фотоэлектронов оказывается существенно меньшим, чем в первом, а температура – существенно большей.

Следует отметить, что хотя средняя энергия фотоэлектронов (и, соответственно, их температура) в первом случае оказывается существенно меньшей, чем во втором, в первом случае также присутствует значительное число фотоэлектронов с энергиями порядка 1 эВ. На рис. 3 приведены функции распределения $f_e(E_e) \equiv \Phi_e(E_e)/N_0$, нормированные на единицу ($\int_0^\infty f_e(E_e)dE_e = 1$), которые были вычислены для данных, соответствующих первому случаю (работа выхода $W = 6$ эВ, квантовый выход определяется (4)), для различных уровней солнечной активности. Эти функции распределения отличаются от максвелловских. Подобное отличие вызвано тем, что в эти функции распределения существенный вклад вносят фотоэлектроны (с энергиями, меньшими 0.1 эВ), выбитые с поверхности лунного реголита фотонами с близкими к работе выхода энергиями. Кроме того, распределение фотоэлектронов с энергиями 1–2 эВ, чье происхождение связано с фотонами, отвечающими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения, оказывается на 1–3 порядка величины больше соответствующего максвелловского распределения. Суммарная функция распределения f_e в первом случае является суперпозицией функции распределения фотоэлектронов, выбитых фотонами с энергиями, близкими к работе выхода, и имеющих температуру порядка 0.1–0.2 эВ, а также функции распределения фотоэлектронов, связанных с линией H Лайман-альфа в спектре солнечного излучения и имеющих температуру порядка 1 эВ. Хотя количество электронов с энергиями порядка 1 эВ на 2–3 порядка меньше числа фотоэлектронов с меньшими энергиями, фотоэлектроны с энергиями порядка 1 эВ должны наблюдаться при проведении соответствующих измерений.

Отличие от максвелловского распределения еще более существенно для функций распределения, вычисленных для значений квантового выхода из работы [9] (см. рис. 4). При этом относительное количество электронов с энергиями порядка 1 эВ оказывается значительно большим, чем в первом случае,

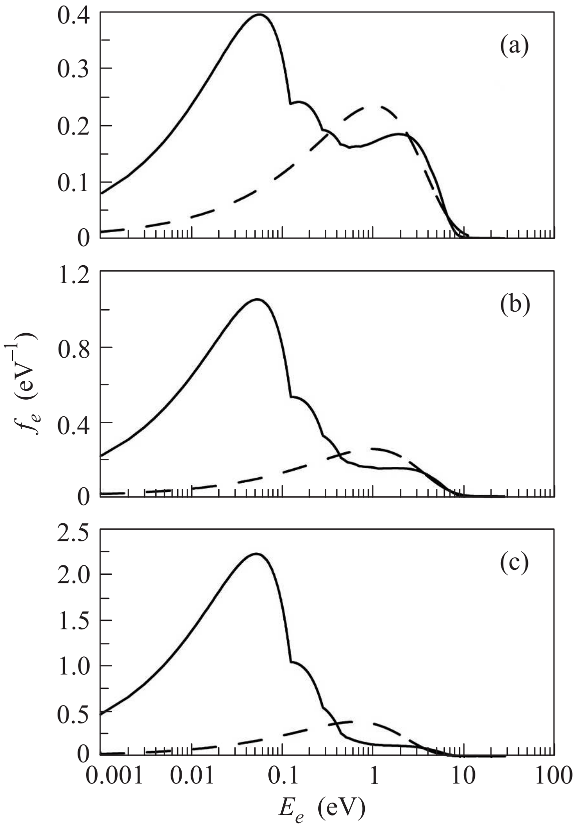

Рис. 4. Функции распределения фотоэлектронов по энергиям (сплошные кривые) у освещенной части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (a), солнечному максимуму (b) и солнечному минимуму (c). Работа выхода лунного реголита $W = 6$ эВ. Квантовый выход определяется экспериментальной зависимостью [9]. Штриховыми линиями показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображенные сплошными кривыми

характеризуемом квантовым выходом (4) и графиками на рис. 3. Кроме того, относительное число электронов с энергиями $\lesssim 0.1$ эВ также достаточно велико. Таким образом, и в этом случае (когда квантовый выход определяется экспериментальной зависимостью [9]) должны наблюдаться фотоэлектроны с энергиями как порядка 1 эВ, так и порядка 0.1 эВ.

Абсолютное значение концентрации фотоэлектронов с энергиями порядка 1 эВ в первом случае, характеризуемом квантовым выходом (4), оказывается даже больше, чем во втором случае. Причиной этого являются значения квантового выхода, которые даже в максимуме кривой, представленной в [9], не превосходят значений, определяемых выражением (4) для соответствующих энергий фотонов.

К сожалению, значения квантового выхода в работах [5] и [9] недостаточно обоснованы. Например, как отмечается в работе [9], где квантовый выход измерялся экспериментально для частиц лунного реголита, доставленных в миссиях Аполлон-14 и 15, не имелось возможности работать с образцами, содержащимися до этого в высоком вакууме. Манипуляции с частицами осуществлялись в инертной атмосфере, содержащей примеси. Таким образом, поверхность образцов лунного реголита подвергалась воздействию чужеродных веществ и ее электрофизические свойства (в том числе квантовый выход и работа выхода) могли существенным образом измениться. Кроме того, авторы работы [9] работали с достаточно мелкими частицами. Это также могло повлиять на полученные значения квантового выхода. Косвенно на недостатки исследования [9] могут указывать данные радиоизмерений, выполненных советской космической станцией Луна 19. Их интерпретация [10] подразумевает существование фотоэлектронов со средней концентрацией порядка 10^3 см$^{-3}$ в диапазоне высот от 1 м до порядка 10 км. Поскольку концентрация фотоэлектронов падает с высотой достаточно сильно (см., например, [1, 2]), данные, характеризуемые в таблице индексом “2” и полученные с использованием квантового выхода [9], не могут объяснить столь высоких концентраций фотоэлектронов.

Все это указывает на необходимость определения квантового выхода (и работы выхода) лунного реголита независимыми методами, подразумевающими отсутствие взаимодействия образцов с земным воздухом. В целом весьма сложно обеспечить доставку лунного грунта так, чтобы избежать его взаимодействия с земной атмосферой. В связи с этим существенный интерес представляют исследования квантового выхода и работы выхода лунного реголита, осуществленные с бортов посадочных модулей непосредственно на Луне. В рамках будущей миссии Луна-27 такая возможность имеется. Для этого требуется провести измерения энергетического спектра электронов и ионов в световой и теневой фазах в непосредственной близости от поверхности с помощью зонда Ленгмюра. Зонд Ленгмюра входит в состав выносных датчиков, используемых на станции Луна-27. Он может измерять зависимость электронной и ионной ветвей энергетического спектра в диапазоне от -100 до 100 В.

Возможная схема эксперимента по измерению квантового выхода и работы выхода лунного реголита представлена на рис. 5. Источником электромагнитного излучения здесь является Солнце. При этом для создания перенаправленного фотонного пучка используется оптический канал, состоящий из зеркал и/или оптического кабеля. Использование зеркал, с одной стороны, модифицирует спектр излучения, что следует учесть при анализе окончательных результатов. С другой же стороны, оно может служить для усиления (в несколько раз) интенсивности излучения, взаимодействующего с лунной поверхностью. Это позволит получить более надежные результаты экспериментов. В качестве источника излучения могут также применяться лазерные светодиоды, ртутная лампа и т.д. Однако при этом необходимо подбирать энергетический спектр излучателя в соответствии с солнечным, используя, например, максимумы в спектре солнечного излучения. Зонд Ленгмюра способен регистрировать поток фотоэлектронов с шагом ~ 0.05 В в диапазоне от -100 до 100 В как в случае освещения источником света лунной поверхности, так и в его отсутствие, регистрируя энергетический спектр электронов. В свою очередь, энергетический спектр электронов коррелирует с вольт-амперной характеристикой зонда Ленгмюра. Сравнение вольт-амперных характеристик, полученных в случае освещения лунной поверхности и в его отсутствие, дает возможность определить квантовый выход и работу выхода лунного реголита.

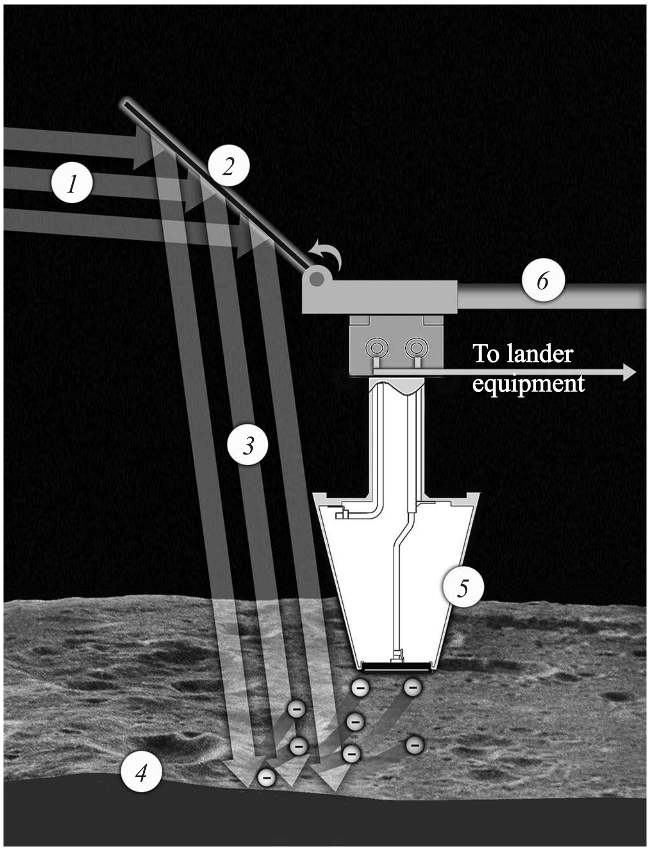

Рис. 5. Схема эксперимента для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита: *1* – световой поток от источника излучения, *2* – зеркало, *3* – световой поток, преобразованный зеркалом, *4* – лунная поверхность, *5* – зонд Ленгмюра, *6* – штанга, на которой укреплено оборудование для измерений

Оборудование для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита предполагается разместить на штанге, позволяющей удалить его от корпуса посадочного модуля. Последнее необходимо для снижения влияния на результаты измерений фотоэлектронов от посадочного модуля. Для этой цели предполагается также покрасить части модуля, прилегающие к штанге, специальным красителем, позволяющим избежать генерации фотоэлектронов от них. Штанга способна перемещаться в пространстве, что дает возможность производить измерения на разных высотах (от 0 до ~ 2 м) от поверхности Луны. Еще одним способом решения проблемы образования фотоэлектронов от корпуса посадочного модуля является размещение оборудования для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита на луноходе, который предполагается использовать в рамках миссии Луна-27. Луноход следует покрасить указанным красителем, позволяющим избежать генерации фотоэлектронов от его корпуса.

Итак, несмотря на определенные успехи, достигнутые в описании пыли и плазменно-пылевой системы в окрестностях Луны, существует ряд важных вопросов, на которые еще предстоит получить ответы. Так, при расчетах параметров плазменно-пылевой системы существенное значение имеет квантовый выход лунного реголита, т.е. количество электронов, выбиваемых одним фотоном с его поверхности. Однако, по всей видимости, весьма сложно обеспечить доставку лунного грунта так, чтобы избежать его взаимодействия с земной атмосферой. В связи с этим представляется перспективным использование возможности измерения квантового выхода и работы выхода лунного реголита непосредственно на поверхности Луны в рамках будущей миссии Луна-27. В работе приведена схема соответствующих экспериментов.

Работа выполнена по программе # 22 фундаментальных исследований президиума РАН "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы", по программе Международного института по космическим наукам (International Space Science Institute) "Dusty Plasma Effects in the System Earth-Moon", а также при поддержке РФФИ (проект # 12-02-00270-а).

---

1. А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Ю. Н. Извекова, С. И. Копнин, С. И. Попель, Письма в ЖЭТФ **95**, 198 (2012).
2. С. И. Попель, С. И. Копнин, А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Ю. Н. Извекова, Астрономический вестник **47**, 455 (2013).
3. Е. А. Лисин, В. П. Тараканов, О. Ф. Петров, С. И. Попель, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **98**, 755 (2013).
4. Т. М. Буринская, Физика плазмы **40**, 17 (2014).
5. E. Walbridge, J. Geophys. Res. **78**, 3668 (1973).
6. R. Vondrak, *Private Communication* (2013).
7. P. C. Chamberlin, T. N. Woods, and F. G. Eparvier, Space Weather **6**, S05001 (2008).
8. Z. Sternovsky, P. Chamberlin, M. Horányi, S. Robertson, and X. Wang, J. Geophys. Res. **113**, A10104 (2008).
9. R. F. Willis, M. Anderegg, B. Feuerbacher, and B. Fitton, in *Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space*, ed. by R. J. L. Grard and D. Reidel, Dordrecht (1973), p. 389.
10. T. J. Stubbs, D. A. Glenar, W. M. Farrell, R. R. Vondrak, M. R. Collier, J. S. Halekas, and G. T. Delory, Planet. Space. Sci. **59**, 1659 (2011).