

Влияние солнечного ветра на формирование фотоиндуцированного плазменно-пылевого слоя вблизи поверхности Луны

Е. А. Лисин, В. П. Тараканов, О. Ф. Петров, С. И. Попель⁺, Г. Г. Дольников*, А. В. Захаров*, Л. М. Зеленый*, В. Е. Фортгов

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

⁺Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, Россия

*Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 ноября 2013 г.

Представлены результаты численного моделирования плазменно-пылевого слоя, образующегося вблизи освещенной части поверхности Луны под действием ультрафиолетового излучения, а также быстрого и медленного солнечного ветра. Численные расчеты с учетом фотоэмиссионных свойств образцов лунного реголита, доставленных на Землю, сопоставлены с оценками, сделанными на основе известных теоретических моделей. Показано, что поток частиц солнечного ветра играет важную роль при формировании приповерхностного фотоэлектронного слоя. Выполнен анализ условий зарядки и устойчивой левитации пылевых частиц в приповерхностном плазменном слое Луны.

DOI: 10.7868/S0370274X13230057

Поверхность Луны, как и поверхность любого другого космического тела, лишённого атмосферы, подвергается воздействию солнечного ветра и ультрафиолетового (УФ) излучения, вызывающего фотоэмиссию. В результате возникают заряд на поверхности (на освещенной стороне он положителен, а на ночной – отрицателен) и электрические поля вблизи нее [1–3]. Частицы пыли из лунного реголита, оказавшиеся в приповерхностной плазме благодаря каким-либо механическим процессам (например, воздействию микрометеоритов или электростатических сил), могут левитировать над поверхностью, образуя плазменно-пылевые облака [4]. Предположение о электростатическом массопереносе лунной пыли было высказано задолго до первого полета на Луну [5]. Первые экспериментальные данные, подтверждающие наличие левитирующих пылевых частиц над поверхностью Луны, были получены посадочным модулем Surveyor-5 и астронавтами экспедиции Apollo-17 [6–8]. С агрессивным воздействием лунной пыли связывают одну из основных проблем будущих миссий на Луну [9–11]. Заряженные микрочастицы лунного реголита прилипают к любой поверхности, загрязняя ее и уменьшая срок работы механизмов и приборов [9, 11]. Кроме того, лунная пыль крайне опасна для здоровья людей [10–12]. Для понимания процессов массопереноса, а также для разработки методов контроля над пылью и плазменно-пылевыми облаками вблизи поверхности Луны и других космических

тел, лишённых атмосферы, необходимы новые экспериментальные и численные данные по электродинамическим свойствам среды и условиям левитации пылевых частиц у поверхности спутника Земли.

На 2016–2019 гг. намечены запуски российских космических аппаратов Луна-25 и Луна-27 (ранее проекты назывались Луна-Глоб и Луна-Ресурс соответственно), которые должны совершить посадку на поверхность Луны в южной приполярной области. В рамках этих миссий готовится космический эксперимент ПМЛ (пылевой мониторинг Луны) по изучению приповерхностной пылевой экзосферы Луны. С целью проектирования прибора и расчета параметров экзосферы Луны в предполагаемых местах посадки космических аппаратов Луна-25 и Луна-27 разрабатывается компьютерная модель, реализующая метод частиц в ячейках. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования фотоиндуцированного приповерхностного плазменного слоя на Луне, полученные при различных параметрах солнечного ветра. Рассмотрены условия зарядки и устойчивой левитации пылевых частиц вблизи освещенной поверхности Луны.

Поскольку фотоэлектронный ток является доминирующим в процессе зарядки освещенной части лунной поверхности, результаты расчетов в значительной степени зависят от выбора фотоэмиссионных параметров. Отметим, что представленные в литературе данные о фотоэмиссионных свойствах лун-

ного грунта значительно отличаются друг от друга. Так, например, работа [13] была посвящена экспериментальному изучению фотоэмиссионных свойств образцов лунного реголита, доставленных миссиями Аполлон. В результате интегрирования квантового выхода и энергетического распределения фотоэлектронов, измеренных при облучении частиц лунной пыли монохроматическим излучением со спектром умеренного солнечного излучения, было получено, что плотность фотоэлектронного тока $j_{pe,0}$ равна $4.5 \cdot 10^{-10}$ А/см², а энергетический спектр фотоэлектронов может быть аппроксимирован максвелловской функцией распределения с температурой $T_{pe} \approx 2$ эВ. При таком фототоке концентрацию фотоэлектронов у нормально освещенной поверхности можно оценить как $n_{pe,0} = 2j_{pe,0} \sqrt{m_e/2T_{pe,0}} \approx 100$ см⁻³ (где m_e – масса электрона). При этом длина экранирования $\lambda_{pe,0} \approx 100$ см.

В недавнем выпуске Писем в ЖЭТФ [14] были представлены результаты теоретических расчетов параметров плазменного слоя вблизи освещенной части лунной поверхности, выполненных в ходе подготовки космического эксперимента ПМЛ. В упомянутой работе для нахождения концентраций фотоэлектронов и электрических полей над поверхностью Луны решалась система уравнений, состоящая из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов и уравнения Пуассона для электростатического потенциала с соответствующими граничными условиями, характеризующими поведение потенциала у лунной поверхности и на бесконечном удалении от нее. С использованием данных о спектре излучения Солнца [15, 16] и с учетом значения квантового выхода фотоэмиссии [17, 18] в [14] было получено, что концентрация фотоэлектронов у поверхности Луны может достигать $n_{pe,0} \approx 2 \cdot (10^5 - 10^8)$ см⁻³ (в зависимости от работы выхода), а тепловое движение фотоэлектронов характеризуется температурой $T_{pe} \approx 0.1$ эВ. При таких параметрах плазмы фототок с поверхности j_{pe} должен находиться в диапазоне $2 \cdot 10^{-7} - 10^{-4}$ А/см², а величина $\lambda_{pe,0}$ – не превышать 0.5 см. В дальнейшем данные оценки использовались для нахождения высотного распределения концентрации пылевых частиц вблизи лунной поверхности [14, 19].

Столь значительное различие между существующими оценками фототока с лунной поверхности в [13] и [14] связано в первую очередь с квантовым выходом фотоэлектронов. Так, в работе [14] для оценки квантового выхода использовалась весьма грубая полумпирическая модель, основанная на имеющихся представлениях о фотоэмиссионных свойствах зем-

ных базальтовых пород [17]. Величина квантового выхода в [17] для фотонов с энергиями, близкими к работе выхода, на 6–7 порядков отличается от величины, экспериментально измеренной в работе [13] для образцов лунного грунта. Вместе с тем в [13] в качестве образцов использовался порошок мелкодисперсной лунной пыли. Квантовый выход фотоэлектронов с поверхности такого порошка может быть много меньше выхода с плоской поверхности из-за обратного поглощения эмитированных фотоэлектронов поверхностью. Кроме того, поскольку фотоэмиссия является поверхностным эффектом, любое загрязнение поверхности, например обусловленное ее взаимодействием с атмосферой, может привести к существенному изменению фотоэмиссионных свойств исследованных образцов.

Подробное обсуждение вопроса о параметрах фотоэлектронов, эмитированных с лунной поверхности, выходит за рамки данного письма. Подчеркнем, что на сегодняшний день этот вопрос остается открытым и требует дополнительных исследований.

Для моделирования плазменного слоя, образующегося вблизи поверхности Луны в результате воздействия УФ-излучения и солнечного ветра, применялась 2D(XZ)-версия релятивистского электромагнитного кода КАРАТ, учитывающая все три компоненты электромагнитных полей и импульсов частиц [20]. Данный код использует метод частиц в ячейках. Он был разработан для моделирования электродинамических плазменных процессов [21]. Счетная область представляла собой прямоугольник, нижняя граница которого соответствовала поверхности Луны. Она обладала фотоэмиссионными свойствами и поглощала все попадающие на нее частицы, накапливая поверхностный заряд. Поток электронов и ионов солнечного ветра с определенными функциями распределения инжектировался на верхней границе (в общем случае под углом θ к ней). Вдоль горизонтального направления задавались периодические граничные условия. Расчеты выполнялись в течение времени $t \approx 100/\omega_{sw}$ (где ω_{sw} – плазменная частота невозмущенного солнечного ветра), необходимого для эффективного затухания плазменных колебаний, возникающих на начальном этапе решения задачи. Для корректного расчета приграничного фотоэлектронного слоя шаг счетной сетки не превышал $\sim 0.2\lambda_{pe,0}$. При этом расстояние между верхней и нижней границами счетной области L_z определялось условием $L_z \gg \max[\lambda_{pe,0}, \lambda_{sw}]$ (где λ_{sw} – длина экранирования в плазме квазинейтрального солнечного ветра). В нашем случае оно варьировалось от 60 до 100 м. На данном этапе работы задача решалась в квазиод-

номерной постановке, когда изменение физических величин в горизонтальном направлении не учитывалось. При этом мы ограничились случаем нормального падения потока солнечного ветра на плоскую поверхность ($\theta = 90^\circ$).

В представленных в данной работе расчетах процесс фотоэмиссии с поверхности под действием солнечных фотонов не моделировался. Сразу задавался поток эмитированных фотоэлектронов с полумаксвелловским распределением с температурой $T_{pe} = 2$ эВ и плотностью фототока $j_{pe} = 4.5 \cdot 10^{-10}$ А/см². Результаты численных расчетов распределения концентрации электронов над фотоэмитирующей поверхностью при отключенном потоке солнечного ветра представлены на рис. 1. Для сравнения там же

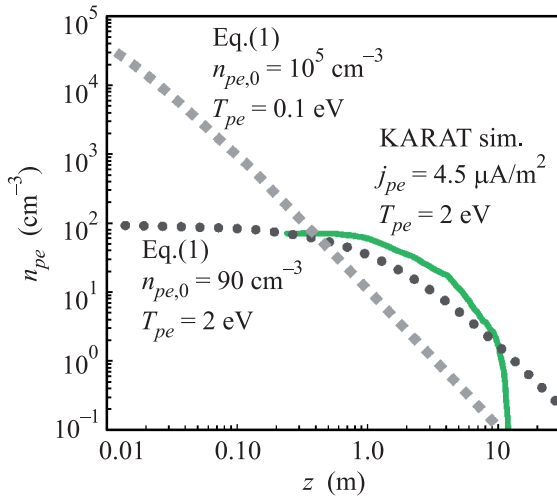


Рис. 1. (Цветной онлайн) Вертикальное распределение концентрации фотоэлектронов при $\theta = 90^\circ$ без учета потока солнечного ветра. Сплошная линия соответствует результатам численного моделирования, символы – распределению (1)

приведены графики аналитической функции распределения концентрации эмитированных с плоской поверхности фотоэлектронов [22]

$$n_{pe}(z, \theta = 90^\circ) = n_{pe,0} \left(1 + \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{z}{\lambda_{pe,0}} \right)^{-2} \quad (1)$$

при различных параметрах T_{pe} и $n_{pe,0}$, соответствующих результатам работ [13] и [14] (здесь z – высота над поверхностью).

Для исследования влияния солнечного ветра на формирование приповерхностного фотоэлектронного слоя через верхнюю границу счетной области в систему вводился квазинейтральный поток электронов и ионов (протонов) с полумаксвелловским распределением и дрейфовой скоростью. Поток солнечного

ветра принято разделять на быстрый и медленный. Источником быстрого ветра являются солнечные полюса, а медленный ветер в основном исходит из экваториальной области [23]. В наших расчетах электроны и ионы, имитирующие поток медленного солнечного ветра, вводились в счетную область с температурами $T_{we} = 8$ эВ и $T_{wi} = 16$ эВ соответственно, скоростью дрейфового движения $u = 350$ км/с и начальными концентрациями $n_{we,0} = n_{wi,0} = 12$ см⁻³. Для моделирования быстрого солнечного ветра были выбраны следующие параметры плазмы: $T_{we} = 12$ эВ, $T_{wi} = 4$ эВ, $u = 750$ км/с, $n_{we,0} = n_{wi,0} = 4$ см⁻³. Также были выполнены расчеты для усредненных параметров солнечного ветра [23]: $T_{we} = T_{wi} = 10$ эВ, $u = 550$ км/с и $n_{we,0} = n_{wi,0} = 10$ см⁻³. Фазовая диаграмма, иллюстрирующая изменение вертикальной составляющей скорости V_z плазменных частиц в зависимости от расстояния до нижней границы счетной области, представлена на рис. 2. Легко заметить,

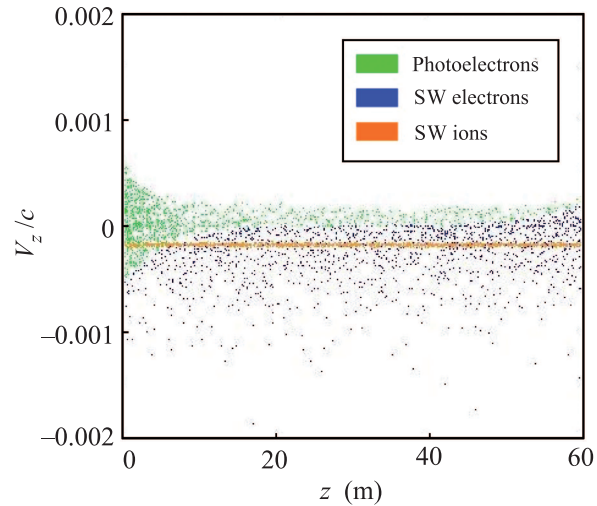


Рис. 2. (Цветной онлайн) Компоненты плазмы на фазовой плоскости $V_z(z)/c$ (где c – скорость света) при усредненных параметрах солнечного ветра (SW)

что электроны солнечного ветра вблизи положительной заряженной поверхности ускоряются, в то время как динамика ионов, движущихся со сверхзвуковой скоростью ($u \gg \sqrt{T_{wi}/m_i} \sim \sqrt{T_{we}/m_i}$), остается неизменной.

Результаты расчетов вертикального распределения концентрации плазменных компонент (фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра) приведены на рис. 3а. Было найдено, что квазинейтральность потока электронов и ионов нарушается на расстоянии $\sim 30\lambda_{pe,0}$ от поверхности. Для сравнения на рис. 3а добавлено распределение концентрации фотоэлектронов, полученное численно при

Варьируемые параметры модели и результаты расчетов

#	Варьируемые параметры модели				Результаты расчетов						
	T_{we} , эВ	T_{wi} , эВ	u , км/с	$n_{we,0}, n_{wi,0}$, см ⁻³	$n_{pe,0}$, см ⁻³	E_0 , В/м	φ_s , В	$\varphi_{d,max}$, В	$2a_{max}$, мкм	z_{min} , м	z_{max} , м
1	12	4	350	12	73	2.3	5.8	2.4	0.2	4	9
2	10	10	550	10	73	2.4	6.2	3.1	0.25	4	11
3	8	16	750	4	74	2.5	7.5	5.5	0.3	4	13

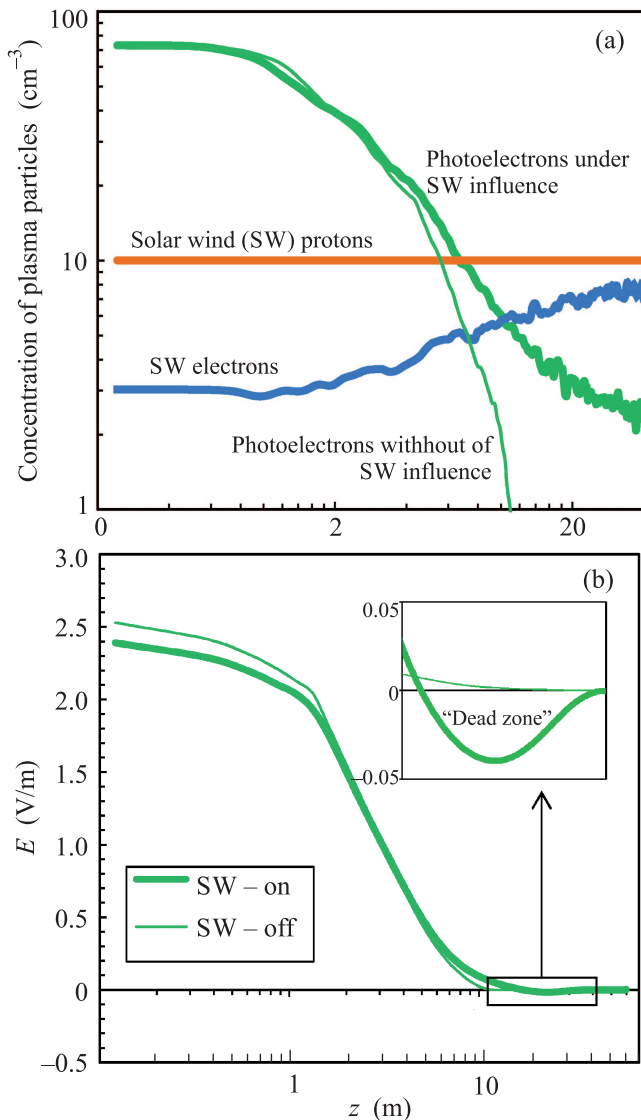


Рис. 3. (Цветной онлайн) Вертикальные распределения концентрации плазменных частиц (а) и электрического поля (б). Толстые линии соответствуют численной модели, учитывающей усредненный поток электронов и протонов солнечного ветра (SW). Тонкая линия – модель однокомпонентной плазмы (только фотоэлектроны)

отсутствии направленного потока ионов и электронов. На высотах более $(5-6)\lambda_{pe,0}$ солнечный ветер оказывает заметное влияние на плотность фотоэлектронного слоя. Значения фотоэлектронной концентрации $n_{pe,0}$ и напряженности электрического поля E_0 вблизи лунной поверхности, рассчитанные при варьировании параметров солнечного ветра, приведены в таблице. Здесь и далее под величиной напряженности электрического поля мы будем понимать ее вертикальную составляющую. Зависимость электрического поля E от расстояния до поверхности z приведена на рис. 3б. В отличие от задачи, рассматривающей только однокомпонентную фотоэлектронную плазму (см., например, [14, 17, 18]), учет потока солнечного ветра приводит к возникновению диапазона высот, в котором электрическое поле принимает отрицательные значения (см. вставку к рис. 3б). На таком участке невозможна устойчивая левитация положительно заряженных частиц лунной пыли.

Для стабильной левитации заряженных частиц лунной пыли, оказавшихся в результате каких-либо процессов в плазменном слое вблизи поверхности Луны, необходимо выполнение условия баланса гравитационной и электростатической сил:

$$Mg = qE. \quad (2)$$

Здесь M – масса пылевой частицы, $g = 1.62 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения на поверхности Луны. Величина равновесного заряда q частицы зависит от расстояния от нее до поверхности и определяется нулевой суммой токов на частицу:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -I_{pe} + I_{we} + I_{wi} + I_e = 0. \quad (3)$$

Микроскопические токи фотоэлектронов, эмитируемых частицей (I_{pe}), электронов и ионов солнечного ветра (I_{we} и I_{wi}), а также фотоэлектронов, эмити-

рованных с лунной поверхности (I_e), определяются известными уравнениями (см., например, [1, 24, 25]):

$$\begin{cases} I_{pe} = -\pi a^2 j_{pe} \left[1 + \frac{qe}{aT_{pe}} \right] \exp \left[-\frac{qe}{aT_{pe}} \right], & q \geq 0, \\ I_{pe} = -\pi a^2 j_{pe}, & q < 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_e = -4\pi a^2 en_{pe}(z) \sqrt{\frac{T_{pe}}{2\pi m_e}} \left[1 + \frac{qe}{aT_{pe}} \right], & q \geq 0, \\ I_e = -4\pi a^2 en_{pe}(z) \sqrt{\frac{T_{pe}}{2\pi m_e}} \exp \left[\frac{qe}{aT_{pe}} \right], & q < 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} I_{we} = -4\pi a^2 en_{we}(z) \sqrt{\frac{T_{we}}{2\pi m_e}} \left[1 + \frac{qe}{aT_{we}} \right], & q \geq 0, \\ I_{we} = -4\pi a^2 en_{we}(z) \sqrt{\frac{T_{we}}{2\pi m_e}} \exp \left[\frac{qe}{aT_{we}} \right], & q < 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{wi} \approx \pi a^2 en_{wi,0}, \quad (7)$$

где a – радиус пылевой частицы. Формула (7) приведена в упрощенном виде с учетом сверхзвукового дрейфа ионов солнечного ветра. Эффектами взаимодействия пылевых частиц с плазмой хвоста магнитосферы Земли мы пренебрегаем, поскольку указанное взаимодействие является существенным лишь для теневой стороны Луны.

Для расчета мгновенных значений микроскопических токов электронов и ионов на пылевую частицу и определения высоты ее устойчивой левитации над лунной поверхностью были использованы численные данные о концентрации плазменных частиц и величине напряженности электрического поля, полученные посредством кода KARAT. Плотность частиц лунного реголита мы полагали равной 3 г/см^3 . На рис. 4 представлена зависимость потенциала поверхности заряженной сферической пылевой частицы $\varphi_d = q/a$ от высоты ее расположения над лунной поверхностью при различных параметрах солнечного ветра. Максимальные значения плавающего потенциала $\varphi_{d,max}$, до которого могут заряжаться левитирующие пылинки, при различных параметрах солнечного ветра вместе со значениями потенциала нижней границы счетной области φ_s , накапливающей заряд и моделирующей плоскую лунную поверхность, приведены в таблице.

Результаты расчетов высоты зависания пылевой частицы в зависимости от ее размера (диаметра) для различных параметров солнечного ветра приведены на рис. 5. Было найдено, что частицы, находящиеся в приповерхностном плазменном слое, могут устойчиво левитировать на высотах от $z_{min} \sim 4 \text{ м}$

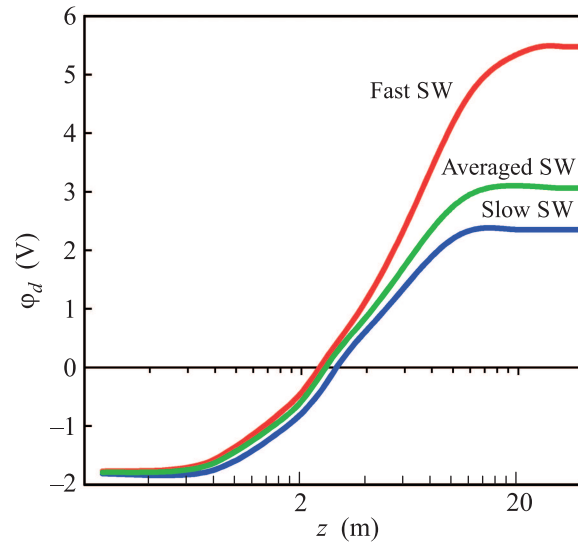


Рис. 4. (Цветной онлайн) Равновесный потенциал поверхности пылевой частицы $\varphi_d = q/a$ в зависимости от высоты z над Луной, полученный для различных параметров солнечного ветра (SW)

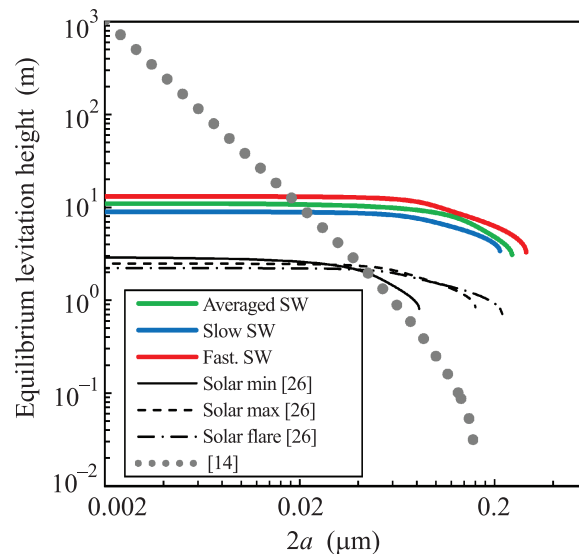


Рис. 5. (Цветной онлайн) Высота устойчивой левитации пылевой частицы в зависимости от ее размера. Жирные линии – результаты наших численных расчетов для фототока, соответствующего умеренной солнечной активности ($j_{pe} \approx 4.5 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$), и различных параметров солнечного ветра (SW). Тонкие линии – данные из [26]. Символы – результаты расчетов для фотоэлектронного слоя из [14]

до $z_{max} \sim 13 \text{ м}$ в зависимости от их размера и параметров окружающей плазмы. При этом устойчивая левитация возможна только для частиц с размером меньше $2a_{max} \sim 0.3 \text{ мкм}$. Верхняя граница вы-

сотного диапазона связана с наличием зоны отрицательного электрического поля (см. рис. 3b), в которой невозможна левитация положительно заряженных частиц. Нижняя граница обусловлена высокой концентрацией эмитированных с лунной поверхности фотоэлектронов, которые при попадании на пылевую частицу стремятся уменьшить ее заряд (см. рис. 4) и препятствуют доминированию электростатической силы над гравитационной.

Для сравнения на рис. 5 нанесены равновесные положения пылевой частицы в фотоэлектронном слое, параметры которого были рассчитаны в работе [14] в приближении однокомпонентной плазмы. В этом случае высота устойчивой левитации заряженных частиц не имеет ограничения сверху. Кроме того, на рис. 5 представлены опубликованные в работе [26] результаты расчетов высоты устойчивой левитации пылинок при варьировании фототока, соответствующего различным периодам солнечного цикла (в условиях максимума солнечной активности фототок может возрастать до $j_{pe} = 15.5 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$, а во время солнечных вспышек он достигает величины $j_{pe} = 40 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$). Легко заметить, что наши численные данные качественно согласуются с результатами, полученными ранее [26]. Их количественное различие связано с тем, что в работе [26] задача решалась в одномерной постановке, не учитывающей анизотропность полуграниченной плазмы вблизи поглощающей поверхности. В такой плазме частицы из “хвоста” распределения Максвелла, движущиеся вдоль нормали, гибнут на поверхности быстрее по сравнению с теми частицами, что движутся поперек нее. Для корректного же моделирования важен учет всех трех компонент импульса частиц. Кроме того, распределение фотоэлектронов по энергиям в работе [26] отличалось от максвелловского прежде всего отсутствием частиц с энергией $> 6 \text{ эВ}$, что должно приводить к относительно более слабому электрическому полю.

Выброс частицы реголита с лунной поверхности возможен из-за теплового расширения или сжатия частиц, а также в результате каких-либо внешних механических воздействий. При этом переход в режим устойчивой левитации будет зависеть от начальных условий: накопленного пылевой частицей электростатического заряда, вектора начальной скорости и местоположения на рельефной поверхности.

Итак, нами были получены новые численные данные о параметрах плазменно-пылевого слоя, образующегося вблизи поверхности Луны под действием УФ-излучения, а также быстрого и медленного солнечного ветра. Проведен анализ условий заряд-

ки и устойчивой левитации пылевых частиц в приповерхностном плазменном слое Луны. Численные расчеты с учетом фотоэмиссионных свойств образцов лунного реголита, доставленных на Землю, сопоставлены с оценками, сделанными на основе известных теоретических моделей. Показано, что поток солнечного ветра оказывает заметное влияние на распределение плотности фотоэлектронов и электрического поля вблизи освещенной части лунной поверхности. В отличие от существующих аналитических моделей фотоэлектронного слоя, разработанных в приближении однокомпонентной плазмы, численный самосогласованный расчет приповерхностного фотоэлектронного слоя с учетом потока плазмы солнечного ветра приводит к возникновению на высотах, где концентрация фотоэлектронов становится меньше концентрации электронов солнечного ветра, зоны, в которой электрическое поле меняет знак и устойчивая левитация положительно заряженных пылевых частиц невозможна. При этом диапазоны высот устойчивой левитации и максимально допустимого для этого размера частиц в равной степени зависят как от циклических изменений в УФ-части солнечного спектра, так и от вариации параметров солнечного ветра. Подчеркнем, что для детальных количественных расчетов необходимо уточнение параметров фотоэмиссии, поскольку в настоящее время существуют значительные разногласия в результатах теоретического и экспериментального определения функции квантового выхода лунного грунта. Для решения этой проблемы авторы данного письма предлагают провести эксперимент непосредственно на поверхности Луны в рамках миссии Луна-27, принимая во внимание тот факт, что на борту разрабатываемого космического аппарата предусмотрены ключевые измерительные инструменты.

Авторы выражают благодарность М. Horányi, О.С. Ваулиной и А.М. Игнатову за участие в обсуждении результатов работы. Работа была поддержана РФФИ (гранты # 12-02-00270-а и 13-02-01393), Министерством образования и науки РФ и программой президиума РАН “Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы”.

1. E. C. Whipple, *Rep. Prog. Phys.* **44**, 1197 (1981).
2. D. A. Mendis, J. R. Hill, H. L. F. Houppis, and E. C. Whipple, *Astroph. J.* **249**, 787 (1981).
3. J. S. Halekas, R. P. Lin, and D. L. Mitchell, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2117 (2003).
4. T. Nitter and O. Havnes, *Earth, Moon, and Planets* **56**, 7 (1992).
5. T. Gold, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **115**, 585 (1955).

6. O. E. Berg, H. Wolf, and J. Rhee, *Lect. Notes Phys.* **48**, 233 (1976).
7. J. J. Rennilson and D. R. Criswell, *Moon* **10**, 121 (1974).
8. H. A. Zook and J. E. McCoy, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 2117 (1991).
9. J. C. Mandeville and H. Y. Lem, *Proc. Lunar Science Conf.* **3**, 3201 (1972).
10. D. Linnarsson, J. Carpenter, B. Fubini, et.al, *Planetary and Space Science* **74**, 57 (2012).
11. J. R. Gaier, *The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions*, NASA/TM-2005-213610, NASA GRC, (2005).
12. Y. Liu, D. W. Schnare, B. C. Eimer, and L. A. Taylor, *Planetary and Space Science* **56**, 1517 (2008).
13. B. Feuerbacher and B. Fitton, *J. Appl. Phys.* **43**, 1563 (1972).
14. А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров и др., *Письма в ЖЭТФ* **95**, 198 (2012).
15. Г. С. Иванов-Холодный, В. В. Фирсов, *Геомагн. и аэрономия* **14**, 392 (1974).
16. H. E. Hinteregger, *Space Sci. Rev.* **4**, 461 (1965).
17. E. Walbridge, *J. Geophys. Res.* **78**, 3668 (1973).
18. Е. К. Колесников, А. С. Мануйлов, *Астрономический журнал* **59**, 996 (1982).
19. С. И. Попель, С. И. Копнин, А. П. Голубь и др., *Астрономический вестник* **47**, 455 (2013).
20. V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT*, VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc. (1992).
21. В. П. Тараканов, *Универсальный электромагнитный код KARAT*, в кн.: *Математическое моделирование. Проблемы и результаты*, М., Наука (2003).
22. R. J. L. Grard and J. D. E. Tunaley, *J. Geophys. Res.* **76**, 2498 (1971).
23. A. J. Hundhausen, *The solar wind, Introduction to Space Physics*, Cambridge Univ. Press. (1995).
24. M. Horányi, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **34**, 383 (1996).
25. О. С. Ваулина, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов и др., *Пылевая плазма (эксперимент и теория)*, М., Физматлит (2009).
26. A. Poppe and M. Horányi, *J. Geophys. Res.* **115**, A08106 (2010).