Письма в ЖЭТФ, том 119, вып. 6, с. 419 – 425

Пылевая плазма у поверхности Энцелада – спутника Сатурна

Д. В. Шохрин[+], *С. И. Копнин*[*], *С. И. Попель*[+*1)]

[+]*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", 101000 Москва, Россия*

[*]*Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), 117997 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 4 февраля 2024 г.
После переработки 15 февраля 2024 г.
Принята к публикации 16 февраля 2024 г.

Показано, что в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Сатурна – Энцелада за счет фотоэлектрических и электростатических процессов происходит формирование пылевой плазмы. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Энцелада определены функции распределения фотоэлектронов у его поверхности, найдены высотные зависимости концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей. Отмечается, что несмотря на удаленность Энцелада от Солнца, фотоэффект оказывается важным процессом при формировании пылевой плазмы. Показано, что концентрация фотоэлектронов над поверхностью Энцелада на порядок может превосходить концентрацию электронов и ионов солнечного ветра, а размеры левитирующих пылевых частиц превышают характерные размеры пылевых частиц, поднимающихся над поверхностью Луны.

DOI: 10.31857/S123456782406003X, EDN: NFGBPA

Хотя Энцелад – лишь шестой по размеру спутник Сатурна и четырнадцатый по удаленности от него среди 146 известных спутников этой планеты, как показали исследования, выполненные с помощью космических аппаратов "Вояджер-1", "Вояджер-2" и "Кассини", он весьма примечателен с точки зрения разного рода проявлений. Прежде всего, Энцелад считается одним из самых вероятных мест в Солнечной системе для существования внеземной микробной жизни [1]. Далее, полагают, что кольцо E Сатурна, состоящее из микроскопических частиц льда или пыли, пополняется веществом с Энцелада [2]. В рамках измерений, выполненных "Кассини", в окрестности Энцелада наблюдали плазменно-пылевое образование [3], существование которого, по-видимому, связано с действием криовулканов в южной полярной области Энцелада и выбросами вещества с его поверхности во время метеорных ударов. Криовулканы испускают фонтаны частиц льда, а также других составляющих, в том числе, силикатных частиц, часть из которых попадает на поверхность Энцелада, а другая – уходит в космос [2]. Важными аспектами исследований, связанными с Энцеладом, являются геологическая активность [4], ландшафт поверхности [5], подповерхностный жидкий водный океан [6] и т.д. Таким образом, Энцелад со всеми его проявлениями является важным объектом исследований. Наряду с большим количеством теоретических работ, основанных, как правило, на данных "Вояджеров" и "Кассини", начиная с 2022 г., после запуска NASA's James Webb Space Telescope, Энцелад исследуется с помощью этого телескопа [7].

Энцелад – фактически первый объект во внешней области Солнечной системы, в окрестности которого удалось наблюдать пылевую плазму [3, 8–10]. Этот спутник Сатурна, подобно Луне, является безатмосферным космическим телом. Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы (см., например, [11–18]). Ожидается, что аналогичная ситуация складывается и над поверхностью Энцелада. Поверхность Энцелада заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца и плазмы солнечного ветра. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Энцелада испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит также их испускание пылевыми частицами, присутствующими над поверхностью Энцелада, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Энцелада или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра. Все эти процессы приводят к

1)e-mail: popel@iki.rssi.ru

зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Энцелада, подъему и движению пыли.

В ситуации с Энцеладом имеются и существенные отличия от условий на Луне. Так, поверхность Луны покрыта пылью, которая состоит из несвязанных друг с другом небольших крупинок реголита, образовавшегося в результате микрометеороидной бомбардировки. Именно эта пыль поднимается над поверхностью Луны и, в конечном итоге, участвует в формировании плазменно-пылевой системы [17]). Поверхность Энцелада покрыта водяным льдом. Однако, поскольку плотность Энцелада составляет 1.61 г/см^3, считается, что его недра содержат большой процент силикатов и железа. Таким образом, следует ожидать присутствия мелкодисперсных частиц (пыли) разнообразного состава на поверхности Энцелада, образованных в результате дробления вещества Энцелада вследствие ударов метеороидов. Кроме того, источником пыли на поверхности Энцелада является кольцо E Сатурна, частицы которого (мелкодисперсный лед) попадают на поверхность Энцелада. Далее, одной из причин существования пыли на Энцеладе является тектоническая активность [19], приводящая к напряжениям сдвига и выделениям мелкодисперсных частиц. Наконец, как уже отмечалось, часть частиц льда и силикатных частиц, испускаемых криовулканами, попадает на поверхность Энцелада.

Работы [3, 8–10] посвящены, в основном, рассмотрению пыли над Энцеладом на значительных высотах h, бо́льших характерного линейного размера Энцелада ($R \approx 252$ км). Практически нет данных о параметрах пыли в приповерхностном слое ($h \ll 100$ км). По аналогии с ситуацией у Луны можно ожидать, что основная часть пылевых частиц содержится именно в приповерхностном слое над Энцеладом, где образование пылевой плазмы связано с процессами зарядки пылевых частиц, их взаимодействием с заряженной поверхностью Энцелада, подъемом и движением заряженной пыли в электрическом и гравитационном полях, а скорости пылевых частиц существенно меньше 10 м/с. В настоящей работе проводится описание свойств пылевой плазмы в приповерхностном слое над освещенной частью Энцелада. Вычисляются электрические поля, а также параметры фотоэлектронов и пыли над поверхностью Энцелада.

Для описания плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Энцелада используется модель [20], в которой зарядка пылевых частиц над поверхностью Энцелада вычисляется с учетом влияния фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра, а также солнечного излучения. Не учитывается воздействие светового давления на динамику пылевых частиц, поскольку, как показывают оценки, указанное воздействие сказывается лишь для частиц с размерами, заведомо не превышающими 1 нм. Производится учет фотоэлектронов как от поверхности Энцелада, так и от поверхностей парящих над ней пылевых частиц. Рассмотрение фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц требует самосогласованного описания, поскольку фотоэлектроны влияют на распределения пылевых частиц, в то время как распределения пылевых частиц определяют количество фотоэлектронов. Ввиду самосогласованного характера задачи решить ее удается только численными методами.

Для нахождения концентраций фотоэлектронов над поверхностью Энцелада производится решение системы уравнений, состоящей из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов и уравнения Пуассона для электростатического потенциала с соответствующими граничными условиями, характеризующими поведение потенциала у поверхности Энцелада и на бесконечном удалении от нее. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям у поверхности Энцелада Φ_e определяется стандартным образом [21] 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,

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

– вероятность [21] того, что в результате поглощения фотона энергии 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 друг другу. При выводе (1) пренебрегалось возможной анизотропией функции распределения фотоэлектронов в пространстве скоростей, обусловленной неровностью поверхности Энцелада.

Функция распределения (1) может быть использована для нахождения концентрации N_0 и температуры T_e фотоэлектронов у поверхности Энцелада:

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

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

При вычислении функции распределения фотоэлектронов, их концентрации и температуры важными параметрами являются спектр солнечного излучения, квантовый выход и работа выхода поверхности Энцелада. Поскольку материал поверхности Энцелада представляет собой водяной лед, в качестве ее работы выхода используем величину $W = 8.7$ эВ [22], а для квантового выхода – зависимость $Y(E_{ph}) = C_Y(E_{ph} - W)^2$ [23] с $C_Y = 10^{-4}$ эВ$^{-2}$. Что касается спектров солнечного излучения, их форма соответствует форме спектров у Луны [24, 25], однако интенсивность оказывается меньшей, что обусловлено значением Солнечной постоянной, которое на орбите Сатурна составляет 15.0 Вт/м^2, т.е. примерно 1.1 % от значения Солнечной постоянной на орбите Земли. Соответственно спектры солнечного излучения и на орбите Сатурна существенно варьируются в течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Однако, как и в ситуации с Луной (см. [25]), 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. Поэтому ниже проводятся вычисления для солнечного максимума. На рисунке 1a приведен спектр, характеризующий солнечную активность на орбите Сатурна, соответствующий солнечному максимуму. Параметры фотоэлектронов (N_0, T_e), рассчитанные по формулам (1)–(3), в приповерхностном слое освещенной части Энцелада для солнечной активности, соответствующей солнечному максимуму, и значению работы выхода $W = 8.7$ эВ имеют следующие значения: $N_0 \approx 1.26\cos\theta$ см$^{-3}$; $T_e \approx 7.89$ эВ. На рисунке 1b изображена функция распределения $f_e(E_e) \equiv \Phi_e(E_e)/N_0$, нормированная на единицу ($\int_0^\infty f_e(E_e)dE_e = 1$), вычисленная для данных, соответствующих $W = 8.7$ эВ и солнечному максимуму. Имеется сильное отличие указанной функции распределения от максвелловской.

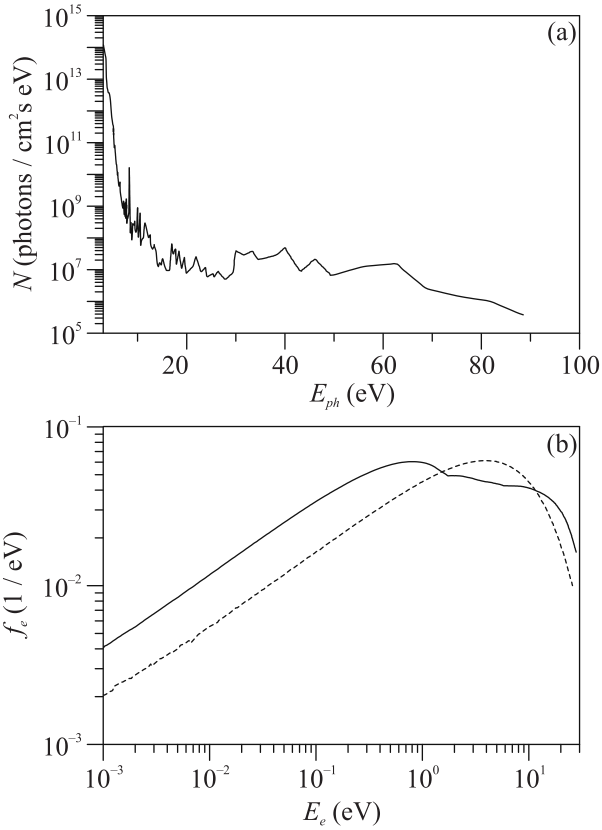

Рис. 1. Потоки солнечного излучения на орбите Сатурна в зависимости от энергии фотонов (в логарифмическом масштабе), соответствующие солнечному максимуму (a). Функция распределения фотоэлектронов f_e по энергиям (сплошная кривая) у освещенной части поверхности Энцелада, соответствующая солнечному максимуму, и максвелловское распределение (пунктирная кривая), вычисленное для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих распределение, изображенное сплошной кривой (b)

Поведение пылевых частиц, которые для простоты описания считаем ледяными (для силикатных частиц результаты качественно не меняются), в приповерхностном слое описывается уравнениями, описывающими их динамику и зарядку:

$$m_d\frac{d^2\mathbf{r}_d}{dt^2} = q_d\mathbf{E} + \frac{q_d}{c}\mathbf{v}_d \times \mathbf{B} + m_d\mathbf{g}_0, \tag{4}$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \tag{5}$$

где m_d – масса пылевой частицы; q_d – ее заряд; $\mathbf{g}_0$ – ускорение свободного падения у поверхности Энцелада; $\mathbf{E}$ – электрическое поле; $\mathbf{B}$ – магнитное поле Сатурна у поверхности Энцелада; $I_e(q_d)$ и $I_i(q_d)$ – микроскопические токи на пылевую частицу электронов и ионов солнечного ветра, $I_{ph}(q_d)$ –

фототок электронов с пылевой частицы, обусловленный ее взаимодействием с солнечным излучением, $I_{e,ph}(q_d)$ – ток фотоэлектронов на пылевую частицу:

$$I_e \approx -\pi a^2 e n_{eS} \sqrt{\frac{8T_{eS}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{eS}}\right), \tag{6}$$

$$\begin{aligned} I_i \approx \pi a^2 e n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{2\pi m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \\ \times \left\{ \frac{u_i + u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i - u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) \right. \\ \left. + \frac{u_i - u_0}{u_{Ti}} \exp\left(-\frac{(u_i + u_0)^2}{2u_{Ti}^2}\right) \right\} \\ + \pi a^2 e n_{iS} \sqrt{\frac{T_{iS}}{4m_i}} \frac{u_{Ti}}{u_i} \left\{ \mathrm{erf}\left(\frac{u_i + u_0}{\sqrt{2} u_{Ti}}\right) \right. \\ \left. + \mathrm{erf}\left(\frac{u_i - u_0}{\sqrt{2} u_{Ti}}\right) \right\} \left(1 + \frac{2Z_d e^2}{a T_{iS}} + \frac{u_i^2}{u_{Ti}^2}\right), \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} I_{ph} \approx -\pi a^2 e N_0 \sqrt{\frac{T_{e,ph}}{2\pi m_e}} \\ \times \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right) \exp\left(-\frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right), \end{aligned} \tag{8}$$

$$I_{e,ph} \approx -\pi a^2 e n_{e,ph} \sqrt{\frac{8T_{e,ph}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{Z_d e^2}{a T_{e,ph}}\right). \tag{9}$$

Здесь a – размер пылевой частицы, Z_d – ее зарядовое число ($q_d = Z_d e$), e – элементарный заряд, $n_{e(i)S}$ – концентрация электронов (ионов) солнечного ветра, $T_{e(i)S}$ – температура электронов (ионов) солнечного ветра, m_i – масса иона, $u_0 = \sqrt{2Z_d e^2/am_i}$, $u_{Ti} = \sqrt{T_{iS}/m_i}$ – тепловая скорость ионов солнечного ветра, u_i – скорость солнечного ветра, $T_{e,ph}$ – температура фотоэлектронов, а $n_{e,ph}$ – концентрация фотоэлектронов, учитывающие фотоэлектроны как с поверхности Энцелада, так и с поверхностей пылевых частиц. Выражения (6)-(9) справедливы для случая положительных зарядов пылевых частиц. Выражение (8) для тока I_{ph} не содержит множителя, содержащего характеристики спектров излучения, что оказывается возможным в ситуации с Энцеладом для ледяных пылевых частиц, когда поверхности пылевых частиц и поверхность Энцелада имеют одинаковую работу выхода. В этой ситуации указанный множитель удается выразить через значение N_0. Соотношения (6)–(9) впервые использованы для описания пылевой плазмы в окрестности безатмосферных космических тел в работе [14]. Там же обосновывается использование множителя N_0 в соотношении (8). Выражение (7) выведено специально для случая положительного заряда пылевых частиц и произвольных скоростей потоков ионов [26].

При решении уравнений (4) и (5) учитываем, что электрическое поле $\mathbf{E}$, создаваемое заряженной поверхностью Энцелада, является вертикальным (предполагается плоская поверхность без каких-либо возвышенностей или впадин), и его значение составляет

$$E(h, \theta) = \frac{2T_{e,ph}}{e} \frac{\sqrt{\cos\theta/2}}{\lambda_D + h\sqrt{\cos\theta/2}}. \tag{10}$$

Здесь h – высота над поверхностью Энцелада, λ_D – дебаевский радиус фотоэлектронов вблизи поверхности Энцелада. Это выражение получено в результате совместного решения кинетического уравнения для фотоэлектронов и уравнения Пуассона по аналогии с выражением, полученным для Луны [27–29]. Зависимость электрического поля от угла θ в выражении (10) обусловлена изменением числа фотонов, которые поглощаются единицей поверхности Энцелада, в зависимости от угла θ.

Представленную выше систему уравнений можно упростить. Во-первых, магнитное поле Сатурна у поверхности Энцелада примерно равно [30] 3×10^{-3} Гс, что сравнимо с магнитными полями в областях лунных магнитных аномалий [31]. Для таких магнитных полей слагаемым в правой части уравнения (4), содержащим магнитное поле, можно пренебречь по сравнению с другими слагаемыми. Система уравнений (4) и (5) (без учёта слагаемого, содержащего магнитное поле) имеет решения, характеризующие траектории пылевых частиц, в виде затухающих колебаний (см., например, [18]). Причем затухание связано с диссипативными процессами за счет процессов зарядки пылевых частиц, характеризующихся частотой (ср. [32])

$$\begin{aligned} \nu_q \approx \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \frac{a v_{Te,ph}}{\lambda_D^2} \left(1 + \frac{Z_{d0} e^2}{a T_{e,ph}}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{Z_{d0} e^2}{a T_{e,ph}}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{a v_{TeS}}{\lambda_{DeS}^2}, \end{aligned} \tag{11}$$

определяющей время релаксации зарядов пылевых частиц до равновесных значений (при малых отклонениях от равновесных значений). Здесь индекс “0” обозначает равновесные значения, а $v_{Te,ph} = \sqrt{T_{e,ph}/m_e}$, $v_{TeS} = \sqrt{T_{eS}/m_e}$, $\lambda_{DeS} = \sqrt{T_{eS}/4\pi n_{eS} e^2}$. Для того, чтобы не слишком усложнять выражение для ν_q, при выводе (11) пренебрегали током ионов солнечного ветра (7), что оказывается возможным, поскольку для условий пылевой плазмы над поверхностью Энцелада данный ток, как правило, наименьший по абсолютной величине среди токов (6)–(9).

Подход [32] позволяет получить достаточно простое условие, при котором можно рассматривать пылевые частицы над безатмосферным космическим телом как левитирующие, т.е. частицы, для которых можно предположить наличие баланса между действующими на частицу электростатическими и гравитационными силами (см., например, [18, 33, 34])

$$2/\nu_q(a) \ll T_E, \qquad (12)$$

где T_E – продолжительность светлого времени суток на Энцеладе, т.е. около 0.7 земных суток ($\approx 6 \times 10^4$ с). Условие (12) означает, что колебания частицы успевают затухать гораздо быстрее, чем заканчиваются сутки на Энцеладе, т.е. можно считать пылевую частицу левитирующей большую часть времени существования пылевой плазмы над освещенной частью Энцелада. В рассматриваемых условиях неравенство (12) выполняется для подавляющего большинства пылевых частиц, способных подняться над поверхностью Энцелада.

Таким образом, для описания поведения левитирующих пылевых частиц над освещенной частью поверхности Энцелада и определения их распределений по высотам вместо системы дифференциальных уравнений (4) и (5) следует решить систему следующих алгебраических уравнений:

$$q_d\mathbf{E} + m_d\mathbf{g}_0 = 0, \qquad (13)$$

$$I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d) = 0. \qquad (14)$$

Уравнения (13) и (14) позволяют найти зависимости $a(h)$ и $Z_d(h)$, если известна напряженность электрического поля E на высоте h. Для определения $E(h)$ необходимо решить уравнение Пуассона, в правую часть которого, наряду с другими величинами, входит концентрация пылевых частиц $n_d(h)$. Если известны функция $a(h)$ и распределение частиц реголита на поверхности Энцелада по размерам, то, учитывая тот факт, что над ней поднимаются именно пылевые частицы, находящиеся первоначально на поверхности Энцелада, можно определить распределение $n_d(h)$. Таким образом, чтобы найти зависимости $a(h)$, $Z_d(h)$, $n_d(h)$ и $E(h)$, необходимо самосогласованно решать уравнения (13) и (14), а также уравнение Пуассона, учитывающее распределение пылевых частиц по размерам на поверхности Энцелада. Поскольку последнее нам неизвестно, в качестве распределения частиц реголита по размерам на поверхности Энцелада было использовано аналогичное распределение для Луны (см., например, [18, 20]). Аналитически такое рассмотрение провести невозможно, поэтому используются численные методы, в частности, итерационный метод. На первом этапе используется зависимость $E(h)$, определяемая (10). Соответственно, изменения электрического поля учитываются на последующих шагах.

Таким образом, на основе представленной физико-математической модели можно численными методами получить значения, характеризующие высотное распределение заряженных пылевых частиц и электрического поля над поверхностью Энцелада с учетом, в том числе, процесса эмиссии фотоэлектронов частицами пыли, присутствующими над поверхностью Энцелада. В расчетах использованы данные, характеризующие пылевые частицы и электрические поля над поверхностью Энцелада в условиях, соответствующих солнечному максимуму, работе выхода материала поверхности Энцелада $W = 8.7$ эВ, углах между местной нормалью и направлением на Солнце $\theta = 0°$, $77°$, $82°$ и $87°$, а также $n_{eS} = n_{iS} = 0.1\,\text{см}^{-3}$, $T_{eS} = 10\,\text{эВ}$, $u_i = 400\,\text{км/с}$. Соответствующие результаты расчетов показаны на рис. 2a–d, на которых a характеризует максимальный размер частиц на соответствующей высоте h, n_d – концентрация частиц пыли. Значения зарядового числа Z_d на рис. 2a–d рассчитаны для значений a, представленных на соответствующих рисунках.

Отметим, что в рамках стационарной задачи (13) и (14) решения существуют для всех перечисленных выше значений угла θ. Итак, в приповерхностном слое над освещенной частью Энцелада происходит формирование плазменно-пылевой системы. При этом, несмотря на удаленность Энцелада от Солнца, фотоэффект оказывается важным процессом при ее формировании. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Энцелада получены функции распределения фотоэлектронов у поверхности Энцелада, а также высотные зависимости концентрации пылевых частиц, зарядов и размеров пылевых частиц, электрических полей. Показано, что над поверхностью Энцелада поднимаются пылевые частицы с характерными размерами порядка 0.2 – 0.4 мкм, превышающими характерные размеры пылевых частиц, поднимающихся над поверхностью Луны ($a \sim 0.1\,\text{мкм}$ [20]). У поверхности Энцелада присутствуют электрические поля с напряженностью порядка нескольких десятых В/м. Типичные концентрации пылевых частиц составляют $\sim 10^{-4}$–$10^{-2}\,\text{см}^{-3}$, а фотоэлектронов – порядка $1\,\text{см}^{-3}$. У поверхности Энцелада концентрация фотоэлектронов на порядок может превосходить кон-

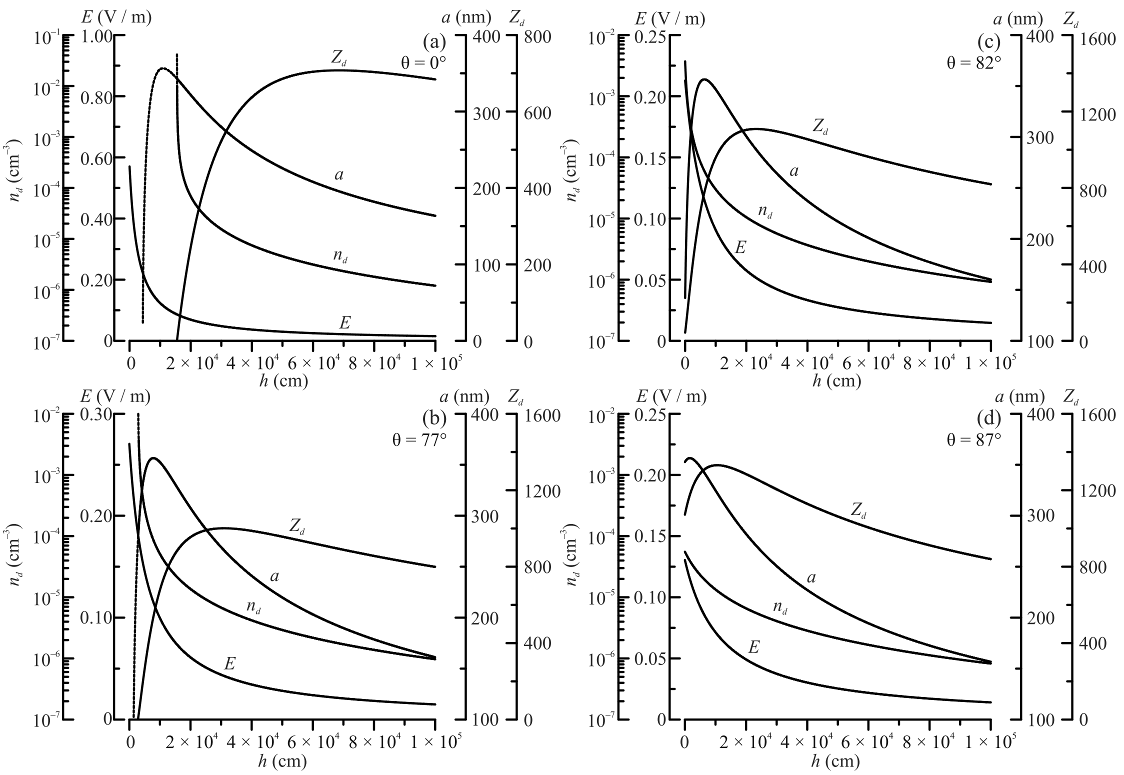

Рис. 2. Максимальные размеры a, зарядовые числа Z_d, концентрации n_d левитирующих пылевых частиц, а также электрические поля E в зависимости от высоты h над поверхностью Энцелада для углов $\theta = 0^\circ$ (a), 77° (b), 82° (c) и 87° (d). Пунктирные части кривых обозначают состояния неустойчивого равновесия левитирующих пылевых частиц

центрацию электронов и ионов солнечного ветра ($\sim 0.1\,\text{см}^{-3}$). В рамках миссии "Кассини" измерения [35] размеров пылевых частиц с помощью аппаратуры "the Cassini Radio and Plasma Wave Science" показали возможность существования, в том числе, и в окрестностях Энцелада частиц с размерами около 0.2 мкм. Однако измеренные при этом концентрации частиц были на несколько порядков ниже полученных здесь, что, в частности, обусловлено тем, что в настоящей работе представлено рассмотрение концентраций частиц на высотах вплоть до 1 км над поверхностью Энцелада, тогда как измерения "Кассини" [35] проводились на существенно больших расстояниях от Энцелада.

Таким образом, представлено описание плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над Энцеладом на основе самосогласованной модели. Данная модель не может использоваться для описания нестационарных процессов, возникающих, например, в области терминатора на Энцеладе. Это подразумевает необходимость дальнейшего развития модели, что предполагается осуществить в будущем. Необходимо также иметь более определенные данные о параметрах плазменно-пылевой системы в окрестности Энцелада, которые, как надеются авторы, будут определены в результате дальнейшего анализа данных, полученных в миссии "Кассини". Далее, по аналогии с Луной (см. [18, 36]) важным направлением исследований плазменно-пылевой системы в окрестности Энцелада является исследование влияния магнитного поля Сатурна на перенос пылевых частиц и на развитие плазменных неустойчивостей, что также предполагается рассмотреть в будущем.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Конфликта интересов нет.

1. J. Hao, C. R. Glein, F. Huang, N. Yee, D. C. Catling, F. Postberg, J. K. Hillier, R. M. Hazen, PNAS **119**(39), e2201388119 (2022).
2. F. Spahn, J. Schmidt, N. Albers, M. Hörning, M. Makuch, M. Seiß, S. Kempf, R. Srama, V. Dikarev, S. Helfert, G. Moragas-Klostermeyer, A. V. Krivov,

M. Sremčević, A. J. Tuzzolino, T. Economou, E. Grün, Science **311**(5766), 1416 (2006).

3. V. V. Yaroshenko, S. Ratynskaia, J. Olson, N. Brenning, J.-E. Wahlund, M. Morooka, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, and G. E. Morfill, Planet. Space Sci. **57**, 1807 (2009).
4. M. Efroimsky, Icarus **300**, 223 (2018).
5. D. A. Rothery, *Satellites of the Outer Planets: Worlds in Their Own Right*, Oxford University Press, N.Y. (1999), 264 p.
6. L. Iess, D. J. Stevenson, M. Parisi, D. Hemingway, R. A. Jacobson, J. I. Lunine, F. Nimmo, J. W. Armstrong, S. W. Asmar, M. Ducci, and P. Tortora, Science **344**(6179), 78 (2014).
7. L. Betz, H. Braun, and C. Pulliam, Webb Maps Surprisingly Large Plume Jetting From Saturn's Moon Enceladus (2023), https://www.nasa.gov/solar-system/webb-maps-surprisingly-large-plume-jetting-from-saturns-moon-enceladus/
8. W. M. Farrell, W. S. Kurth, R. L. Tokar, J.-E. Wahlund, D. A. Gurnett, Z. Wang, R. J. MacDowall, M. W. Morooka, R. E. Johnson, and J. H. Waite Jr., Geophys. Res. Lett. **37**, L20202 (2010).
9. M. W. Morooka, J.-E. Wahlund, A. I. Eriksson, W. M. Farrell, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, A. M. Persoon, M. Shafiq, M. André, and M. K. G. Holmberg, J. Geophys. Res. **116**, A12221 (2011).
10. I. A. D. Engelhardt, J.-E. Wahlund, D. J. Andrews, A. I. Eriksson, S. Ye, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, M. W. Morooka, W. M. Farrell, and M. K. Dougherty, Planet. Space Sci. **117**, 453 (2015).
11. T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, Adv. Space Res. **37**, 59 (2006).
12. Z. Sternovsky, P. Chamberlin, M. Horányi, S. Robertson, and X. Wang, J. Geophys. Res. **113**, A10104 (2008).
13. 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).
14. 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).
15. Е. А. Лисин, В. П. Тараканов, О. Ф. Петров, С. И. Попель, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, and В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **98**, 755 (2013).
16. Т. М. Буринская, Физика плазмы **40**, 17 (2014).
17. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, A. P. Golub', and A. Yu. Dubinskii, Planet. Space Sci. **156**, 71 (2018).
18. S. I. Popel, A. P. Golub', A. I. Kassem, and L. M. Zelenyi, Phys. Plasmas **29**, 013701 (2022).
19. C. Rossi, P. Cianfarra, F. Salvini, O. Bourgeois, and G. Tobie, J. Geophys. Res.: Planets **125**, e2020JE006471 (2020).
20. 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).
21. E. Walbridge, J. Geophys. Res. **78**, 3668 (1973).
22. Б. А. Клумов, Г. Е. Морфилл, С. И. Попель, ЖЭТФ **127**, 171 (2005).
23. A. Schmitt-Ott, P. Schurtenberger, and H. C. Siegmann, Phys. Rev. Lett. **45**, 1284 (1980).
24. P. C. Chamberlin, T. N. Woods, and F. G. Eparvier, Space Weather **6**, S05001 (2008).
25. С. И. Попель, А. П. Голубь, Ю. Н. Извекова, В. В. Афонин, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Е. А. Лисин, О. Ф. Петров, Письма в ЖЭТФ **99**, 131 (2014).
26. T. V. Losseva, S. I. Popel, A. P. Golub', Yu. N. Izvekova, and P. K. Shukla, Phys. Plasmas **19**, 013703 (2012).
27. Е. К. Колесников, А. С. Мануйлов, Астрономический журнал **59**, 996 (1982).
28. R. J. L. Grard and J. K. E. Tunaley, J. Geophys. Res. **76**, 2498 (1971).
29. Е. К. Колесников, А. Б. Яковлев, Астрономический вестник **31**, 70 (1997).
30. M. K. Dougherty, K. K. Khurana, F. M. Neubauer, C. T. Russell, J. Saur, J. S. Leisner, and M. E. Burton, Science **311**(5766), 1406 (2006).
31. С. И. Попель, А. П. Голубь, А. И. Кассем, Л. М. Зеленый, Физика плазмы **48**, 451 (2022).
32. С. И. Попель, А. П. Голубь, Письма в ЖЭТФ **115**, 629 (2022).
33. J. E. Colwell, S. R. ,Robertson, M. Horányi, X. Wang, A. Poppe, and P. Wheeler, J. Aerosp. Eng. **22**, 2 (2009).
34. S. K. Mishra and A. Bhardwaj, Astrophys. J. **884**, 5 (2019).
35. S.-Y. Ye, D.A. Gurnett, and W. S. Kurth, Icarus **279**, 51 (2016).
36. S. I. Popel, A. I. Kassem, Yu. N. Izvekova, and L. M. Zelenyi, Phys. Lett. A **384**, 126627 (2020).