Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 9, с. 605 – 615

О возможности формирования плазменно-пылевого кристалла вблизи безатмосферного космического тела

С. И. Попель[1], *Л. М. Зеленый*

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

Поступила в редакцию 25 февраля 2026 г.
После переработки 20 марта 2026 г.
Принята к публикации 2 апреля 2026 г.

Впервые проведен анализ возможности формирования сильносвязанного состояния и плазменно-пылевого кристалла вблизи безатмосферного космического тела. Показано, что необходимыми условиями для этого являются возможность подъема достаточно крупных пылевых частиц и их левитации над поверхностью космического тела, а также существование источников пыли, позволяющих получить достаточно высокие концентрации пылевых частиц на высотах, где они могут левитировать. Оказывается, что данным условиям могут удовлетворять кометы, обладающие достаточно большим содержанием пыли в веществе их ядер. Для таких комет возможно образование областей пылевой плазмы на высотах, составляющих десятки и сотни метров, на которых присутствуют пылевые частицы в положении устойчивого равновесия. Определены значения параметра неидеальности плазменно-пылевой системы у комет и показано, что они могут достигать и даже превосходить критическую величину для образования плазменно-пылевого кристалла, причем параметры плазменно-пылевой системы, как правило, соответствуют формированию объемно-центрированной кубической кристаллической решетки. Для наблюдения плазменно-пылевого кристалла в будущих космических миссиях могут использоваться оптические методы визуализации пылевых частиц, являющиеся развитием методов визуализации лабораторной пылевой плазмы. Обсуждаются возможности формирования сильносвязанного состояния и плазменно-пылевого кристалла вблизи других космических тел. По-видимому, наряду с кометами сильносвязанное плазменное состояние может возникать также и у активных астероидов. Что касается других безатмосферных тел Солнечной системы (обычные астероиды, спутники Марса, Луна, Меркурий и т.д.), получить сильносвязанное состояние пылевой плазмы у этих объектов естественным образом скорее всего невозможно.

DOI: 10.7868/S3034576626050037

1. Введение. Пыль и пылевая плазма [1] широко распространены в космосе [2–16]. Они обнаружены в планетных кольцах, приповерхностных областях и на орбитах безатмосферных космических тел, хвостах и комах комет, атмосферах планет, в межпланетных и межзвездных облаках. Пылевая плазма обнаружена также вблизи космических аппаратов [17]. Существенным свойством пылевой плазмы, отличающим ее от обычной плазмы (без пыли), является возможность существования в ней различных агрегатных состояний. Примером агрегатного состояния, соответствующего твердой фазе, является плазменно-пылевой кристалл [18]. В 1994 году плазменно-пылевой кристалл удалось наблюдать в лабораторных экспериментах [19–22] в плазме ВЧ-разряда вблизи границы прикатодной области, а в 1996 г. – в положительном столбе тлеющего разряда [23]. Однако в природе круг объектов, где может существовать сильносвязанное плазменное состояние, существенным образом ограничен. Обычно в этом контексте упоминаются, например, внутренние области звезд, красные гиганты, белые карлики [24].

Существенное внимание в настоящее время уделяется исследованию плазменно-пылевых процессов вблизи поверхностей небесных тел, не имеющих атмосфер, что, в том числе, связано с запланированными экспериментальными исследованиями Луны в рамках миссий КНР (Chang'E-7 и Chang'E-8) и России ("Луна-27"). На спускаемых аппаратах этих миссий будут установлены различные модификации аппаратуры ПмЛ (Плазменный мониторинг Луны) [25], предназначенной для исследования пыли и пылевой плазмы у лунной поверхности и хорошо зарекомендовавшей себя в рамках миссии "Луна-25" [26]. Далее, успешными с точки зрения экспериментального изучения свойств пыли у безатмосферных космических тел оказались миссии к кометам. Так, во время миссии Rosetta к комете 67P / Чурюмова–Герасименко

[1]e-mail: popel@iki.rssi.ru

было проведено весьма детальное исследование состава кометных ядер [27]. Анализ доступных наборов данных показал, что для кометы 67P / Чурюмова–Герасименко характерны пористые “камешки”, которые непосредственно наблюдались на поверхности ядра кометы (похожие на хондритовые пористые частицы межпланетной пыли, т.е. частицы преимущественно силикатного состава). Соответствующие наблюдения были выполнены с помощью камеры CIVA на борту посадочного модуля Philae [28]. Инструменты Rosetta позволили изучить структуру кометной пыли различных размеров, в том числе, и пыли с размерами в несколько десятков нанометров. Оказалось возможным с большой уверенностью сделать вывод, что частицы пыли имеют сложную структуру и высокую внутреннюю пористость [29, 30]. Многие из них отличаются очень низкой прочностью. Обнаруженные пылевые частицы, по всей вероятности, образовались существенно раньше, чем реголит на других небольших космических телах и, скорее всего, представляют собой первичный материал кометы. Следует отметить, что комета 67P / Чурюмова–Герасименко не является уникальной. На основании наблюдений кометы 103P / Hartley космическим аппаратом EPOXI был сделан вывод [31], что нетронутые “камешки” могут сформировать комету в результате последующего гравитационного коллапса.

Поверхность небесного тела, не имеющего атмосферы может заряжаться в результате воздействия электромагнитного излучения Солнца и плазмы солнечного ветра. В результате фотоэффекта, вызванного воздействием электромагнитного излучения, с поверхности небесного тела испускаются фотоэлектроны. Источником фотоэлектронов также являются находящиеся над небесным телом пылевые частицы (они также поглощают солнечный свет). Пылевые частицы над поверхностью небесного тела и в приповерхностном слое не только испускают фотоэлектроны, но и поглощают их вместе с фотонами солнечного излучения, электронами и ионами солнечного ветра [32]. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью небесного тела, подъему и движению пыли. В случае кометы [33] влияние на формирование пылевой плазмы оказывается как процессами, приводящими к электростатическому взаимодействию пылевой плазмы с заряженной поверхностью космического тела, так и увлечением пыли потоком газов, возникающих в результате сублимации, что обусловлено нагревом ядра кометы солнечным излучением [34–38]. В [33] показана возможность на определенном удалении от Солнца существования равновесных положений пылевых частиц определенных (микронных) размеров, в которых важными оказываются плазменно-пылевые процессы, и осуществляется баланс между силами, действующими на частицу, направленными вверх (сила со стороны газового потока и электростатическая сила) и вниз (сила гравитации). Пылевые частицы соответствующих размеров способны подниматься до указанных равновесных положений, поскольку ниже этих положений на частицы действует результирующая сила, направленная исключительно вверх.

Обычно отмечаются следующие общие особенности пылевой плазмы для значительного количества небесных тел, не имеющих атмосферы: (а) нелинейность плазменно-пылевой системы, связанная, в частности, с нелинейным характером зарядки пылевых частиц [39]; (б) аномальная диссипация в пылевой плазме [40, 41], связанная с эффектом зарядки пылевых частиц, приводящая к тому, что для большинства пылевых частиц их траектории стабилизируются за времена, меньшие продолжительности светлого времени суток на небесном теле, что, в конечном итоге, позволяет считать большинство пылевых частиц “левитирующими” [42]. В этой ситуации для описания пылевой плазмы применим стационарный подход. Однако такое важное свойство, как возможность формирования сильносвязанного состояния и плазменно-пылевого кристалла в пылевой плазме вблизи поверхностей небесных тел, не имеющих атмосфер, до сих пор не обсуждалось, что было обусловлено убеждением, что пылевая плазма вблизи указанных объектов весьма разреженная, что не позволяет возникнуть плазме в сильносвязанном состоянии и, тем более, плазменно-пылевому кристаллу. Целью настоящей работы является анализ возможности формирования сильносвязанного состояния и плазменно-пылевого кристалла вблизи безатмосферного космического тела.

2. Условия для формирования плазменно-пылевого кристалла. Возможность кристаллизации плазмы впервые была показана в рамках модели однокомпонентной плазмы [43]. На основе качественных результатов этой модели была продемонстрирована возможность кристаллизации пылевой подсистемы в неравновесной газоразрядной плазме [44]. Численное моделирование [45, 46] показало возможность перехода плазменно-пылевой системы из разупорядоченной газовой фазы в жидкую (при значениях параметра неидеальности порядка единицы), а затем при превышении этим параметром критической величины (приблизительно 170) и в упорядоченную кристаллическую фазу.

Наряду с параметром неидеальности $\tilde{\gamma}_d$, равным отношению потенциальной энергии кулоновского взаимодействия к кинетической энергии теплового движения, характеризуемой температурой пылевых частиц T_d,

$$\tilde{\gamma}_d = \frac{q_d^2}{T_d \Delta} = \frac{Z_d^2 e^2 n_d^{\frac{1}{3}}}{T_d}, \quad (1)$$

свойства пылевой плазмы, характеризующие фазовые переходы в ней, в значительной степени определяются (см., например, [47, 48]) так называемым структурным параметром (параметром решетки):

$$\kappa = \Delta/\lambda_D. \quad (2)$$

Здесь n_d – концентрация пылевых частиц, $\Delta \equiv n_d^{-\frac{1}{3}}$ характеризует среднее расстояние между пылевыми частицами, $-e$ – заряд электрона, $q_d = Z_d e$ – заряд пылевой частицы, T_d измеряется в энергетических единицах, $\lambda_D^{-2} = \lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}$, $\lambda_{De(i)}$ – дебаевский радиус электронов (ионов). Для построения фазовых диаграмм в пылевой плазме обычно использовались численные методы (метод Монте-Карло или метод молекулярной динамики) [49–51].

Таким образом, чтобы достичь достаточно больших значений параметра неидеальности и, тем самым, удовлетворить (необходимому) условию возникновения плазменно-пылевого кристалла, следует рассматривать плазменно-пылевые системы, в которых

(1) пылевые частицы являются, по возможности, достаточно крупными и, соответственно, абсолютные значения их зарядовых чисел $|Z_d|$ достаточно большие;

(2) концентрация пылевых частиц n_d достаточно велика.

Кроме того, плазменно-пылевой кристалл представляет собой квазистационарную структуру, поэтому должно отсутствовать “сложное” движение пылевых частиц типа движения по периодическим траекториям [41, 52], т.е. для формирования плазменно-пылевого кристалла могут подойти исключительно “левитирующие” пылевые частицы.

Из рассмотренных к настоящему времени безатмосферных космических тел (Луна, Меркурий, спутники Марса, астероиды, кометы) указанным условиям лучше всего удовлетворяют кометы, что обусловлено их малой гравитацией – соответственно, над поверхностью кометы могут подниматься достаточно крупные пылевые частицы. Далее, соотношение пыль/газ, полученное из наблюдений комы ряда комет, находится в диапазоне 0.1–1 [53–55], т.е. можно ожидать значительного количества пыли в коме такой кометы (десятки процентов от общей массы комы) и высоких концентраций пылевых частиц n_d. Предполагая десятипроцентное содержание пыли в веществе ядра кометы и объемную плотность ядра около 1 г/см^3, получаем, что концентрация пылевых частиц микронного размера может достигать величин порядка 10^{11} см$^{-3}$ [56]. Ниже обсуждается возможность формирования плазменно-пылевого кристалла в пылевой плазме в окрестности ядра кометы.

3. Пылевая плазма у ядра кометы. Поведение пылевых частиц у ядра кометы описывается уравнениями, характеризующими их динамику и зарядку [33]:

$$m_d \frac{d^2 \mathbf{r}_d}{dt^2} = q_d \mathbf{E} + m_d \mathbf{g}_0 + \mathbf{F}_{fg}, \quad (3)$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d), \quad (4)$$

где $\mathbf{F}_{fg}$ – сила увлечения пылевой частицы газовым потоком, соответствующая обтеканию твердой частицы разреженным газом в режиме Эпштейна [57]. Ее направление совпадает с направлением газового потока, а абсолютная величина в ситуации, когда скорость газа много больше скорости частицы, определяется по формуле:

$$F_{fg} = (4/3)\pi a^2 n_s m_{H_2O} u_s^2. \quad (5)$$

Далее, a – размер пылевой частицы; m_{H_2O} – масса молекулы воды; u_s и n_s – соответственно скорость течения газа и его концентрация; m_d – масса пылевой частицы; $\mathbf{g}_0$ – ускорение свободного падения у поверхности ядра кометы; $\mathbf{E}$ – электрическое поле; $I_e(q_d)$ 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. Выражения для тока фотоэлектронов и микроскопических токов представлены, например, в [33].

При решении уравнений (3) и (4) предполагалось, что электрическое поле $\mathbf{E}$, создаваемое заряженной поверхностью ядра кометы (которая рассматривается как плоская без каких-либо возвышенностей или впадин), является вертикальными, и его значение составляет

$$E(h, \theta) = \frac{2T_{e,ph}}{e} \frac{\sqrt{\cos\theta/2}}{\lambda_{De,ph} + h\sqrt{\cos\theta/2}}. \quad (6)$$

Здесь h – высота над поверхностью ядра кометы, θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце, $\lambda_{De,ph}$ – дебаевский радиус фотоэлектронов вблизи поверхности ядра кометы, $T_{e,ph}$ – температура фотоэлектронов. Это выражение получено в результате совместного решения кинетического уравнения для фотоэлектронов и уравнения Пуассона по аналогии с выражением, полученным для Луны [58–60]. Зависимость электрического поля от угла θ в выражении (6) обусловлена изменением числа фотонов, которые поглощаются единицей поверхности ядра кометы, в зависимости от этого угла.

Зависимости скорости u_s течения газов в газовом потоке, их концентрации n_s и температуры T_s от расстояния L вычисляются с помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса, характеризующего равновесный процесс возгонки, а также предположений, что на поверхности кометного ядра выполняется условие баланса энергии, а скорость истечения молекул равна скорости звука (см. [61]). На рисунке 1 приведены эти зависимости для болометрического альбедо, характеризующего способность поверхности ядра кометы отражать падающее на нее излучение, равного 0.63 и 0.06. Альбедо, равное 0.06, свойственно для кометы Чурюмова–Герасименко [62], тогда как альбедо ядра, равное 0.63, относится к комете, описание которой дано в работе [33].

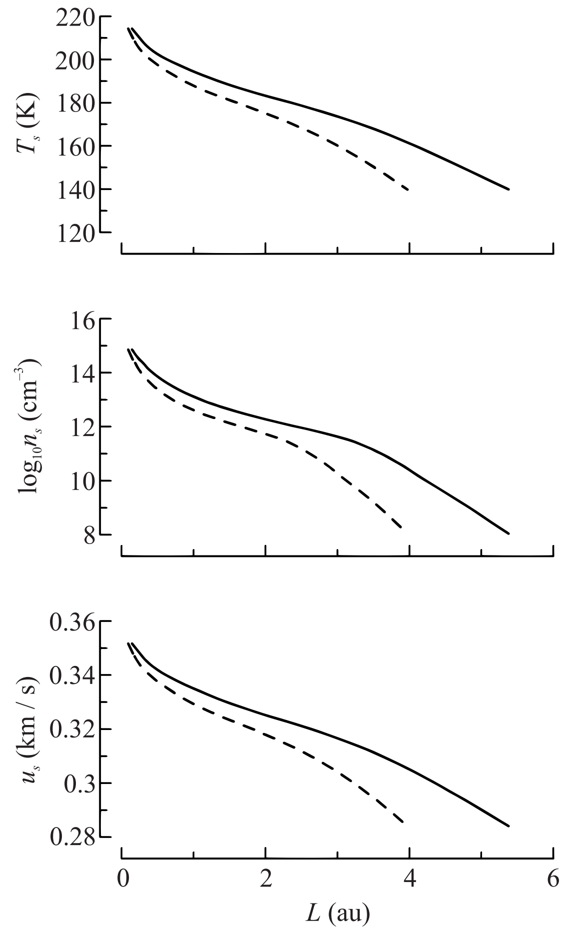

Рис. 1. Зависимости температуры газов в потоке T_s, их концентрации n_s и скорости u_s течения газов в газовом потоке от расстояния L от кометы до Солнца для комет, характеризующихся альбедо ядра 0.63 (пунктирные кривые) и 0.06 (сплошные кривые)

На основе представленной физико-математической модели можно численными методами получить значения параметров, характеризующих высотное распределение заряженных пылевых частиц. Пылевая плазма в окрестности ядра образуется за счет электростатических взаимодействий, т.е. подобно тому, как образуется пылевая плазма вблизи других безатмосферных космических тел (например, Луны, Меркурия, астероидов), при условии, что расстояние от кометы Чурюмова–Герасименко до Солнца составляет не менее ~ 5 а.е. Для кометы, характеризуемой параметрами ядра, описанными в [33], аналогичное минимальное расстояние составляет ~ 3.5 а.е. Если комета находится на более близких расстояниях от Солнца, чем указанное минимальное расстояние, то динамика пылевых частиц определяется потоком газа из ядра кометы.

Отметим, что выше в качестве максимальной концентрации пылевых частиц микронного размера у поверхности ядра кометы упоминалась величина порядка 10^{11} см$^{-3}$. Такие концентрации пыли вблизи ядра кометы возможны на достаточно близких расстояниях от кометы до Солнца, где процесс испарения вещества ядра кометы и выброса из него пылевых частиц происходит с наибольшей интенсивностью. Для расстояний между кометой и Солнцем, больших или порядка 3.5 а.е., концентрации пыли оказываются существенно более низкими, чем отмеченная максимальная величина. В проводимых вычислениях рассматривается область концентраций пылевых частиц, не превосходящих значений $\sim 10^5 - 10^6$ см$^{-3}$. Такие концентрации пыли соответствуют условиям большинства лабораторных экспериментов, где, как хорошо известно [48], для описания зарядки пылевых частиц вполне применима зондовая модель. Используемая при анализе пылевой плазмы вблизи комет [33] модель зарядки пылевых частиц является вариантом зондовой модели, справедливым для условий плазмы в окрестности кометного ядра. Таким образом, имеются все основания полагать, что она адекватно описывает заряды пылевых частиц. При бóльших концентрациях пыли, возможно, необходим учет ее влияния на заряд-

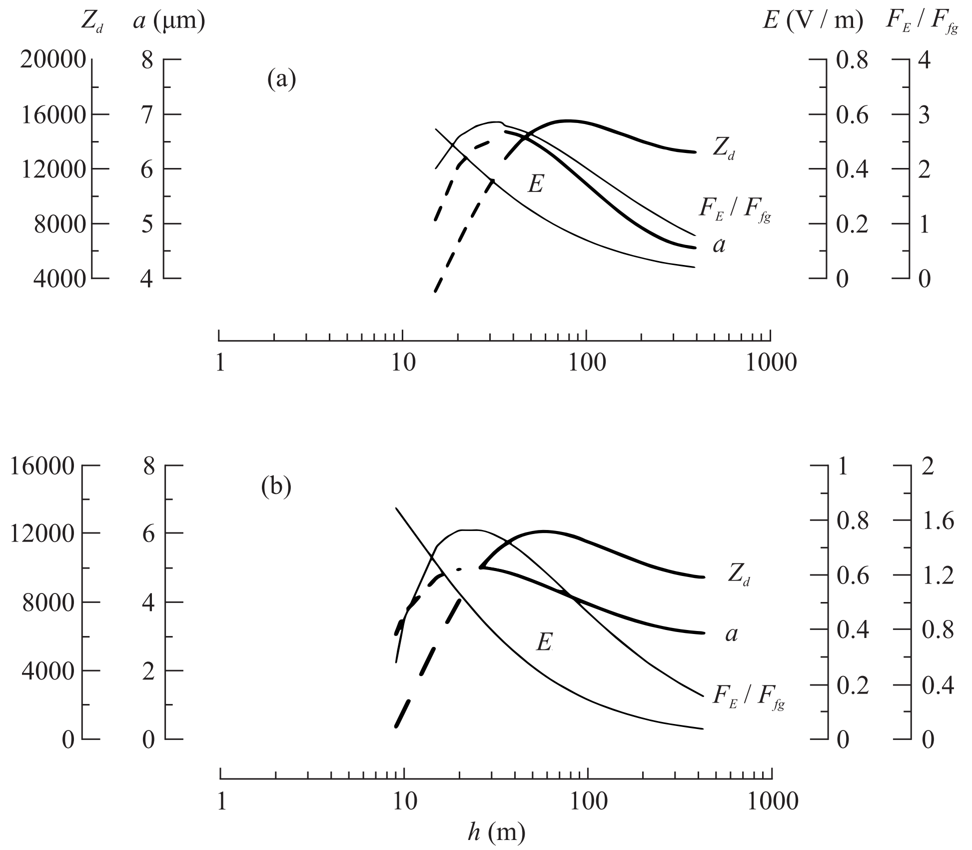

Рис. 2. Размеры a, зарядовые числа Z_d пылевых частиц, отношения электростатической и газодинамической сил F_E/F_{fg}, а также электрические поля E в зависимости от высоты h над поверхностью ядра кометы Чурюмова–Герасименко (a), находящейся на расстоянии ~ 5 а.е. от Солнца, а также кометы (b), описанной в [33], на расстоянии от Солнца ~ 3.5 а.е. для угла $\theta = 0°$. Штриховыми кривыми отмечены неустойчивые состояния равновесия пылевых частиц

ку пылевых частиц, что предполагается в будущих исследованиях.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов максимального размера a частиц на соответствующей высоте h, значения их зарядового числа Z_d и отношения сил F_E/F_{fg} (где F_E – электростатическая сила, действующая на пылевую частицу), рассчитанных для полученных значений a, а также электрического поля E в зависимости от высоты h над поверхностью ядра для кометы Чурюмова–Герасименко, находящейся на расстоянии ~ 5 а.е. от Солнца, а также кометы, описанной в [33], на расстоянии от Солнца ~ 3.5 а.е. Вычисления проводились для следующих параметров: работа выхода материала поверхности ядра кометы $W = 8.7$ эВ (что соответствует водяному льду), работа выхода материала поверхностей пылевых частиц $W = 5.5$ эВ (силикатные частицы), угол между местной нормалью и направлением на Солнце $\theta = 0°$. Характеристики солнечного ветра на расстоянии L от Солнца с его характеристиками на земной орбите связаны следующими выражениями: $n_{eS} = n_{eS0}/L^2$ – концентрация электронов, $n_{iS} = n_{iS0}/L^2$ – концентрация ионов, $T_{eS} = T_{eS0}/L^{4/3}$ – температура электронов, $T_{iS} = T_{iS0}/L^{4/3}$ – температура ионов, где L вычисляется в астрономических единицах, а индекс 0 обозначает значения величин на орбите Земли ($n_{eS0} = n_{iS0} = 8.7\,\text{см}^{-3}$, $T_{eS0} = 12$ эВ, $T_{iS0} = 6$ эВ, скорость солнечного ветра $u_{i0} = 468$ км/с). Зависимости, характеризующие солнечный ветер, выводятся в предположениях, что имеет место сферически симметричный разлет солнечного ветра в инерциальном режиме (когда его скорость u_i сохраняется), и, кроме того, температуры компонент изменяются в соответствии с адиабатой Пуассона для идеального газа с показателем адиабаты, равным $5/3$.

Из рисунка 2 видно, что в определенном диапазоне размеров пылевых частиц возможно существование устойчивого положения их равновесия, т.е. такие частицы можно трактовать как левитирующие аналогично ситуации, типичной для окололунной пылевой плазмы [41, 42, 63]. Для кометы Чурюмова–Герасименко этот диапазон размеров составляет приблизительно 4.4–6.7 мкм, для кометы, описанной в [33], – 3.3–5.3 мкм. Диапазоны зарядовых чисел для указанных частиц имеют вид $Z_d \approx 13000-16000$ и $Z_d \approx 10000-12500$ соответственно, а располагаются частицы в слое, находящемся на высотах, составляющих десятки и сотни метров над поверхностью ядра кометы. На таких высотах основной вклад в популяцию фотоэлектронов вносят фотоэлектроны от поверхностей пылевых частиц, концентрация которых n_e имеет порядок $Z_d n_d$, а температура $T_e \approx 1.9$ эВ [33]. Полагая, что температура пылевых частиц T_d совпадает с температурой T_s, можно с учетом приведенных выше данных вычислить параметр неидеальности $\tilde{\gamma}_d$ и структурный параметр (параметр решетки) κ для ситуации, когда пылевые частицы находятся в положении устойчивого равновесия. На рисунке 3 приведены зависимости от κ концентрации n_d пылевых частиц, находящихся в положении устойчивого равновесия, и параметра $\tilde{\gamma}_d$ для случаев кометы Чурюмова–Герасименко на расстоянии ~ 5 а.е. от Солнца, а также кометы, описанной в [33] и присутствующей на расстоянии ~ 3.5 а.е. от Солнца. Зависимости, приведенные на рис. 3, вычислялись для средних значений зарядовых чисел в соответствующих диапазонах, т.е. $Z_d \approx 14500$ и $Z_d \approx 11250$ для случаев, соответственно, кометы Чурюмова–Герасименко и кометы [33]. Отклонения от кривых, характеризующих эти зависимости, для других расчетных параметров в каждом из рассматриваемых случаев малы.

Из рисунка 3 видно, что значения параметра неидеальности $\tilde{\gamma}_d$ достигают и превосходят критическую величину (т.е. $\tilde{\gamma}_d \geq 170$) при концентрациях пыли, больших или порядка $0.1-1\,\text{см}^{-3}$. По-видимому, такие концентрации пыли вполне могут присутствовать у поверхности ядра кометы (и на высотах в десятки и сотни метров, где находятся пылевые частицы в положении устойчивого равновесия). Таким образом, на этих высотах можно ожидать формирование упорядоченной кристаллической плазменно-пылевой фазы естественным образом.

Данный вывод подтверждается использованием фазовой диаграммы [64] дебаевской системы на плоскости (κ, $\tilde{\gamma}_d$) – см. рис. 4. Видно, что области, характеризующие состояние плазменно-пылевой системы над поверхностями ядер кометы Чурюмова–Герасименко и кометы, описанной в [33], находятся, в основном, в области, характеризующей объемно-центрированную кубическую кристаллическую решетку на фазовой диаграмме, и лишь небольшой

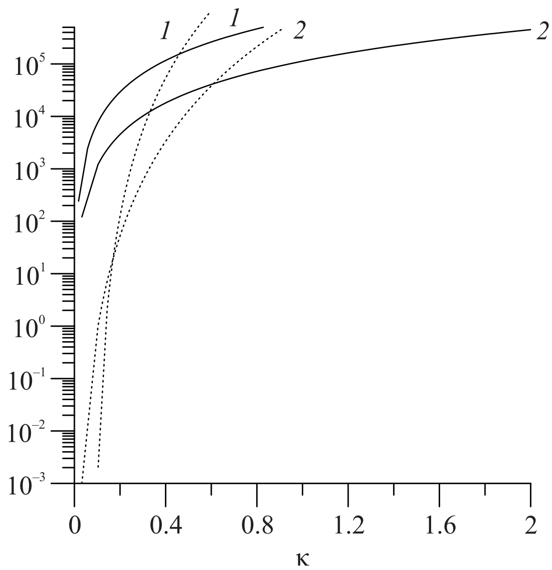

Рис. 3. Зависимости от структурного параметра κ концентрации n_d пылевых частиц (сплошные кривые) и параметра неидеальности $\tilde{\gamma}_d$ (пунктриные кривые). Цифрами обозначены данные для кометы Чурюмова–Герасименко (*1*) и кометы, описанной в [33] (*2*)

участок кривой, характеризующей комету [33], при достаточно больших значениях $\tilde{\gamma}_d (> 10^5)$ (и, соответственно, больших значениях $n_d (\gtrsim 10^5)\,\text{см}^{-3}$) находится в области, соответствующей гранецентрированной кубической кристаллической решетке.

4. Заключение. Итак, необходимыми условиями формирования сильносвязанного состояния плазмы и плазменно-пылевого кристалла вблизи безатмосферного космического тела являются возможность подъема достаточно крупных пылевых частиц и их левитации, а также существование источников пыли, позволяющих получить достаточно высокие концентрации пылевых частиц на высотах, где они могут левитировать. При этом частицы обладают достаточно большими зарядами, а левитирующая пыль может рассматриваться как более или менее стационарная. Оказывается, что данным условиям могут удовлетворять кометы, обладающие достаточно большим содержанием пыли в веществе их ядер. Для таких комет возможно образование областей пылевой плазмы на высотах, составляющих десятки и сотни метров, на которых присутствуют пылевые частицы в положении устойчивого равновесия. Для концентраций пылевых частиц у ядра кометы, превосходящих величины $\sim 0.1-1\,\text{см}^{-3}$ значения параметра неидеальности достигают и превосходят критическую величину для образования плазменно-пылевого кристалла, причем параметры плазменно-пылевой системы, как правило, соответствуют формирова-

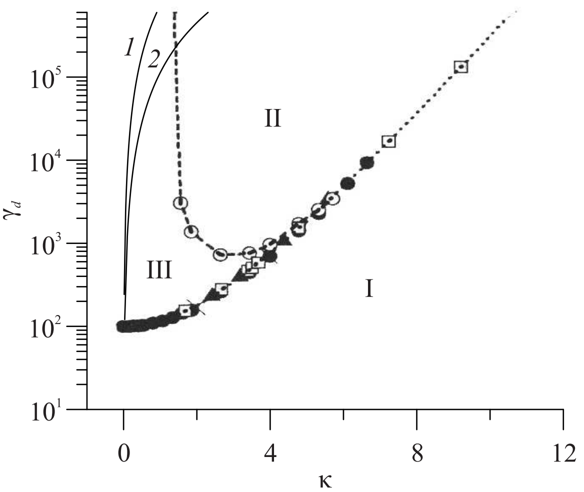

Рис. 4. Фазовая диаграмма дебаевских систем, полученная с помощью численного моделирования. Отмечена жидкая фаза (I). Символы ○ – указывают границу между двумя кристаллическими фазами – объемно-центрированной кубической (III) и гранецентрированной кубической (II) [46]. Остальные символы соответствуют границе жидкость–кристалл и получены в работах: ▲ – [65], □ – [51], ● – [46]. Символы × соответствуют скачку константы диффузии при моделировании диссипативных дебаевских систем [66, 67]. Пунктирная линия проведена "на глаз" по численным результатам. Кривые *1* и *2* характеризуют состояние плазменно-пылевой системы в областях устойчивого равновесия пылевых частиц, соответственно для кометы Чурюмова–Герасименко и кометы, описанной в [33]

нию объемно-центрированной кубической кристаллической решетки. Поскольку плазменно-пылевую систему в области, где пылевые частицы могут левитировать, составляют частицы микронных размеров, для наблюдения плазменно-пылевого кристалла в будущих космических миссиях могут использоваться оптические методы визуализации пылевых частиц, являющиеся развитием методов визуализации для лабораторной пылевой плазмы [18]. Схожие процессы могут, по-видимому, иметь место в окрестностях активных астероидов, характеризующихся заметной активностью, напоминающей кометную. Проявления такой активности обсуждались, например, в работах [68–71].

Что касается других безатмосферных тел Солнечной системы (обычные астероиды, спутники Марса, Луна, Меркурий и т.д.), получить сильносвязанное состояние пылевой плазмы у этих объектов естественным образом скорее всего невозможно. В принципе, поднять достаточно большое количество пыли над такими телами оказывается возможным вследствие удара метеороида. При этом метеороид должен быть достаточно крупным, чтобы вокруг себя поднять существенную часть слоя реголита. В случае Луны для этой цели метеороид должен иметь размер порядка 1 см. Однако облако пыли, образующееся в результате удара метеороида, достаточно быстро расширяется над поверхностью космического тела так, что плазма в облаке становится все более разреженной, а в изначально плотных областях облака плазменно-пылевой кристалл не успевает сформироваться. В случае более массивных, чем кометы и астероиды, космических тел, добавляется еще проблема, состоящая в том, что из-за большей гравитации над поверхностью космического тела поднимаются меньшие пылевые частицы (например, для Луны и Меркурия порядка 100 нм). Заряды таких пылевых частиц оказываются на порядок величины меньшими, чем заряды микронных частиц, что усложняет выполнение условия, налагаемого на параметр неидеальности и ряд других параметров плазмы, для которых возможным оказывается формирование плазменно-пылевого кристалла. В принципе, проблемы, связанные со сложностями формирования плазменно-пылевого кристалла у Луны, можно обойти искусственным образом (активный эксперимент). Следует либо "подбросить" пыль наверх (с нужными скоростями), либо, например, при посадке аппарата на Луну выпустить пыль нужной концентрации на определенной высоте. Однако, даже если удастся получить искусственным методом плазменно-пылевой кристалл над лунной поверхностью, этот кристалл будет составлен частицами с размерами порядка 100 нм. Более тяжелые частицы будут просто падать на поверхность Луны. Однако визуализация таких мелких частиц методами, развитыми для лабораторной пылевой плазмы, принципиально невозможна, поскольку визуализация предполагает оптические подходы, а размер пыли, левитирующей над поверхностью Луны, существенно меньше длины волны видимого света.

В заключение подчеркнем, что в данном исследовании показана лишь возможность существования условий для формирования плазменно-пылевых кристаллов в космосе. В действительности, детальной теории фазовых переходов в пылевой плазме до сих пор не существует – имеются лишь общие концепции [39]. Для описания конкретной ситуации, связанной с формированием плазменно-пылевого кристалла, по-прежнему необходимы параллельные экспериментальные и теоретические исследования. Возможны ситуации, когда, казалось бы, имеются все основания для формирования плазменно-пылевого кристалла, но его наблюдение оказывается невозможным. Такая ситуация имела, например, место в исследованиях на борту орбитальной станции "Мир" [72], где вид корреляционных функций, наблюдаемых в эксперименте, сильно отличался от расчетного и указывал на формирование в исследуемом объеме только слабокоррелированных структур жидкостного типа, хотя условия вроде бы соответствовали возможности формирования плазменно-пылевого кристалла. Причинами такого расхождения могут быть агломерация разноименно заряженных частиц в процессе их зарядки [72], нелинейные процессы [39], возможный постепенный разлет облака пыли из-за ухода из него электронов и, как следствие, избыточного положительного заряда облака и т.д. Таким образом, при организации исследований пылевой плазмы в будущих космических миссиях следует обеспечить возможность наблюдений неидеальных плазменных состояний со слабокоррелированными структурами жидкостного типа.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда # 24-12-00064, https://rscf.ru/project/24-12-00064/.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. I. Langmuir, C. G. Found, and A. F. Dittmer, "A New Type of Electric Discharge: The Streamer Discharge", Science **60**, 392 (1924).
2. H. Alfvén and G. Arrhenius, *Evolution of the Solar System* (Scientific and Technical Information Office, NASA, Washington, D.C., 1976).
3. И. С. Веселовский, *Солнечный ветер: аспекты взаимодействия*', Итоги науки и техники. Сер.: Исследование космического пространства (ВИНИТИ, М., 1986), т. 25, с. 3 [I. S. Veselovsky, *Solnechnyi veter: aspekty vzaimodeistviya*, Itogi nauki i tekhniki. Ser.: Issledovanie kosmicheskogo prostranstva (VINITI, Moscow, 1986), v. 25, p. 3] [in Russian].
4. Н. В. Вощинников, *Межзвездная пыль, Межзвездная и межпланетная среда*, Итоги науки и техники. Сер.: Исследование космического пространства (ВИНИТИ, М., 1986), т. 25, с. 98 [N. V. Voshchinnikov, *Mezhzvezdnaya pyl', Mezhzvesdnaya i mezhplanetnaya sreda*, Itogi nauki i tekhniki. Ser.: Issledovanie kosmicheskogo prostranstva (VINITI, Moscow, 1986), v. 25, p. 98] [in Russian].
5. C. K. Goertz, "Dusty plasmas in the Solar system", Rev. Geophys. **27**, 271 (1989).
6. H. Krüger, *Jupiter's Dust disc. An astrophysical laboratory* (Shaker Verlag, Aachen, 2003).
7. H. Kimura, H. Ishimoto, and T. Mukai, "A study on solar dust ring formation based on fractal dust models", Astron. Astrophys. **326**, 263 (1997).
8. M. Horányi, *Dusty plasmas in the Solar system*, *Dusty plasmas in the new millenium*, ed. by R. Bharuthram, M. A. Hellberg, P. K. Shukla, and F. Verheest (AIP, Melville, 2002), p. 22.
9. I. V. Nemtchinov, V. V. Shuvalov, N. A. Artemieva, I. B. Kosarev, and S. I. Popel, "Transient atmosphere generated by large meteoroid impacts onto an atmosphereless cosmic body: gasdynamic and physical processes", Int. J. Impact Engineering **27**, 521 (2002).
10. О. А. Богатиков, "Неорганические наночастицы в природе", Вестник РАН **73**, 426 (2003) [O. A. Bogatikov, "Neorganicheskie nanochastitsy v prirode", Vestnik RAN **73**, 426 (2003)].
11. S. I. Popel and A. A. Gisko, "Charged dust and shock phenomena in the Solar system", Nonlinear Process. Geophys. **13**, 223 (2006).
12. А. П. Голубь, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Ю. Н. Извекова, С. И. Копнин, С. И. Попель, "Плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны", Письма в ЖЭТФ **95**, 198 (2012) [A. P. Golub', G. G. Dol'nikov, A. V. Zakharov, L. M. Zelenyi, Yu. N. Izvekova, S. I. Kopnin, and S. I. Popel, "Dusty Plasma System in the Surface Layer of the Illuminated Part of the Moon", JETP Lett. **95**, 182 (2012)].
13. Е. А. Лисин, В. П. Тараканов, О. Ф. Петров, С. И. Попель, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, В. Е. Фортов, "Влияние солнечного ветра на формирование фотоиндуцированного плазменно-пылевого слоя вблизи поверхности Луны", Письма в ЖЭТФ **98**, 755 (2013) [E. A. Lisin, V. P. Tarakanov, O. F. Petrov, S. I. Popel', G. G. Dol'nikov, A. V. Zakharov, L. M. Zelenyi, and V. E. Fortov, "Effect of the Solar Wind on the Formation of a Photoinduced Dusty Plasma Layer near the Surface of the Moon", JETP Lett. **98**, 664 (2013)].
14. M. Horányi, J. R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grün, R. Srama, and Z. Sternovsky, "A Permanent, Asymmetric Dust Cloud around the Moon", Nature **522**(7556), 324 (2015).
15. С. И. Попель, А. П. Голубь, Л. М. Зеленый, M. Хораньи, "Удары высокоскоростных метеороидов и плазменно-пылевое облако над поверхностью Луны", Письма в ЖЭТФ **105**, 594 (2017) [S. I. Popel, A. P. Golub', L. M. Zelenyi, and M. Horányi, "Impacts of Fast Meteoroids and a Plasma-Dust Cloud over the Lunar Surface", JETP Lett. **105**, 635 (2017)].
16. Л. М. Зеленый, А. В. Захаров, С. И. Попель, И. А. Кузнецов, Е. В. Розенфельд, "Физические процессы формирования и особенности плазменно-пылевой экзосферы Луны", УФН **194**, 569 (2024) [L. M. Zelenyi, A. V. Zakharov, S. I. Popel, I. A. Kuznetsov, and E. V. Rozenfeld, "Physical processes of formation and features of the plasma-dust exosphere of the Moon", Phys.-Uspekhi **67**, 533 (2024)].

17. E. C. Whipple, “Potentials of surfaces in space”, Rep. Prog. Phys. **44**, 1197 (1981).
18. В. Е. Фортов, Ю. М. Батурин, Г. О. Морфилл, О. Ф. Петров, *Плазменный кристалл. Космические эксперименты* (Физматлит, М., 2015) [V. E. Fortov, Yu. M. Baturin, G. E. Morfill, and O. F. Petrov, *Plazmennyi kristall. Kosmicheskie eksperimenty* (Fizmatlit, Moscow, 2015)] [in Russian].
19. J. H. Chu and Lin I, “Direct Observation of Coulomb Crystals and Liquids in Strongly Coupled RF Dusty Plasmas”, Phys. Rev. Lett. **72**, 4009 (1994).
20. H. Thomas, G. E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Möhlmann, “Plasma Crystal: Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma”, Phys. Rev. Lett. **73**, 652 (1994).
21. Y. Hayashi and K. Tachibana, “Observation of Coulomb-Crystal Formation from Carbon Particles Grown in a Methane Plasma”, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, L804 (1994).
22. A. Melzer, T. Trottenberg, and A. Piel, “Experimental determination of the charge on dust particles forming Coulomb lattices”, Phys. Lett. A **191**, 301 (1994).
23. В. Е. Фортов, А. П. Нефедов, В. М. Торчинский, В. И. Молотков, А. Г. Храпак, О. Ф. Петров, К. Ф. Волыхин, “Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда”, Письма в ЖЭТФ **64**, 86 (1996) [V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. M. Torchinskii, V. I. Molotkov, A. G. Khrapak, O. F. Petrov, and K. F. Volykhin, “Crystallization of a dusty plasma in the positive column of a glow discharge”, JETP Lett. **64**, 92 (1996)].
24. В. Е. Фортов, *Лекции по физике экстремальных состояний вещества* (Издательский дом МЭИ, М., 2016) [V. E. Fortov, *Lektsii po fizike ekstremal'nykh sostoyanii veshchestva* (Izdatel'skii dom MEI, Moscow, 2016)] [in Russian].
25. А. В. Захаров, Г. Г. Дольников, И. А. Кузнецов и другие, “Прибор ПмЛ на посадочном аппарате Луна-25: плазменно-пылевые измерения в приповерхностной экзосфере”, Астрономический вестник **55**, 589 (2021) [A. V. Zakharov, G. G. Dol'nikov, I. A. Kuznetsov et al., “PmL Instrument Onboard Luna-25 Lander: Plasma–Dust Measurements in the Surface Exosphere”, Sol. Syst. Res. **55**, 576 (2021)].
26. С. И. Попель, Л. М. Зеленый, А. В. Захаров, И. А. Кузнецов, Г. Г. Дольников, А. Н. Ляш, И. А. Шашкова, А. А. Карташева, А. Е. Дубов, М. Е. Абделаал, Ю. С. Резниченко, “Окололунная пылевая плазма: основные физические процессы и экспериментальные данные, полученные в рамках миссии “Луна-25”, Физика плазмы **50**, 1222 (2024) [S. I. Popel, L. M. Zelenyi, A. V. Zakharov, I. A. Kuznetsov, G. G. Dol'nikov, A. N. Lyash, I. A. Shashkova, A. A. Kartasheva, A. E. Dubov, M. E. Abdelaal, and Yu. S. Reznichenko, “Circumlunar Dusty Plasma: Main Physical Processes and Experimental Data Obtained during the “Luna-25” Mission”, Plasma Phys. Rep. **50**, 1265 (2024)].
27. J. Blum, B. Gundlach, M. Krause et al. (Collaboration), “Evidence for the formation of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko through gravitational collapse of a bound clump of pebbles”, Mon. Not. R. Astron. Soc. **469**, S755 (2017).
28. F. Poulet, A. Lucchetti, J.-P. Bibring, J. Carter, B. Gondet, L. Jorda, Y. Langevin, C. Pilorget, C. Capanna, and G. Cremonese, “Origin of the local structures at the Philae landing site and possible implications on the formation and evolution of 67P/Churyumov–Gerasimenko”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **462**, S23 (2016).
29. M. S. Bentley, R. Schmied, Th. Mannel, K. Torkar, H. Jeszenszky, J. Romstedt, A.-C. Levasseur-Regourd, I. Weber, E. K. Jessberger, P. Ehrenfreund, Ch. Koeberl, and O. Havnes, “Aggregate dust particles at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko”, Nature **537**, 73 (2016).
30. C. Güttler, T. Mannel, A. Rotundi et al. (Collaboration), “Synthesis of the morphological description of cometary dust at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko”, Astron. Astrophys. **630**, A24 (2019).
31. K. A. Kretke and H. F. Levison, “Evidence for pebbles in comets”, Icarus **262**, 9 (2015).
32. E. Walbridge, “Lunar photoelectron layer”, J. Geophys. Res. **78**, 3668 (1973).
33. С. И. Попель, А. П. Голубь, Л. М. Зеленый, “К вопросу о плазменно-пылевых процессах в физике комет”, Письма в ЖЭТФ **120**, 317 (2024) [S. I. Popel, A. P. Golub', and L. M. Zelenyi, “On dusty plasma processes in the physics of comets”, JETP Lett. **120**, 307 (2024)].
34. V. Tenishev, M. R. Combi, and M. Rubin, “Numerical Simulation of Dust in a Cometary Coma: Application to Comet 67P / Churyumov–Gerasimenko”, Astrophys. J. **732**, 104 (2011).
35. T. A. Nordheim, G. H. Jones, J. S. Halekas, E. Roussos, and A. J. Coates, “Surface charging and electrostatic dust acceleration at the nucleus of comet 67P during periods of low activity”, Planet. Space Sci. **119**, 24 (2015).
36. E. Vigren, A. I. Eriksson, F. L. Johansson, R. Marschall, M. Morooka, and M. Rubin, “A Case for a Small to Negligible Influence of Dust Charging on the Ionization Balance in the Coma of Comet 67P”, Planet. Sci. J. **2**, 156 (2021).
37. E. Vigren, A. I. Eriksson, and S. Bergman, “On positively charged dust in the coma of comet 67P”, Mon. Not. R. Astron. Soc. **513**, 536 (2022).
38. J. He, B. Cui, C. Dong, L. Yang, D. Duan, C. Hou, Q. Zong, L. Zhang, S. D. Bale, W.-H. Ip, M. Pulupa, Y.-D. Jia, J. W. Bonnell, T. D. De Wit, K. Goetz, P. R. Harvey, R. J. MacDowall, and D. M. Malaspina, “The Encounter of the Parker Solar Probe and a

Comet-like Object Near the Sun: Model Predictions and Measurements", Astrophys. J. **910**, 7 (2021).

39. V. N. Tsytovich, G. E. Morfill, S. V. Vladimirov, and H. Thomas, *Elementary physics of complex plasmas* (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
40. Т. В. Лосева, С. И. Попель, А. П. Голубь, "Пылевые ионно-звуковые ударные волны в лабораторной, ионосферной и астрофизической плазме", Физика плазмы **46**, 1007 (2020) [T. V. Losseva, S. I. Popel, and A. P. Golub', "Dust Ion-Acoustic Shock Waves in Laboratory, Ionospheric, and Astrophysical Plasmas", Plasma Phys. Rep. **46**, 1089 (2020)].
41. С. И. Попель, А. П. Голубь, "К вопросу об аномальной диссипации в плазме запыленной экзосферы Луны", Письма в ЖЭТФ **115**, 629 (2022) [S. I. Popel and A. P. Golub', "On Anomalous Dissipation in the Plasma of the Dusty Lunar Exosphere", JETP Lett. **115**, 596 (2022)].
42. S. K. Mishra and A. Bhardwaj, "Photoelectron Sheath on Lunar Sunlit Regolith and Dust Levitation", Astrophys. J. **884**, 5 (2019).
43. S. Ichimaru, "Strongly coupled plasmas: high–density classical plasmas and degenerate electron liquids", Rev. Mod. Phys. **54**, 1017 (1982).
44. H. Ikezi, "Coulomb solid of small particles in plasmas", Phys. Fluids **29**, 1764 (1986).
45. S. Ogata and S. Ichimaru, "Critical examination of N dependence in the Monte Carlo calculations for a classical one-component plasma", Phys. Rev. A **36**, 5451 (1987).
46. S. Hamaguchi, R. T. Farouki, and D. H. E. Dubin, "Triple point of Yukawa systems", Phys. Rev. E **56**, 4671 (1997).
47. O. S. Vaulina and S. A. Khrapak, "Scaling law for the fluid-solid phase transition in Yukawa systems (dusty plasmas)", ЖЭТФ **117**, 326 (2000) [O. S. Vaulina and S. A. Khrapak, "Scaling law for the fluid-solid phase transition in Yukawa systems (dusty plasmas)", JETP **90**, 287 (2000)].
48. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, В. И. Молотков, О. Ф. Петров, "Пылевая плазма", УФН **174**, 495 (2004) [V. E. Fortov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, and O. F. Petrov, "Dusty Plasmas", Phys.-Uspekhi **47**, 447 (2004)].
49. K. Kremer, M. O. Robbins, and G. S. Grest, "Phase diagram of Yukawa systems: model for charge-stabilized colloids", Phys. Rev. Lett. **57**, 2694 (1986).
50. M. O. Robbins, K. Kremer, and G. S. Grest, "Phase diagram and dynamics of Yukawa systems", J. Chem. Phys. **88**, 3286 (1988).
51. M. J. Stevens and M. O. Robbins, "Melting of Yukawa systems: a test of phenomenological melting criteria", J. Chem. Phys. **98**, 2319 (1993).
52. S. I. Popel, A. P. Golub', A. I. Kassem, and L. M. Zelenyi, "Dust Dynamics in the Lunar Dusty Plasmas: Effects of Magnetic Fields and Dust Charge Variations", Phys. Plasmas **29**, 013701 (2022).
53. R. L. Newburn (Jr.) and H. Spinard, "Spectrometry of 25 comets – Post-Halley updates for 17 comets plus new observations for eight additional comets", Astron. J. **97**, 552 (1989).
54. P. D. Singh, A. A. de Almeida and W. F. Huebner, "Dust release rates and dust-to-gas mass ratios of eight comets", Astron. J. **104**, 848 (1992).
55. A. D. Storrs, A. L. Cochran, and E. S. Barker, "Spectrophotometry of the continuum in 18 comets", Icarus **98**, 163 (1992).
56. T. V. Losseva, A. P. Golub', I. B. Kosarev, S. I. Popel, and I. V. Nemtchinov, "Physical and Gasdynamical Processes Caused by Cometary Impacts onto the Sun", in: Proceedings of the Conference Asteroids, Comets, Meteors – ACM2002 (European Space Agency, 2002), p. 873.
57. О. П. Стояновская, Ф. А. Окладников, Э. И. Воробьев, Я. Н. Павлюченков, В. В. Акимкин, "Расчет динамики газопылевых околозвездных дисков: выход за пределы режима Эпштейна", Астрономический журнал **97**, 91 (2020) [O. P. Stoyanovskaya, F. A. Okladnikov, E. I. Vorobyov, Ya. N. Pavlyuchenkov, and V. V. Akimkin, "Simulations of Dynamical Gas-Dust Circumstellar Disks: Going Beyond the Epstein Regime", Astron. Rep. **64**, 107 (2020)].
58. Е. К. Колесников, А. С. Мануйлов, "Расчет напряженности электростатического поля над поверхностью Луны, покрытой монослоем водорода", Астрономический журнал **59**, 996 (1982) [E. K. Kolesnikov and A. S. Manuilov, "Raschet napryazhennosti electrostaticheskogo polia nad poverkhnostiyu Luny, pokrytoi monosloem vodoroda", Astron. Zh. **59**, 996 (1982)].
59. R. J. L. Grard and J. K. E. Tunaley, "Photoelectron sheath near a planetary probe in interplanetary space", J. Geophys. Res. **76**, 2498 (1971).
60. Е. К. Колесников, А. Б. Яковлев, "Условие электростатической левитации микрочастиц лунного реголита", Астрон. вестн. **31**, 70 (1997) [E. K. Kolesnikov and A. B. Yakovlev, "Condition for the electrostatic levitation of lunar regolith microparticles", Solar Syst. Res. **31**, 62 (1997)].
61. H. L. F. Houpis and D. A. Mendis, "On the Development and Global Oscillations of Cometary Ionospheres", Astrophys. J. **243**, 1088 (1981).
62. В. А. Дорофеева, "Химический и изотопный состав кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (Обзор результатов космической миссии Rosetta-Philae). Следствия для космогонии и космохимии", Астрон. вестн. **54**, 110 (2020) [V. A. Dorofeeva, "Chemical and Isotope Composition of Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko: The Rosetta–Philae Mission Results Reviewed in the Context of Cosmogony and Cosmochemistry", Sol. Syst. Res. **54**, 96 (2020)].

63. J. E. Colwell, S. R. Robertson, M. Horányi, X. Wang, A. Poppe, and P. Wheeler, "Lunar Dust Levitation", J. Aerosp. Eng. **22**, 2 (2009).
64. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, И. Т. Якубов, *Физика неидеальной плазмы* (Физматлит, М., 2004) [V. E. Fortov, A. G. Khrapak, and I. T. Yakubov, *Fizika neideal'noi plazmy* (Fizmatlit, Moscow, 2004)] [in Russian].
65. E. J. Meijer and D. Frenkel, "Melting line of Yukawa system by computer simulation", J. Chem. Phys. **94**, 2269 (1991).
66. О. С. Ваулина, С. А. Храпак, "Моделирование динамики сильновзаимодействующих макрочастиц в слабоионизованной плазме", ЖЭТФ **119**, 264 (2001) [O. S. Vaulina and S. A. Khrapak, "Simulation of the dynamics of strongly interacting macroparticles in a weakly ionized plasma", JETP **92**, 228 (2001)].
67. O. Vaulina, S. Khrapak, and G. Morfill, "Universal scaling in complex (dusty) plasmas", Phys. Rev. E. **66**, 016404 (2002).
68. D. Jewitt, "The Active Asteroids", Astron. J. **143**, 66 (2012).
69. M. Küppers, L. O'Rourke, D. Bockelée-Morvan, V. Zakharov, S. Lee, P. von Allmen, B. Carry, D. Teyssier, A. Marston, T. Müller, J. Crovisier, M. A. Barucci, and R. Moreno, "Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres", Nature **505**, 525 (2014).
70. C. O. Chandler, A. M. Curtis, M. Mommert, S. S. Sheppard, and C. A. Trujillo, "SAFARI: Searching asteroids for activity revealing indicators", Publ. Astron. Soc. Pac. **130**, 114502 (2018).
71. V. V. Busarev, E. V. Petrova, V. B. Puzin, S. I. Barabanov, M. P. Shcherbina, and S. Yu. Kuznetsov, "An Optically Thin and Thick Dust Exosphere of Active Asteroids: Spectral Signs and Possible Formation Mechanisms", Sol. Syst. Res. **58**, 315 (2024).
72. В. Е. Фортов, А. П. Нефедов, О. С. Ваулина, А. М. Липаев, В. И. Молотков, А. А. Самарян, В. П. Никитский, А. И. Иванов, С. Ф. Савин, А. В. Калмыков, А. Я. Соловьев, П. В. Виноградов, "Пылевая плазма, индуцированная солнечным излучением, в условиях микрогравитации: эксперимент на борту орбитальной станции "Мир"", ЖЭТФ **114**, 2004 (1998) [V. E. Fortov, A. P. Nefedov, O. S. Vaulina, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov, A. A. Samaryan, V. P. Nikitskii, A. I. Ivanov, S. F. Savin, A. V. Kalmykov, A. Ya. Solov'ev, and P. V. Vinogradov, "Dusty plasma induced by solar radiation under microgravitational conditions: An experiment on board the Mir orbiting space station", JETP **87**, 1087 (1998)].