

# НЕЛИНЕЙНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЫЛЕВЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В МАГНИТОСФЕРЕ САТУРНА

© 2025 г. Ю. Н. Извекова<sup>а,\*</sup>, С. И. Копнин<sup>а</sup>, Д. В. Шохрин<sup>б</sup>, С. И. Попель<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup> Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

\*e-mail: besedina\_un@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 21.12.2024 г.

Характерной особенностью магнитосферы Сатурна является присутствие электронов двух сортов, подчиняющихся каппа-распределениям, — горячих и холодных. Электроны, ионы магнитосферы и пылевые частицы, которые были обнаружены в рамках миссии Cassini, образуют плазменно-пылевую систему в магнитосфере Сатурна. Рассматриваются нелинейные периодические пылевые звуковые волны произвольной амплитуды, которые могут распространяться в запыленной магнитосфере Сатурна. Полученные результаты важны для интерпретации будущих космических наблюдений.

**Ключевые слова:** пылевая плазма, нелинейные пылевые звуковые волны, каппа-распределение, магнитосфера Сатурна

**DOI:** 10.31857/S0367292125010094, **EDN:** DXEOAP

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования пылевой плазмы в Солнечной системе в настоящее время представляют актуальность в связи с наличием накопленных в результате космических миссий данных, развитием теоретических моделей, позволяющих исследовать подобные системы, а также в свете планируемых исследований космического пространства. Пыль и пылевая плазма являются важными объектами исследования вблизи поверхности Луны, Меркурия, спутников Марса и других безатмосферных космических тел [1–13], в атмосферах и магнитосферах планет [14–22], планетарных кольцах, в хвостах комет [23–25] и межпланетном космическом пространстве. Плазма магнитосферы Сатурна исследовалась впервые в рамках миссий Voyager 1 и Voyager 2 в 1980-х гг. Тогда были получены свидетельства существования волн [26] в плазме магнитосферы Сатурна. Теоретические исследования ионно-звуковых волн в магнитосфере Сатурна проводились в работе [27]. В ходе миссии Cassini [28, 29] была обнаружена пылевая плазма в системе Сатурна в окрестности его спутника Энцелада. Исследования в рамках этой миссии указали также на возможную причину ее появления — космический аппарат Cassini обнаружил фонтаны частиц пыли и небольших частиц водяного льда (которые также могут трактоваться как пылевые части-

цы) высотой во многие сотни километров, бьющие из четырех трещин в районе южного полюса Энцелада [30]. Было также обнаружено [26, 31, 32], что в магнитосфере Сатурна одновременно присутствуют два типа электронов — горячие и холодные, причем распределения электронов описываются каппа-распределениями [32].

Каппа-распределения типичны для магнитосфер планет. В бесстолкновительной магнитосферной плазме релаксация формирующихся в результате ускорения и переноса функций распределения частиц приводит первоначально к каппа-распределениям и значительно позже к близким к максвелловским распределениям частиц (см., например, [33]). Формирование каппа-распределений обусловлено существованием далекодействующих корреляций в бесстолкновительной магнитосферной плазме и действием процессов турбулентного ускорения и турбулентного переноса частиц.

В пылевой плазме с параметрами, соответствующими условиям в магнитосфере Сатурна, могут существовать нелинейные волны, в первую очередь пылевые звуковые волны. Ранее была продемонстрирована возможность существования в этой системе уединенных нелинейных пылевых звуковых волн — солитонов [14]. Было показано [17], что в условиях магнитосферы Сатурна существуют ре-

шения уравнения Захарова–Кузнецова, описывающие одномерные и трехмерные солитоны, также было проведено двумерное описание запыленной плазмы магнитосферы Сатурна [15], в результате чего были получены решения уравнения Кадомцева–Петвиашвили в виде одномерных солитонов и двумерных  $N$ -солитонов. В данной работе предлагается рассмотрение нелинейных периодических пылевых звуковых волн, при этом учитывается наличие двух типов электронов. Рассмотрение проводится для произвольных амплитуд нелинейных волн, что важно с точки зрения возможности интерпретации данных, которые могут быть получены в будущих миссиях.

## 2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Запишем основные уравнения для нелинейных периодических пылевых звуковых волн в магнитосфере Сатурна. Будем рассматривать одномерные возмущения вдоль координаты  $x$ . Пылевые звуковые нелинейные волны описываются системой уравнений [14], состоящей из уравнения Пуассона для потенциала и уравнений, задающих концентрации плазменных компонент. Запишем уравнение Пуассона в виде

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 4\pi e (n_e - n_i - n_d Z_d), \quad (1)$$

где  $\varphi$  — самосогласованный потенциал в плазме,  $d_{d(i,e)}$  — концентрации пылевых частиц (ионов, электронов),  $-e$  — заряд электрона,  $Z_d$  — заряд пылевой частицы, выраженный в количестве электронов. Поскольку в магнитосфере Сатурна пыль можно считать незамагниченной, для описания ее динамики можно использовать уравнения непрерывности и Эйлера, представленные в следующем виде:

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \frac{\partial (n_d v_d)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_d}{\partial t} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial x} = -\frac{e Z_d}{m_d} \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $v_d$  — направленная скорость пылевой частицы,  $m_d$  — масса пылевой частицы.

На пылевых звуковых масштабах успевают установиться распределения электронов и ионов. Ионы подчиняются распределению Больцмана

$$n_i = n_{i0} e^{-e\varphi/T_i}, \quad (4)$$

где  $i$  — температура ионов, выраженная в энергетических единицах, а индексом “0” здесь и далее будем обозначать невозмущенные состояния. Необходимо учесть, что в плазме магнитосферы Сатурна существуют два типа электронов — холодные с концентрацией  $n_{e,c}$  и горячие с концентрацией  $n_{e,h}$ , причем

$$n_e = n_{e,c} + n_{e,h}. \quad (5)$$

Электроны обоих типов подчиняются каппа-распределениям [34]

$$n_{e,c} = n_{e,c0} \left( 1 - \frac{1}{\kappa_c - 3/2} \frac{e\varphi}{T_{ec}} \right)^{-\kappa_c + 1/2}, \quad (6)$$

$$n_{e,h} = n_{e,h0} \left( 1 - \frac{1}{\kappa_h - 3/2} \frac{e\varphi}{T_{eh}} \right)^{-\kappa_h + 1/2}, \quad (7)$$

где  $T_{ec(h)}$  — температура холодных (горячих) электронов, выраженная в энергетических единицах,  $\kappa_{c(h)}$  — параметр каппа-распределения холодных (горячих) электронов, причем  $\kappa_{c(h)} > 3/2$ .

Условие квазинейтральности для невозмущенных значений концентраций имеет вид

$$n_{i0} + Z_d n_{d0} = n_{e,c0} + n_{e,h0} = n_{e0}. \quad (8)$$

Введем для удобства коэффициент соотношения между концентрациями холодных и горячих электронов  $\alpha$ . Тогда имеем

$$\begin{aligned} n_{e,c0} &= \alpha (n_{i0} + Z_d n_{d0}), \\ n_{e,h0} &= (1 - \alpha) (n_{i0} + Z_d n_{d0}). \end{aligned} \quad (9)$$

Характерные временные масштабы пылевых звуковых волн существенно превышают характерное время изменения заряда пылевых частиц [35], т. е. пылевые звуковые волны достаточно медленные и заряды пылевых частиц успевают подстраиваться под параметры плазмы. Далее, для простоты рассматриваем области в магнитосфере Сатурна, в которых фототок пренебрежимо мал по сравнению с каким-либо из микроскопических токов электронов и ионов на пылевую частицу, что легко реализуется, например, в областях магнитосферы, затененных от солнечного излучения Сатурном. Таким образом, заряды пылевых частиц могут быть определены из баланса токов электронов и ионов на поверхность частицы

$$I_e(Z_d) + I_i(Z_d) = 0. \quad (10)$$

Микроскопические токи холодных (горячих) электронов на поверхность пылевой частицы определяются выражением [36]

$$\begin{aligned} I_{e,c(h)}(Z_d) &= 2\sqrt{\pi} a^2 e n_{e0,c(h)} \frac{(\kappa_{c(h)} - 3/2)^{1/2}}{k_{c(h)} (\kappa_{c(h)} - 1)} \times \\ &\times \frac{\Gamma(\kappa_{c(h)} + 1)}{\Gamma(\kappa_{c(h)} - 1/2)} \sqrt{\frac{T_{e,c(h)}}{m_e}} \times \\ &\times \left( 1 - \frac{1}{\kappa_{c(h)} - 3/2} \frac{e^2 Z_d}{a T_{e,c(h)}} \right)^{-\kappa_{c(h)} + 1}, \end{aligned} \quad (11)$$

а ток ионов равен [32]

$$I_i(Z_d) = 4\pi a^2 e n_{i0} \sqrt{\frac{T_i}{2\pi m_i}} \left( 1 - \frac{e^2 Z_d}{a T_i} \right), \quad (12)$$

где  $a$  — размер пылевой частицы,  $m_{e(i)}$  — масса электрона (иона),  $\Gamma(\kappa_{c(h)})$  — гамма-функция.

В результате самосогласованного решения системы (10)–(12) при заданном значении  $n_{i0}$  получим значения зарядовых чисел пылевых частиц  $Z_d$  и концентраций электронов  $n_{e0}$ . На рис. 1 представлены зависимости зарядовых чисел пылевых частиц и концентраций электронов от размеров пыли для различных концентраций пылевых частиц.

### 3. НЕЛИНЕЙНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

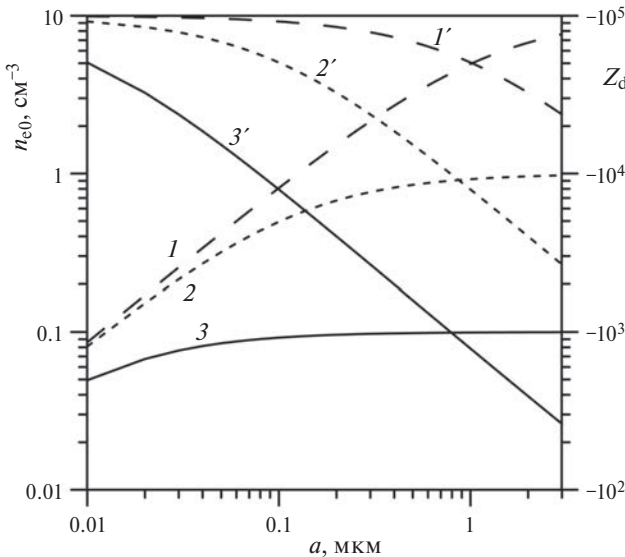
Полученную систему (1)–(7) будем решать с использованием метода сагдеевского потенциала. При этом для получения волны, движущейся с постоянной скоростью, перейдем в систему отсчета, движущуюся в положительном направлении вдоль оси  $OX$  со скоростью  $M$ :  $\xi = x - Mt$ . Решение системы будем искать в безразмерном виде, используя следующие безразмерные величины:

$$\frac{e\varphi}{T_i} \rightarrow \varphi, \quad \frac{M}{C_{sd}} \rightarrow M, \quad \frac{\xi}{\lambda_{Di}} \rightarrow \xi,$$

$$C_{sd} = \sqrt{\frac{T_i}{m_d}}, \quad \lambda_{Di} = \sqrt{\frac{T_i}{4\pi n_{i0} e^2}}.$$

Для поиска нелинейных пылевых звуковых волн в пылевой плазме в магнитосфере Сатурна систему уравнений (1)–(7) в безразмерных переменных можно представить в виде

$$\frac{1}{2} \left( \frac{d\varphi}{d\xi} \right)^2 + V(\varphi) = E, \quad (13)$$



**Рис. 1.** Зависимость зарядовых чисел  $Z_d$  (кривые 1–3) и концентраций электронов  $n_{e0}$  (кривые 1'–3') от размера частицы  $a_{d0}$ , полученные при разных значениях концентрации пылевых частиц  $n_{d0}$ : кривым 1, 1' соответствует  $n_{d0} = 10^{-4} \text{ см}^{-3}$ , кривым 2, 2' соответствует  $n_{d0} = 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ , кривым 3, 3' соответствует  $n_{d0} = 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ . Расчеты проводились при  $T_i = 100 \text{ К}$ ,  $T_{ec} = 10 \text{ эВ}$ ,  $T_{eh} = 100 \text{ эВ}$ ,  $\alpha = 1/2$ ,  $\kappa_c = \kappa_h = 2$ . Концентрация электронов в отсутствие пыли составляла  $10 \text{ см}^{-3}$ . Концентрация ионов удовлетворяла условию квазинейтральности плазмы.

$$V(\varphi) = 1 - e^{-\varphi} + \alpha (1 + Z_d d) \tau_c \times$$

$$\times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{\kappa_c - 1.5 \tau_c} \varphi \right)^{-\kappa_c + 3/2} \right] +$$

$$+ (1 - \alpha) (1 + Z_d d) \tau_h \times$$

$$\times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{\kappa_h - 1.5 \tau_h} \varphi \right)^{-\kappa_h + 3/2} \right] +$$

$$+ dM \left( M - \sqrt{M^2 - 2Z_d \varphi} \right), \quad (14)$$

где  $d = n_{d0}/N_{e0}$ ,  $\tau_{c(h)} = T_{ec(h)}/T_i$ ,  $V(\varphi)$  — сагдеевский потенциал, а  $E$  — некоторая константа. В частности, принимая  $E = 0$ , получим решение в виде уединенных волн. Для существования нелинейных пылевых звуковых структур необходимо, чтобы сагдеевский потенциал имел локальный максимум при  $\varphi = 0$ . В нашем случае это условие выполняется, если

$$M \geq \left[ dZ_d^2 \left( 1 + \frac{(1 - \alpha)(1 + Z_d d) \kappa_h - 0.5}{\tau_h \kappa_h - 1.5} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\alpha(1 + Z_d d) \kappa_c - 0.5}{\tau_c \kappa_c - 1.5} \right)^{-1} \right]^{1/2}. \quad (15)$$

Форма сагдеевского потенциала показана на рис. 2а, в,  $V_{\min}$  — глубина потенциальной ямы, образованной сагдеевским потенциалом. Для нахождения решения в виде нелинейной периодической волны  $\varphi(\xi)$  необходимо проинтегрировать выражение, следующее из (13), (14):

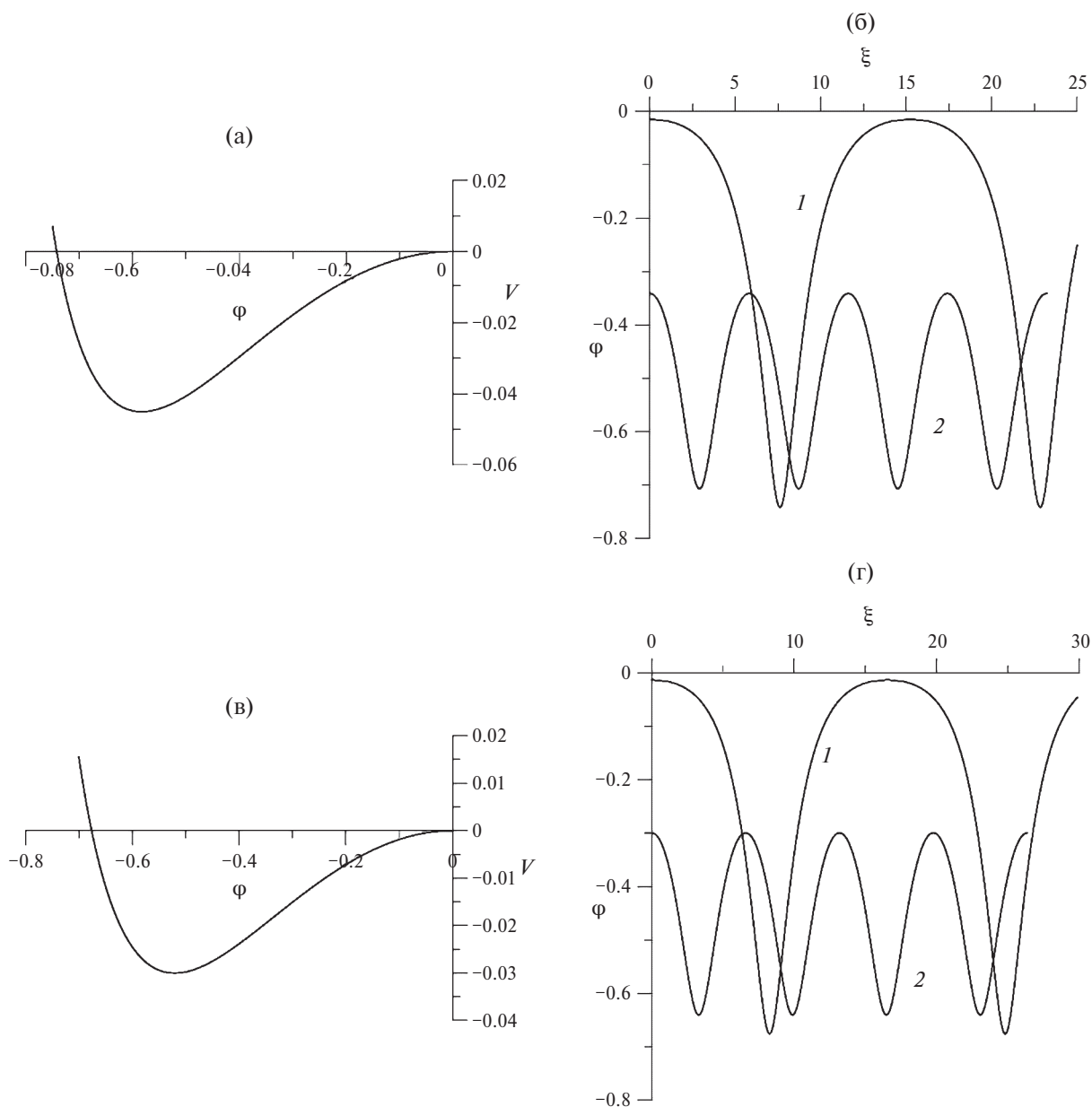
$$\xi(\varphi) - \xi(\varphi_{\min}) = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi} \frac{d\Phi}{2(E - V(\Phi))}, \quad (16)$$

при этом  $\varphi$  пробегает значения от  $\varphi_{\min}$  до  $\varphi_{\max}$ , где  $\varphi_{\min}$  и  $\varphi_{\max}$  — значения электростатического потенциала, соответствующие точкам пересечения функции  $V(\varphi)$  с горизонтальной прямой  $V = E$ .

Для вычислений будем использовать следующие параметры:  $T_i = 100 \text{ К}$ ,  $T_{ec} = 10 \text{ эВ}$ ,  $T_{eh} = 700 \text{ эВ}$ ,  $\alpha = 1/2$ ,  $\kappa_h = \kappa_c = 2$  [27, 31, 32]. При этом предполагается, что концентрация электронов в отсутствие пыли составляет  $10 \text{ см}^{-3}$ , а концентрация ионов удовлетворяет условию квазинейтральности плазмы.

На рис. 2 расчеты проведены для  $n_{d0} = 10^{-2} \text{ см}^{-3}$  и  $M = 40$ . На рис. 2а, в представлены сагдеевские потенциалы  $V(\varphi)$ , а на рис. 2б, г — нелинейные периодические волны  $\varphi(\xi)$ . Рис. 2а, б соответствуют размерам частиц  $0.2 \text{ мкм}$ , рис. 2в, г соответствуют размерам частиц  $2 \text{ мкм}$ . Нелинейные волны 1 (б, г) получены для значений  $E = 10^{-3} V_{\min}$ , а нелинейные волны 2 (б, г) соответствуют значениям  $E = V_{\min}/2$ .

На рис. 3а, в представлены сагдеевские потенциалы  $V(\varphi)$  и на рис. 3б, г — нелинейные периодические волны  $\varphi(\xi)$  для концентрации пылевых частиц  $n_{d0} = 10^{-3} \text{ см}^{-3}$  и  $M = 100$ . При этом рис. 3а, б соответствуют размерам частиц  $0.2 \text{ мкм}$ , рис. 3в, г



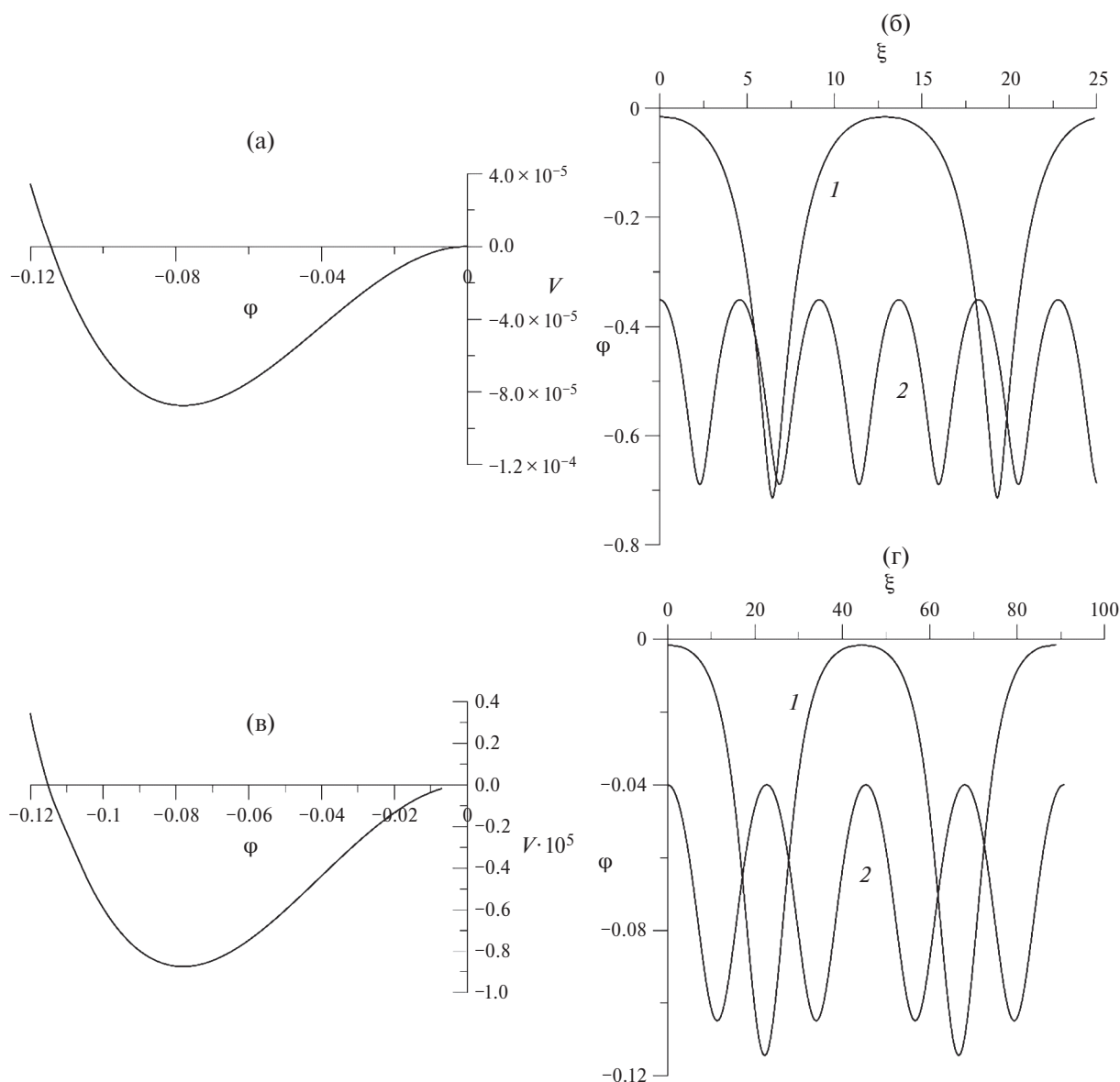
**Рис. 2.** Сагдеевские потенциалы  $V(\phi)$  (а, в) и нелинейные периодические волны  $\phi(\xi)$  (б, г) для концентрации пылевых частиц  $n_{d0} = 10^{-2} \text{ см}^{-3}$  и  $M = 40$ . При этом (а, б) соответствуют размерам частиц 0.2 мкм, (в, г) соответствуют размерам частиц 2 мкм. Нелинейные волны 1 (б, г) получены для значений  $E = 10^{-3} V_{\min}$ , а нелинейные волны 2 (б, г) соответствуют значениям  $E = V_{\min}/2$ .

соответствуют размерам частиц 2 мкм. Нелинейные волны 1 (2) на рис. 3б, г получены для значений  $E = 10^{-3} V_{\min}$ , ( $E = V_{\min}/2$ ).

На рис. 4а, в представлены сагдеевские потенциалы  $V(\phi)$  и на рис. 4б, г — нелинейные периодические волны  $\phi(\xi)$  для концентрации пылевых частиц  $n_{d0} = 10^{-4} \text{ см}^{-3}$ . При этом рис. 3а, б соответствуют размерам частиц 0.2 мкм и  $M = 60$ , рис. 3в, г соответствуют размерам частиц 2 мкм и  $M = 300$ . Нелинейные волны 1, 2 (б, г) получены для значений  $E = 10^{-3} V_{\min}$  ( $E = V_{\min}/2$ ).

Как видно из рис. 2–4, изменение свободного параметра  $E$  позволяет изменять период и ам-

плитуду нелинейных периодических пылевых звуковых волн, с уменьшением  $E$  увеличивается период и амплитуда нелинейной волны. Характерный период нелинейных периодических волн при этом пробегает значения от нескольких величин  $\lambda_{D_i}$  (десятки сантиметров) до существенно больших значений, соответствующих очень малым величинам  $E$ . Аналогичная ситуация в атмосфере Земли была рассмотрена ранее [18], при этом обсуждались возможные проявления нелинейных периодических волн, доступные наблюдателю на поверхности Земли. Рассмотрение пылевых звуковых волн в магнитосфере Сатурна проведено для случая, когда фотоэффект несущественен и пыле-



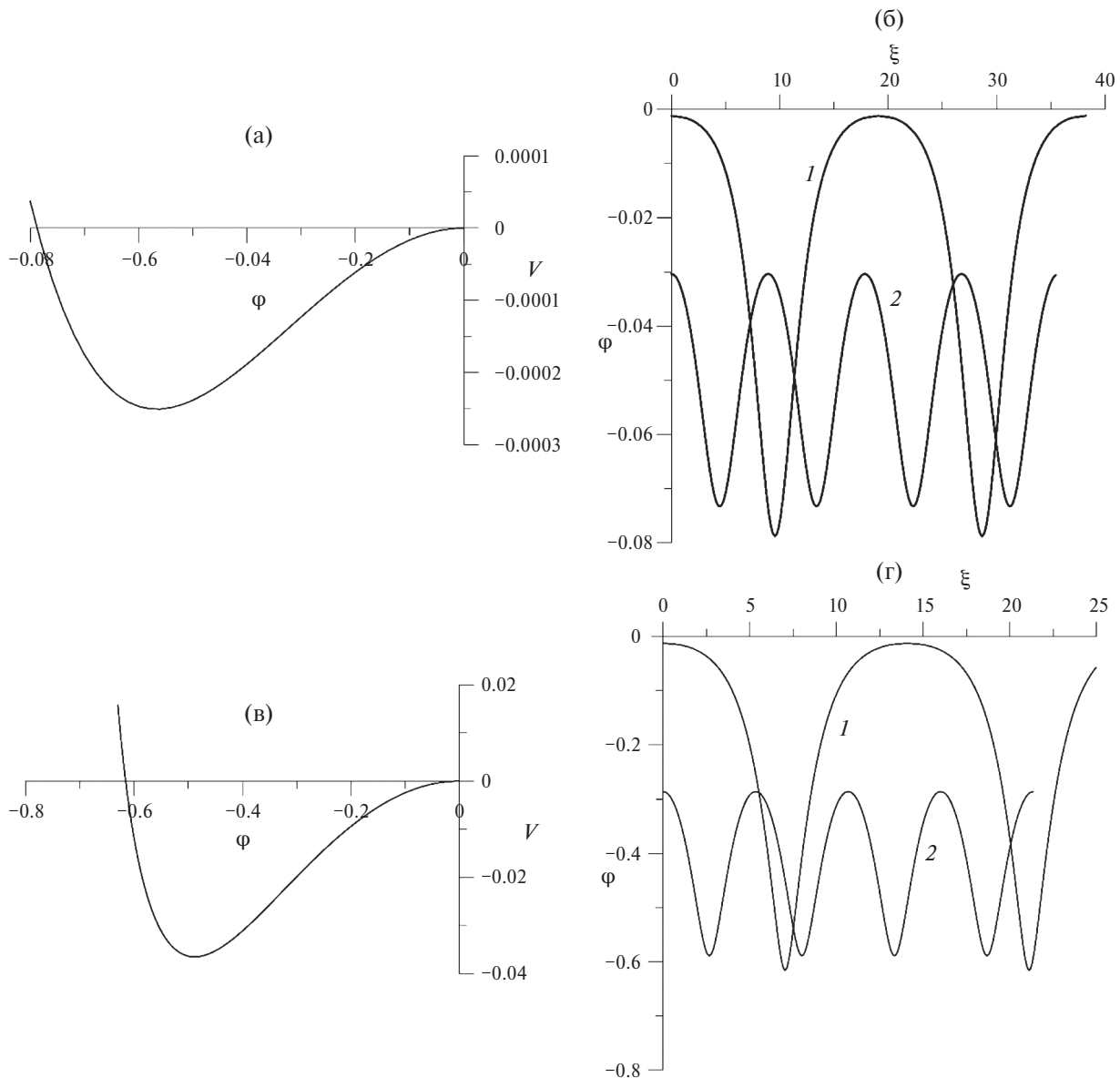
**Рис. 3.** Сагдеевские потенциалы  $V(\varphi)$  (а, в) и нелинейные периодические волны  $\varphi(\xi)$  (б, г) для концентрации пылевых частиц  $n_{d0} = 10^{-3} \text{ см}^{-3}$  и  $M = 100$ . При этом (а, б) соответствуют размерам частиц 0.2 мкм, (в, г) соответствуют размерам частиц 2 мкм. Нелинейные волны 1 (б, г) получены для значений  $E = 10^{-3} V_{\min}$ , а нелинейные волны 2 (б, г) соответствуют значениям  $E = V_{\min}/2$ .

вые частицы приобретают отрицательные заряды за счет большей подвижности электронов, нежели ионов. Таким образом, во всей области определения амплитуды электростатического потенциала нелинейных периодических пылевых звуковых волн в магнитосфере Сатурна оказываются отрицательными. При этом их абсолютные значения могут достигать значений порядка  $T_i/e$  (порядка  $10^{-3}$  ед. СГСЭ), что указывает на возможность наблюдения данных волновых структур в будущих космических миссиях.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность распространения нелинейных периодических пылевых звуковых волн в запыленной плазме магнитосферы

Сатурна, которая включает в себя горячие и холодные электроны, ионы магнитосферы и заряженные пылевые частицы. Амплитуды нелинейных пылевых звуковых волн достигают достаточно больших значений и находятся в области отрицательных потенциалов. Для того чтобы можно было обеспечить возможность наблюдения нелинейных периодических пылевых звуковых волн в магнитосфере Сатурна в будущих космических миссиях, необходимо оснастить космический аппарат приборами, позволяющими с высокой точностью измерять электрические поля. Примером может послужить аппаратура, размещенная на космическом аппарате “Фрея” [37], с помощью которой были проведены наблюдения нижнегибридных солитонов в магнитосфере Земли.



**Рис. 4.** Сагдеевские потенциалы  $V(\phi)$  (а, в) и нелинейные периодические волны  $\phi(\xi)$  (б, г) для концентрации пылевых частиц  $n_{d0} = 10^{-4} \text{ см}^{-3}$ . При этом (а, б) соответствуют размерам частиц  $0.2 \text{ мкм}$  и  $M = 60$ , (в, г) соответствуют размерам частиц  $2 \text{ мкм}$  и  $M = 300$ . Нелинейные волны 1 (б, г) получены для значений  $E = 10^{-3} V_{\min}$ , а нелинейные волны 2 (б, г) соответствуют значениям  $E = V_{\min}/2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Долгиков Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. Р. 455.
2. Голубь А.П., Попель С.И. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 741.
3. Извекова Ю.Н., Попель С.И., Голубь А.П. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 695.
4. Извекова Ю.Н., Попель С.И., Голубь А.П. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1010.
5. Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н. // Физика плазмы. 2024. Т. 50. С. 220.
6. Berg O.E., Richardson F.F., Burton H. // Apollo 17 preliminary science report. NASA Spec. Publ. 16-1–16-9. SP-330. 1973.
7. Berg O.E., Wolf H., Rhee J. // Interplanetary Dust and Zodiacal Light / Eds. H. Elsässer, H. Fechtig. New York: Springer. 1976. P. 233.
8. Cain J.R. // Earth, Moon, and Planets. 2010. V. 107. P. 107.
9. Horanyi M., Sternovsky Z., Lankton M., Dumont C., Gagnard S., Gathright D., Grün E., Hansen D., James D., Kempf S., Lamprecht B., Srama R., Szalay J.R., Wright G. // Space Sci. Rev. 2014. V. 185. P. 93.
10. Horanyi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z. // Nature. 2015. V. 522. P. 324.
11. Sternovsky Z., Chamberlin P., Horanyi M., Robertson S., Wang X.J. // Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A10104.

12. *Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M.* // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37 (1). P. 59.
13. *Stubbs T.J., Glenar D.A., Farrell W.M., Vondrak R.R., Collier M.R., Halekas J.S., Delory G.T.* // *Planet. Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1659.
14. *Копнин С.И., Шохрин Д.В., Попель С.И.* // *Физика плазмы.* 2022. Т. 48. С. 163.
15. *Копнин С.И., Шохрин Д.В., Попель С.И.* // *Физика плазмы.* 2023. Т. 49. С. 582.
16. *Shokhrin D.V., Kopnin S.I., Popel S.I.* // *Plasma Phys. Rep.* 2024. V. 50. P. 1296.
17. *Копнин С.И., Шохрин Д.В., Попель С.И.* // *Физика плазмы.* 2024. Т. 50. С. 51.
18. *Izvekova Yu.N., Popel S.I., Morozova T.I., Kopnin S.I.* // *Plasma Phys. Rep.* 2024. V. 50. P. 1288.
19. *Извекова Ю.Н., Попель С.И.* // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. С. 1010.
20. *Fedorova A.A., Montmessin F., Rodin A.V., Korablev O.I., Määttänen A., Maltagliati L., Bertaux J.L.* // *Icarus.* 2014. V. 231. P. 239.
21. *Rapp M., Lübken F.J.* // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4 (11/12). P. 2601.
22. *Turco R.P., Toon O.B., Whitten R.C., Keesee R.G., Hollenbach D.* // *Planet. Space Sci.* 1982. V. 30 (11). P. 1147.
23. *Agarwal J., A'Hearn M.F., Vincent J.-B., Guttler C., Hofner S., Sierks H., Tubiana C., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Barucci M.A., Bertaux J.-L., Bertini I., Boudreault S., Cremonese G., Da Deppo V., Davidsson B., Debei S., De Cecco M., Deller J., Fornasier S., Fulle M., Gicquel A., Groussin O., Gutiérrez P.J., Hofmann M., Hviid S.F., Ip W.-H., Jorda L., Keller H.U., Knollenberg J., Kramm J.-R., Kührt E., Küppers M., Lara L.M., Lazzarin M., Lopez Moreno J.J., Marzari F., Naletto G., Oklay N., Shi X., Thomas N.* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. S78.
24. *Della Corte V., Rotundi A., Fulle M., Gruen E., Weissman P., Sordini R., Ferrari M., Ivanovski S., Lucarelli F., Accolla M., Zakharov V., Mazzotta Epifani E., Lopez-Moreno J.J., Rodriguez J., Colanageli L., Palumbo P., Bussoletti E., Crifo J.F., Esposito F., Green S.F., Lamy P.L., McDonnell J.A.M., Mennella V., Molina A., Morales R., Moreno F., Ortiz J.L., Palomba E., Perrin J.M., Rietmeijer F.J.M., Rodrigo R., Zarnecki J.C., Cosi M., Giovane F., Gustafson B., Herranz M.L., Jeronimo J.M., Leese M.R., Lopez-Jimenez A.C., Altobelli N.* // *Astron. Astrophys.* 2015. V. 583. P. 583.
25. *Gulkis S., Frerking M., Crovisier J., Beaudin G., Hartogh P., Encrenaz P., Koch T., Kahn C., Salinas Y., Nowicki R., Irigoyen R., Janssen M., Stek P., Hofstadter M., Allen M., Backus C., Kamp L., Jarchow C., Steinmetz E., Deschamps A., Krieg J., Gheudin M., Bockelée-Morvan D., Biver N., Encrenaz T., Despois D., Ip W., Lellouch E., Mann I., Muhleman D., Rauer H., Schloerb P., Spilker T.* // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 128. P. 561.
26. *Barbosa D.D., Kurth W.S.* // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 9351.
27. *Koen E.J., Collier A.B., Maharaj S.K., Hellberg M.A.* // *Phys. Plasmas.* 2014. V. 21. P. 072122.
28. *Wahlund J.-E., Andre M., Eriksson A.I.E., Lundberg M., Morooka M.W., Shafiq M., Averkamp T.F., Gurnett D.A., Hospodarsky G.B., Kurth W.S., Jacobsen K.S., Pedersen A., Farrell W., Ratynskaia S., Piskunov N.* // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. P. 1795.
29. *Yaroshenko V.V., Ratynskaia S., Olson J., Brenning N., Wahlund J.-E., Morooka M., Kurth W.S., Gurnett D.A., Morfill G.E.* // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. P. 1807.
30. *Yeager A.* // *Nature.* 2008. <https://doi.org/10.1038/news.2008.1254>
31. *Sittler Jr. E.C., Ogilvie K.W., Scudde J.D.* // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 8847.
32. *Schippers P., Blanc M., Andre N., Dandouras I., Lewis G.R., Gilbert L.K., Persoon A.M., Krupp N., Gurnett D.A., Coates A.J., Krimigis S.M., Young D.T., Dougherty M.K.* // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A07208.
33. *Kirpichev I.P., Antonova E.E., Stepanova M.V., Eyelade A.V., Espinoza C.M., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I.* // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. V. 126 (10). P. e2021JA029409.
34. *Banerjee G., Maitra S.* // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. P. 043708.
35. *Popel S.I., Kopnin S.I., Kosarev I.N., Yu M.Y.* // *Adv. Space Research.* 2006. V. 37. P. 414.
36. *Rubab N., Murtaza G.* // *Physica Scripta.* 2006. V. 73. P. 178.
37. *Попель С.И.* // *Физика плазмы.* 2001. Т. 27. С. 475.

## NONLINEAR PERIODIC DUST ACOUSTIC WAVES IN THE MAGNETOSPHERE OF SATURN

Yu. N. Izvekova<sup>a,\*</sup>, S. I. Kopnin<sup>a</sup>, D. V. Shokhrin<sup>b</sup>, and S. I. Popel<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

<sup>b</sup>*National Research University "Higher School of Economics", Moscow, 101000 Russia*

\*e-mail: besedina\_yn@mail.ru

A characteristic feature of the magnetosphere of Saturn is the presence of two types of electrons, hot and cold ones, which obey kappa distributions. Electrons, magnetospheric ions, and dust particles, which have been discovered within the Cassini mission, form a dusty plasma system in the magnetosphere of Saturn. Nonlinear periodic dust acoustic waves of arbitrary amplitude, which can propagate in the dusty magnetosphere of Saturn, are considered. The obtained results are important for the interpretation of future space observations.

**Keywords:** dusty plasma, nonlinear dust acoustic waves, kappa distribution, magnetosphere of Saturn