

# О пылевых звуковых возмущениях ионосферы Марса

*Ю.С. Резниченко (1,2), А.Ю. Дубинский (1),  
Ю.Н. Извекова (1),  
С.И. Попель (1)*

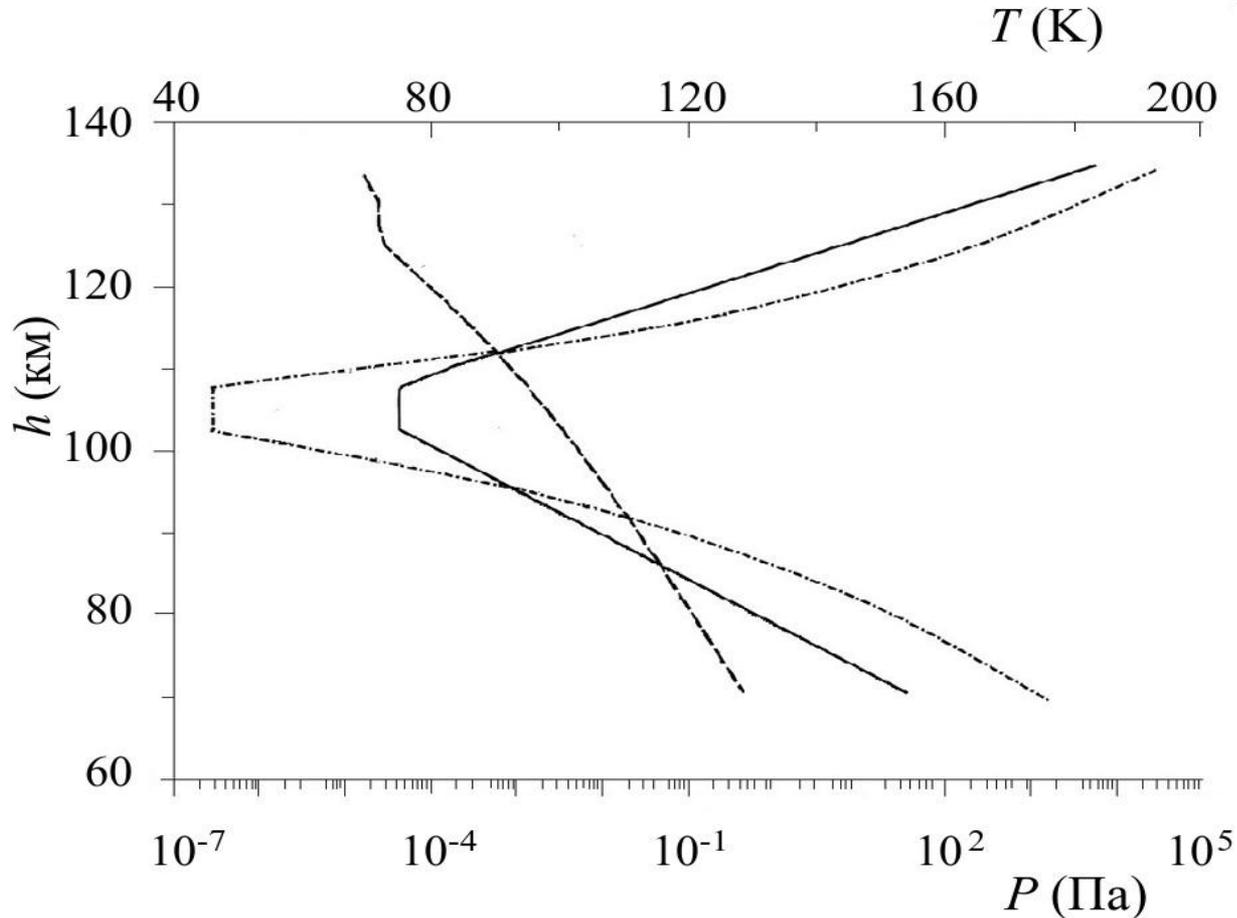
*(1) ИКИ РАН, Москва, Россия*

*(2) МФТИ (НИУ), Долгопрудный, Россия*



Фотография марсианских пылевых облаков, сделанная аппаратом Mars Science Laboratory Curiosity в марте 2021 года. Облака расположены на высотах больших 60 км и состоят, судя по всему, из частиц сухого льда. Фотосъемка проводилась на закате.

# Условия марсианской ионосферы



Качественные высотные профили температуры нейтрального газа атмосферы (сплошная кривая), парциального давления паров углекислого газа (штриховая кривая) и давления насыщенных паров углекислого газа (штрихпунктирная кривая). Пары углекислого газа пересыщены в диапазоне высот 92–112 км.



# Теоретическая модель

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_{cd} \pi a^2 m_{cd} v_{cd}^{th} (n_{cd} - n_{cd}^s)$$

$$\frac{dv}{dt} = (mg - F_f + F_r) \frac{1}{m} = g - \frac{F_f}{m} + \frac{F_r}{m}$$

$$F_f = \pi \rho C_S a^2 F_d v$$

$$F_r = u_{rel} \frac{dm}{dt}$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = q_e - \alpha_{rec} n_e n_i - L_{dust}^i$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q_e - \alpha_{rec} n_e n_i + L_{photo}^e - L_{dust}^e$$

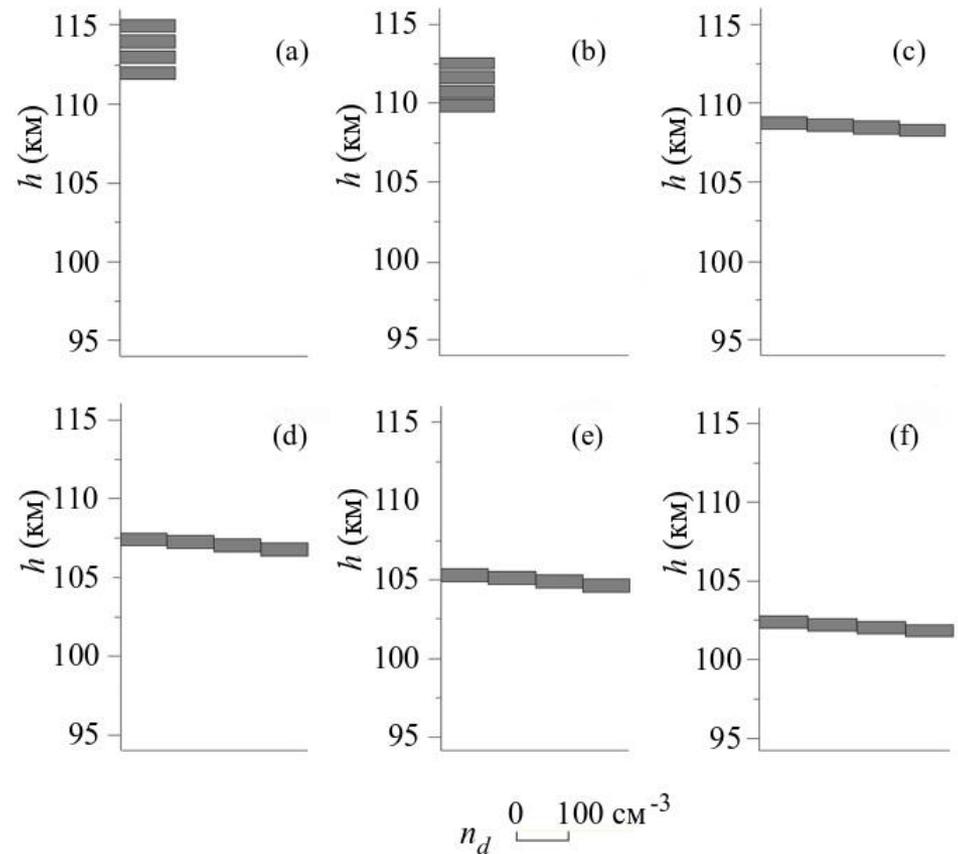
$$\frac{\partial Z_d^a}{\partial t} = q_{photo} + \nu_i - \nu_e$$

Теоретическая модель включает в себя уравнения, описывающие седиментацию и зарядку пылевых частиц, а также их рост в пересыщенных парах углекислого газа. Учитываются особенности, важные для марсианской ионосферы, но не включаемые в рассмотрение при описании плазменно-пылевой системы в ионосфере Земли. В частности, модель учитывает эффекты торможения пылевых частиц за счет налипания на них молекул конденсата.



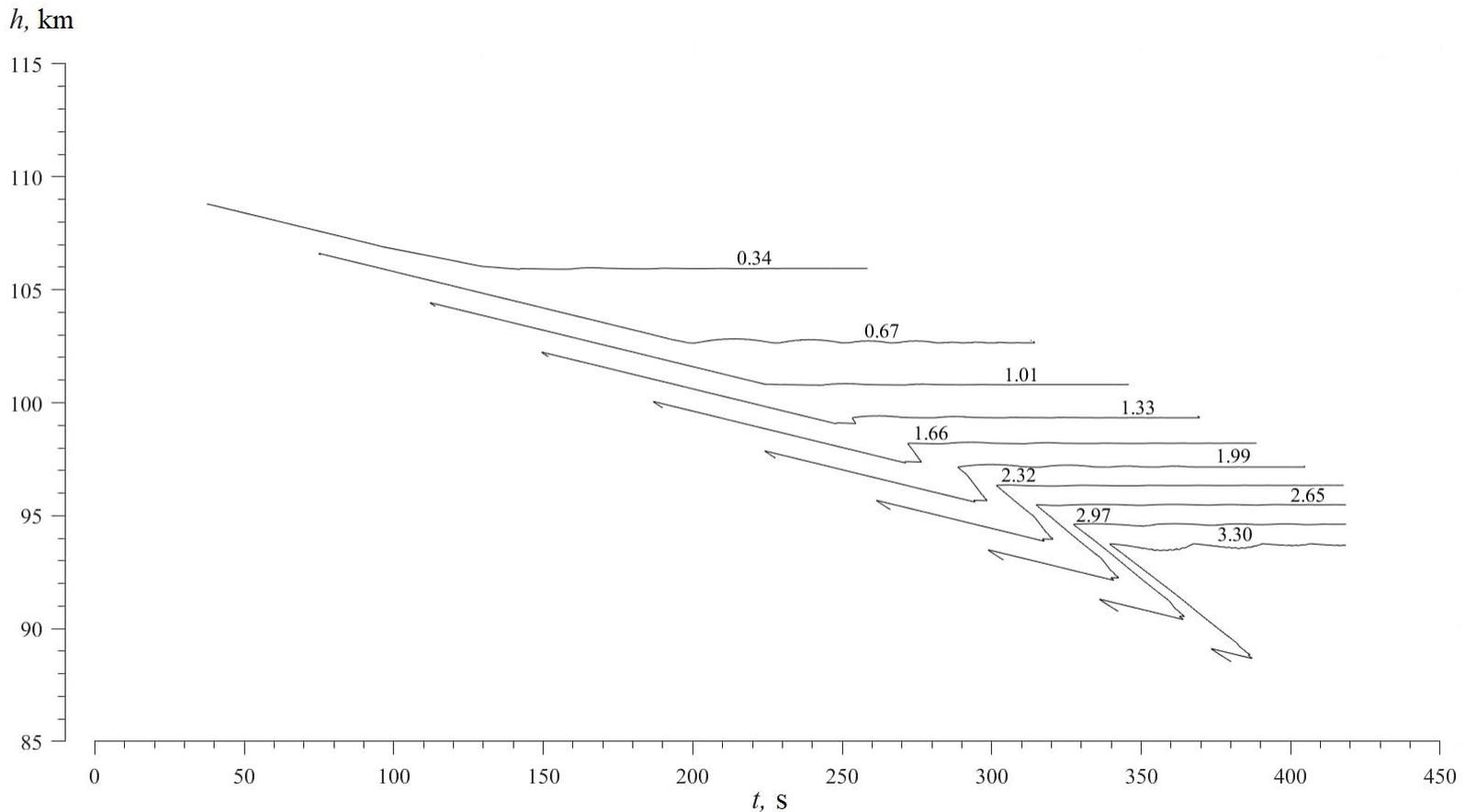
# Седиментация частиц конденсата (I)

Эволюция пылевых слоев, составляющих начальный модельный прямоугольный профиль концентраций ( $t = 0$  (a), 40 (b), 120 (c), 200 (d), 240 (e), 280 с (f)). Во время седиментации пылевые слои перекрываются. Первоначально перекрываются два нижних слоя (b), позже перекрываются все слои (c) – (f). Поскольку перекрытие слоев от (c) до (f) оказывается значительным, столбцы, характеризующие слои, расширяются вдоль оси абсцисс.





# Седиментация частиц конденсата (II)



Высотное распределение пылевых частиц марсианских мезосферных облаков, формирующихся вследствие седиментации пылевого облака зародышей, первоначально составляющего модельный прямоугольный профиль концентраций на высотах 110–120 км. Начальный размер пылевых частиц облака равен 10 нм. Цифры над кривыми обозначают размеры частиц в микрометрах.



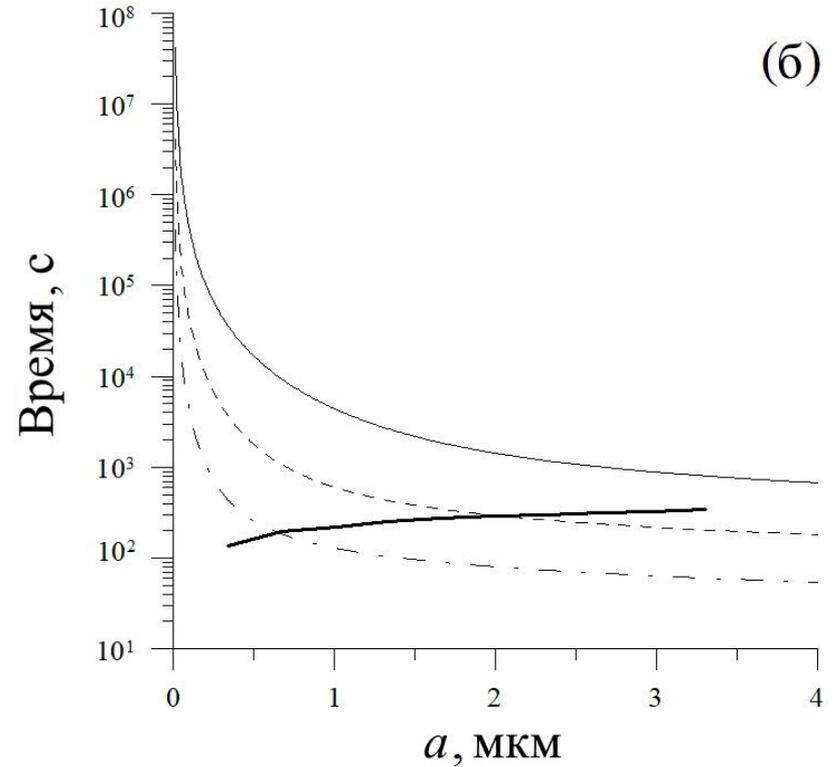
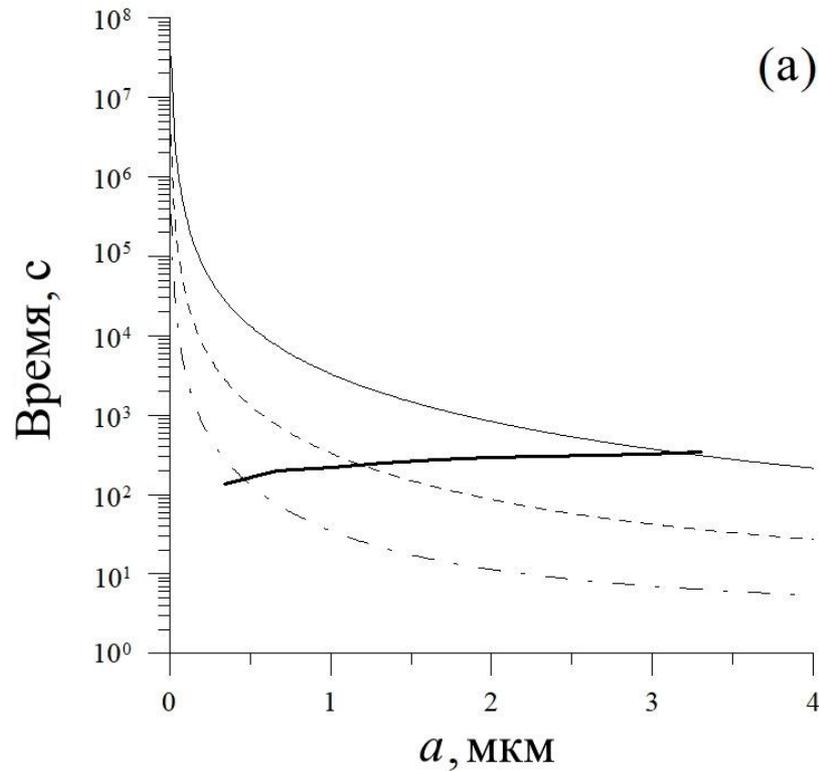
# Развитие неустойчивости Рэля-Тейлора

Мезосферные плазменно-пылевые облака имеют резкую нижнюю границу, причем концентрация пылевых частиц ниже этой границы пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией пыли над ней. В результате на границе раздела системы “газ + пыль”, находящейся в поле силы тяжести (на нижней границе облака), естественным образом развивается неустойчивость Рэля-Тейлора.

$$\tilde{\gamma}^3 + \tilde{\gamma}^2 \left[ \alpha \left( 1 + \frac{n_d m_d}{n_{\text{CO}_2} m_{\text{CO}_2}} \right) + \frac{|\mathbf{k}|g}{\alpha} \right] + \tilde{\gamma} |\mathbf{k}|g - \frac{n_d m_d |\mathbf{k}|g \alpha}{2 n_{\text{CO}_2} m_{\text{CO}_2}} = 0$$

$$\alpha = 2\sqrt{2/\pi} G n_{\text{CO}_2} T / \rho_d v_{\text{CO}_2}^{\text{th}} a$$

# Неустойчивость и формирование облаков



Зависимость характерного времени развития неустойчивости Рэля-Тейлора (тонкие линии) в сравнении с характерным временем седиментации (жирные линии) для высот (а) 80 км и (б) 110 км. Сплошные линии соответствуют  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ , штриховые —  $n_d = 10 \text{ см}^{-3}$ , штрихпунктирные —  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ .



# Пылевые звуковые возмущения

Одномерное распространение пылевых звуковых возмущений описывается системой уравнений, включающей в себя уравнение непрерывности, уравнение Эйлера для пылевой компоненты, уравнение Пуассона. Кроме того, необходимо учесть распределения ионов и электронов, которые успевают установиться на пылевых звуковых временных масштабах.

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

$$\frac{\partial v_d}{\partial t} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial x} = \pm \frac{Z_d e}{m_d} \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

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

$$n_e = n_{e0} e^{\frac{e\varphi}{T_e}}$$

$$n_i = n_{i0} \left[ \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{-e\varphi/T_i}} e^{-u^2} du \right) e^{-\frac{e\varphi}{T_i}} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{-e\varphi}{T_i}} \right]$$

$$n_e = n_{e0} \left[ \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{e\varphi/T_e}} e^{-u^2} du \right) e^{\frac{e\varphi}{T_e}} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{e\varphi}{T_e}} \right]$$

$$n_i = n_{i0} e^{-\frac{e\varphi}{T_i}}$$



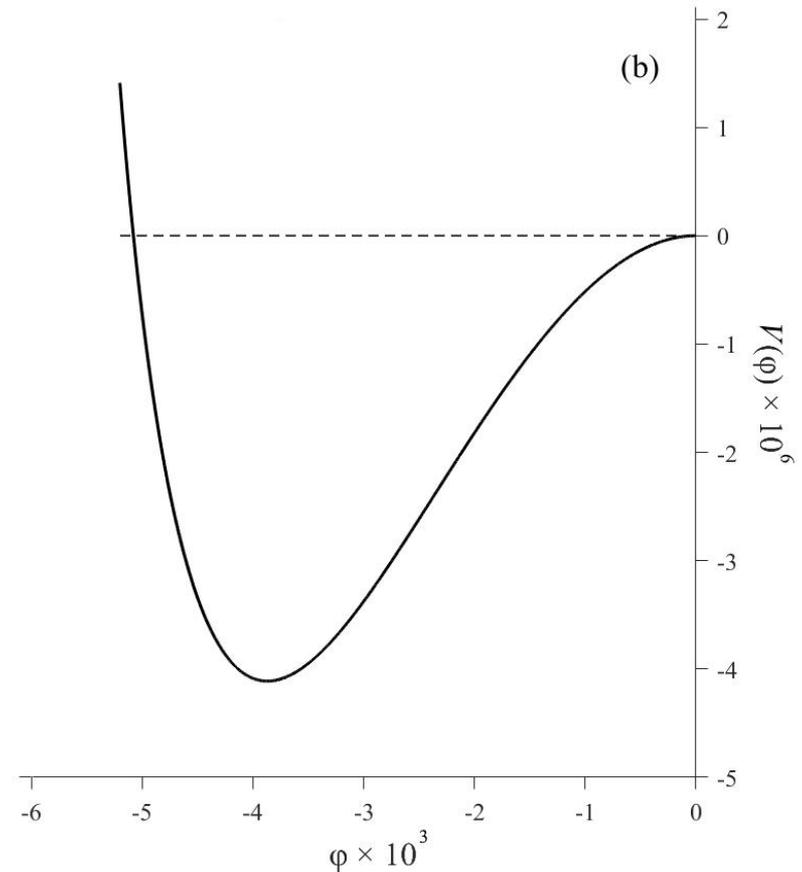
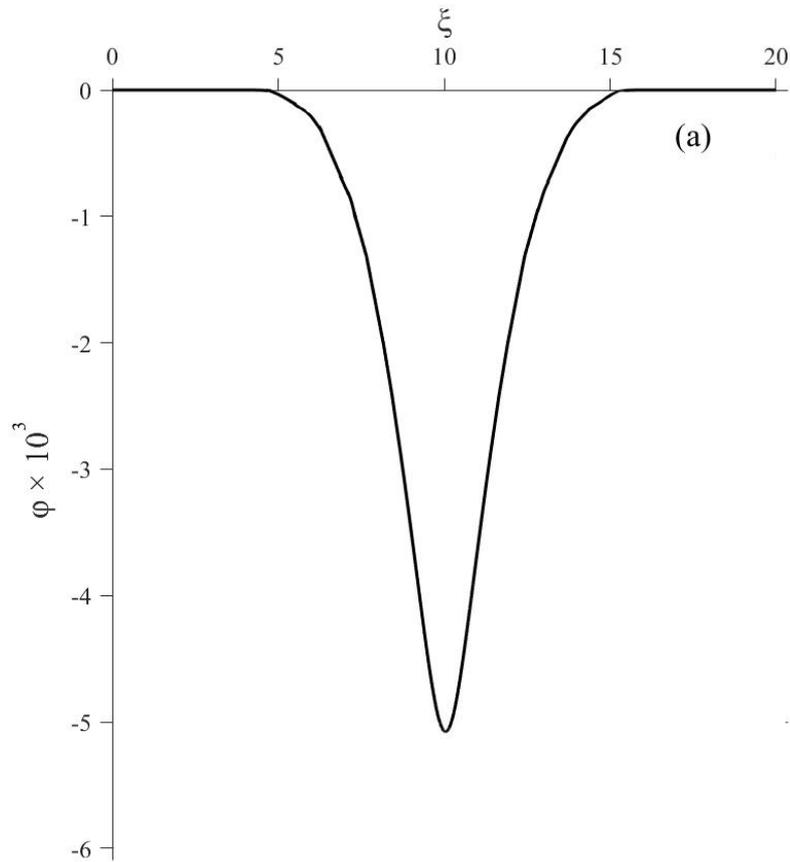
# Пылевые звуковые возмущения

$$\frac{1}{2}(\varphi_\xi)^2 + V(\varphi) = C, C \in \mathbb{R}$$

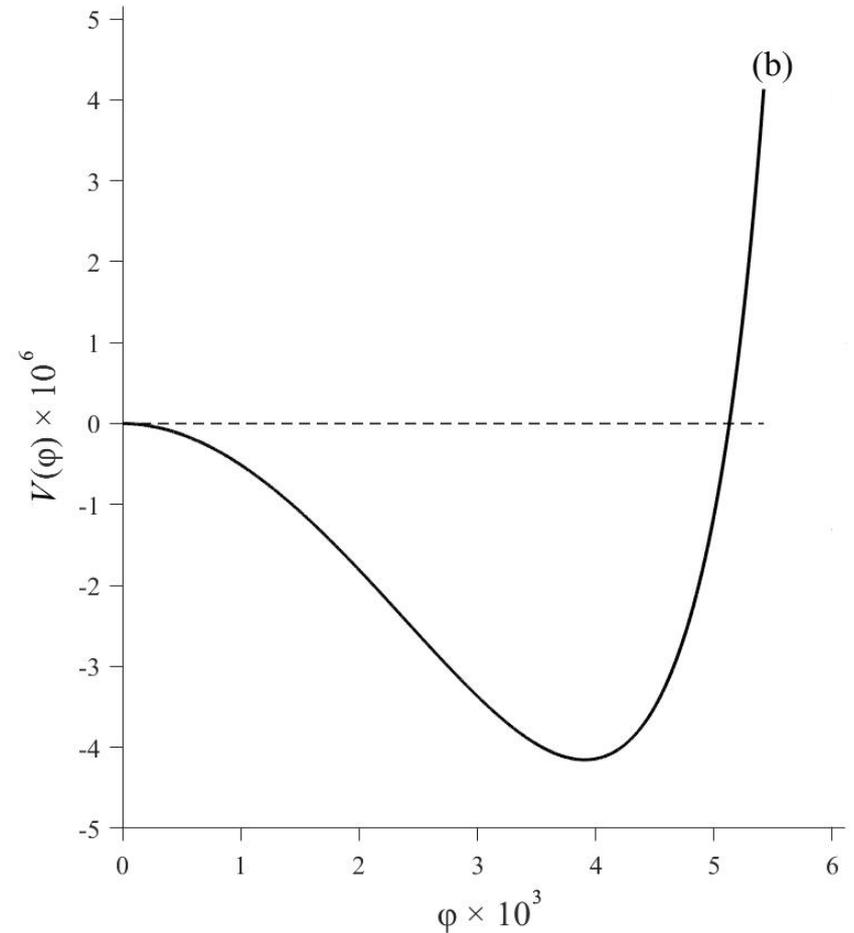
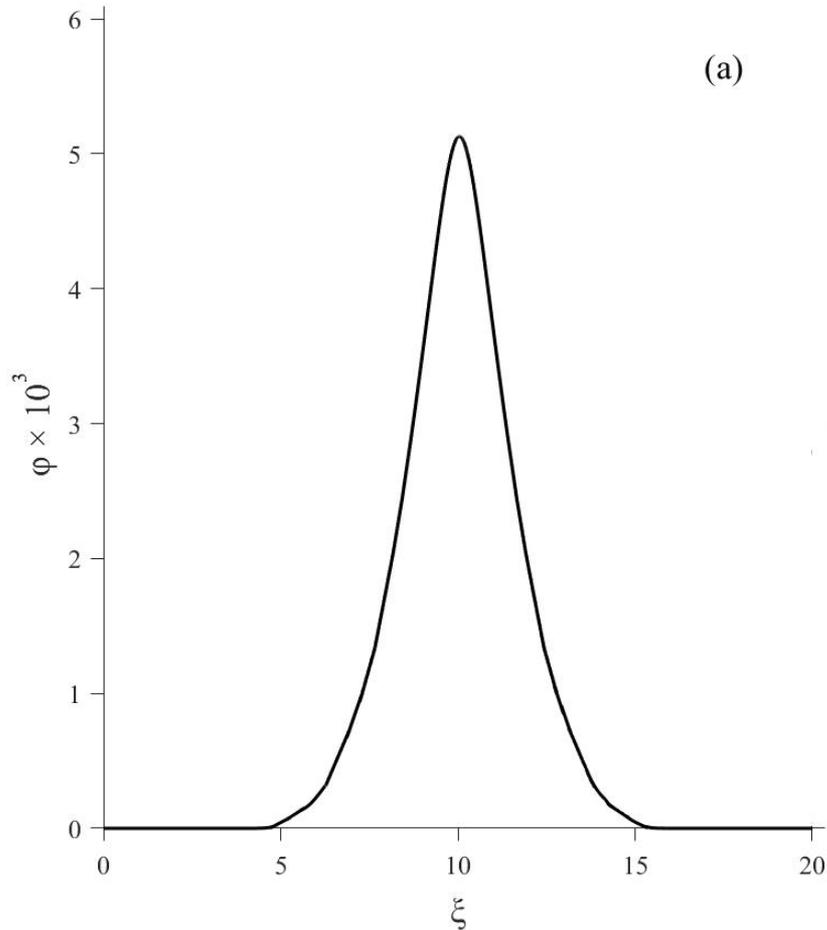
$$V(\varphi) = \tau^2(1 - e^{\varphi/\tau}) + l\tau \left( 1 - e^{-\varphi} - \frac{4}{3\sqrt{\pi}}(-\varphi)^{3/2} + \frac{2}{\sqrt{\pi}}e^{-\varphi} \int_0^{\sqrt{-\varphi}} e^{-u^2} du - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{-\varphi} \right) + \\ + Md\tau^2 \left( M - \sqrt{M^2 + \frac{2Z_d\varphi}{\tau}} \right)$$

$$V(\varphi) = 1 - e^\varphi + \frac{l}{\tau} (1 - e^{-\tau\varphi}) - \frac{4}{3\sqrt{\pi}}\varphi^{3/2} + \frac{2}{\sqrt{\pi}}e^\varphi \int_0^{\sqrt{\varphi}} e^{-u^2} du - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\varphi} + \\ + Md \left( M - \sqrt{M^2 - 2Z_d\varphi} \right)$$

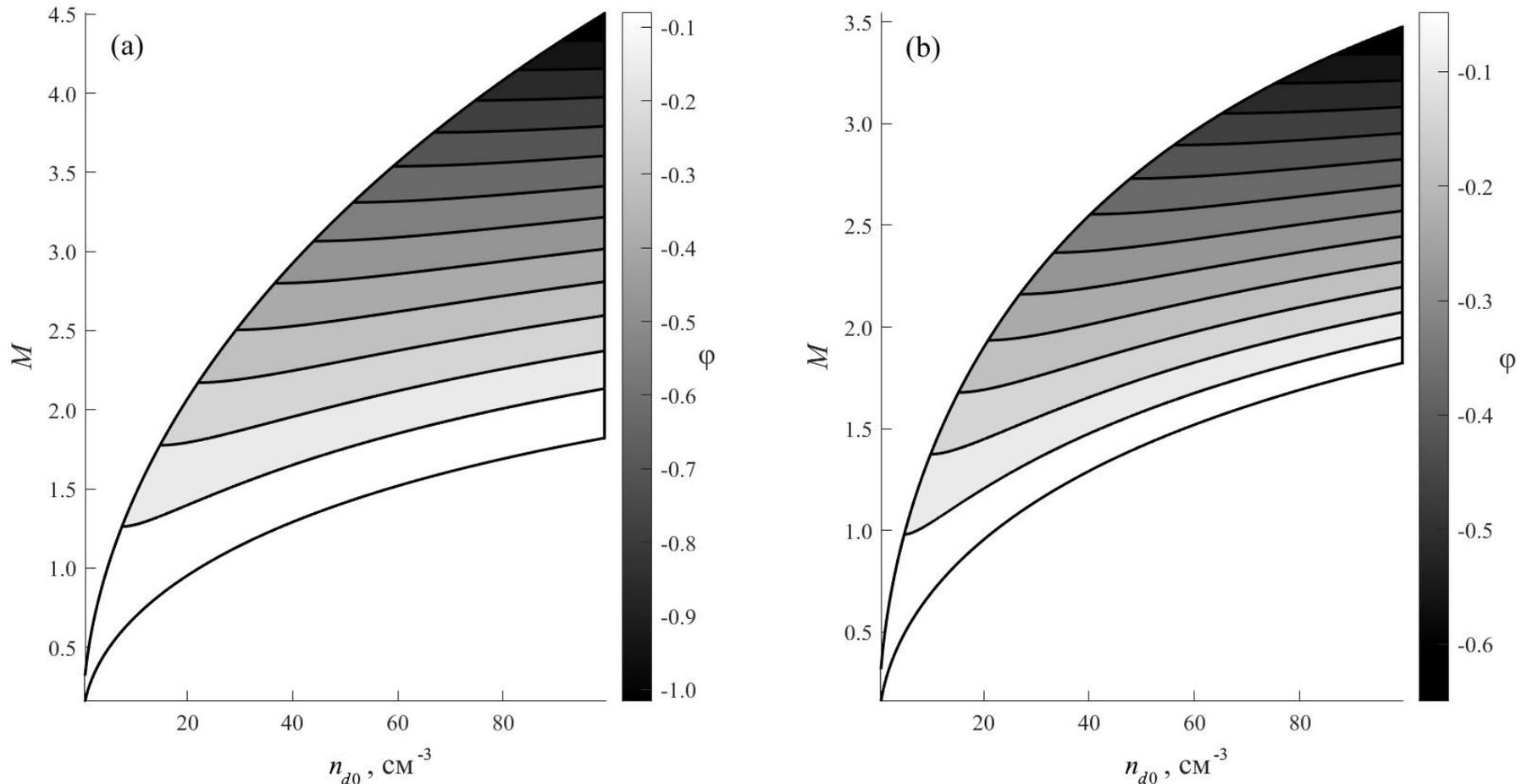
Обе системы введением сагдеевского потенциала сводятся к автономному уравнению, первым интегралом которого является выражение, формально совпадающее с законом сохранения энергии. Тип решения определяется значением константы.



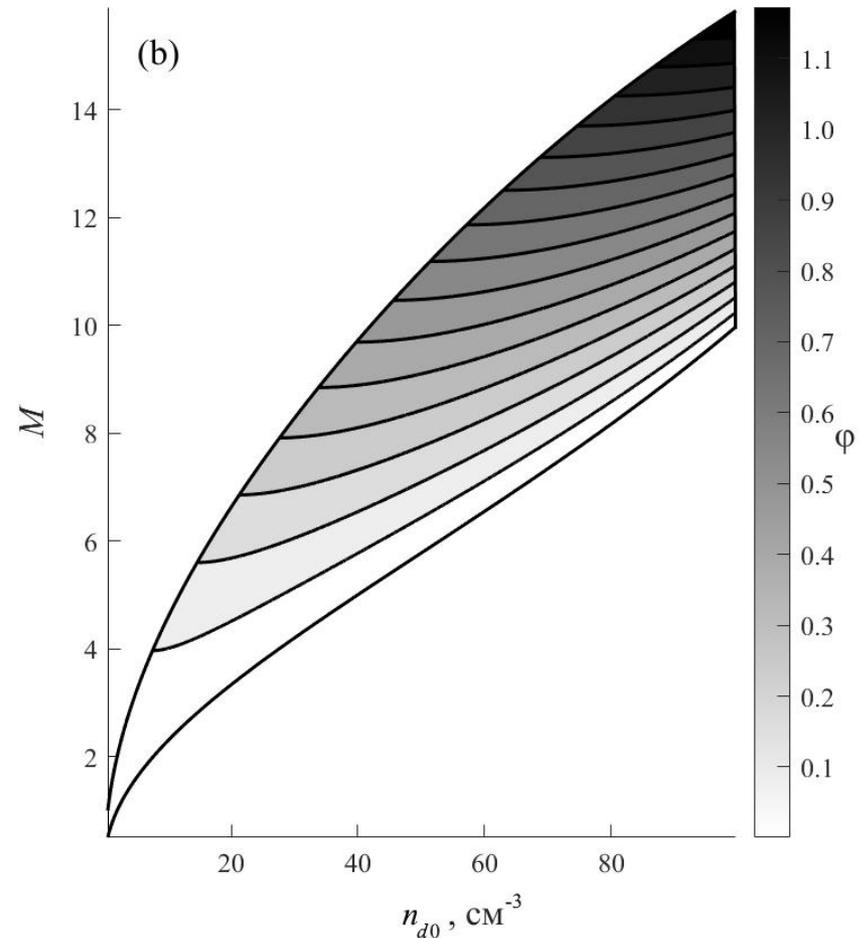
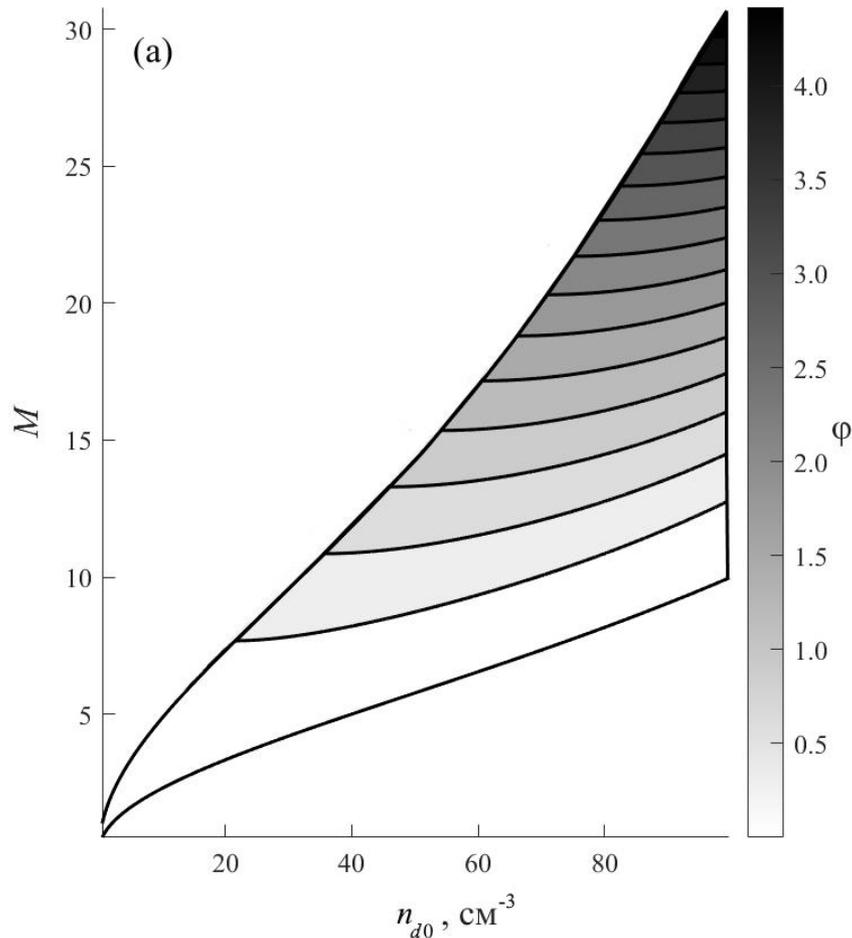
Пример профиля солитона  $\phi(\xi)$  (a) и сагдеевского потенциала  $V(\phi)$  (b) в случае ночной плазмы с заведомо отрицательными пылевыми частицами при  $T_e = T_i = 85$  К,  $n_{e0} = 10^3$  см<sup>-3</sup>,  $n_d = 1$  см<sup>-3</sup>,  $Z_d = 10$ .



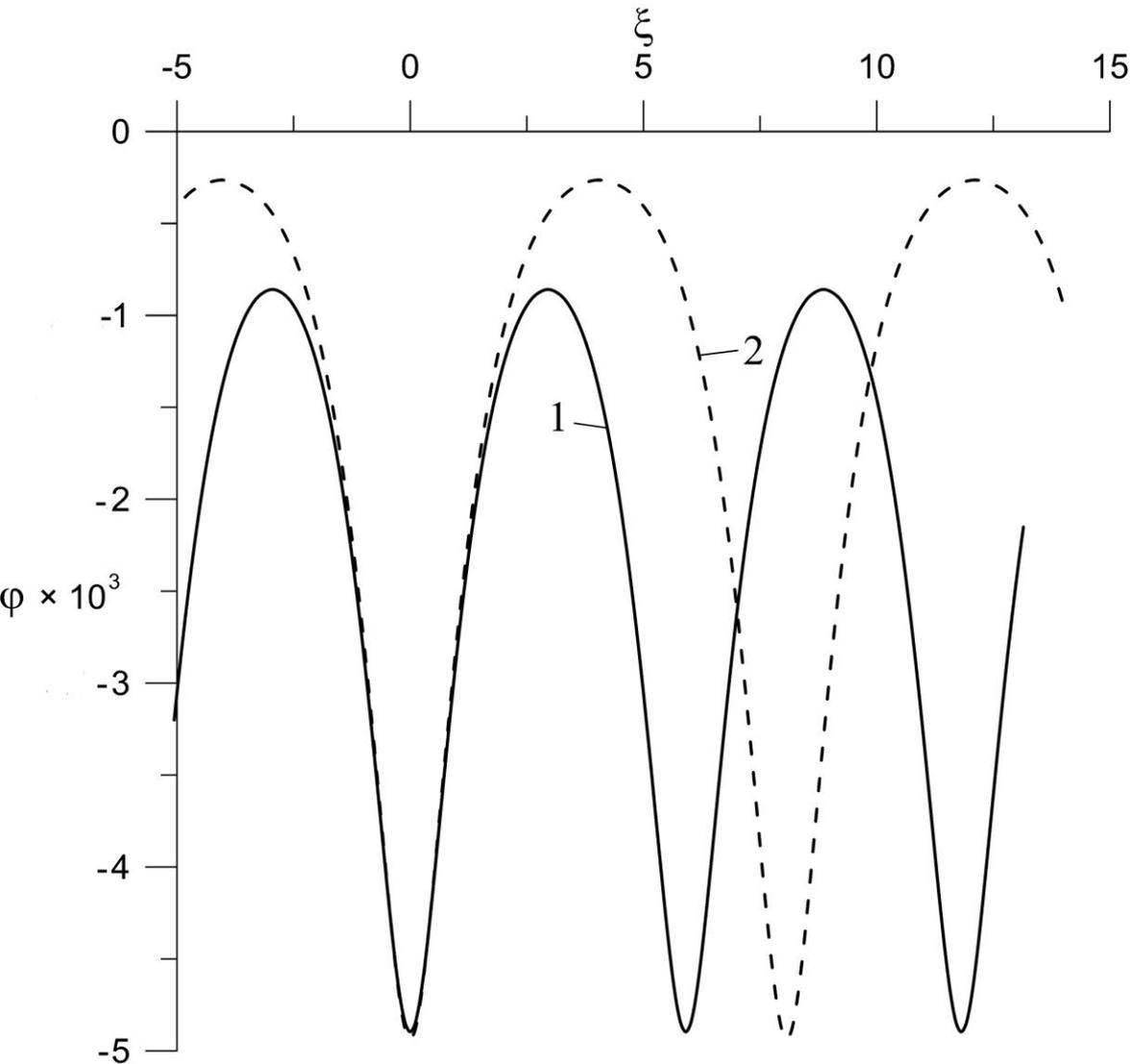
Пример профиля солитона  $\phi(\xi)$  (a) и сагдеевского потенциала  $V(\phi)$  (b) в случае дневной плазмы при наличии фотоэффекта (положительные пылевые частицы) при  $T_e = T_i = 100$  К,  $n_{e0} = 10^4$  см<sup>-3</sup>,  $n_d = 1$  см<sup>-3</sup>,  $Z_d = 100$ .



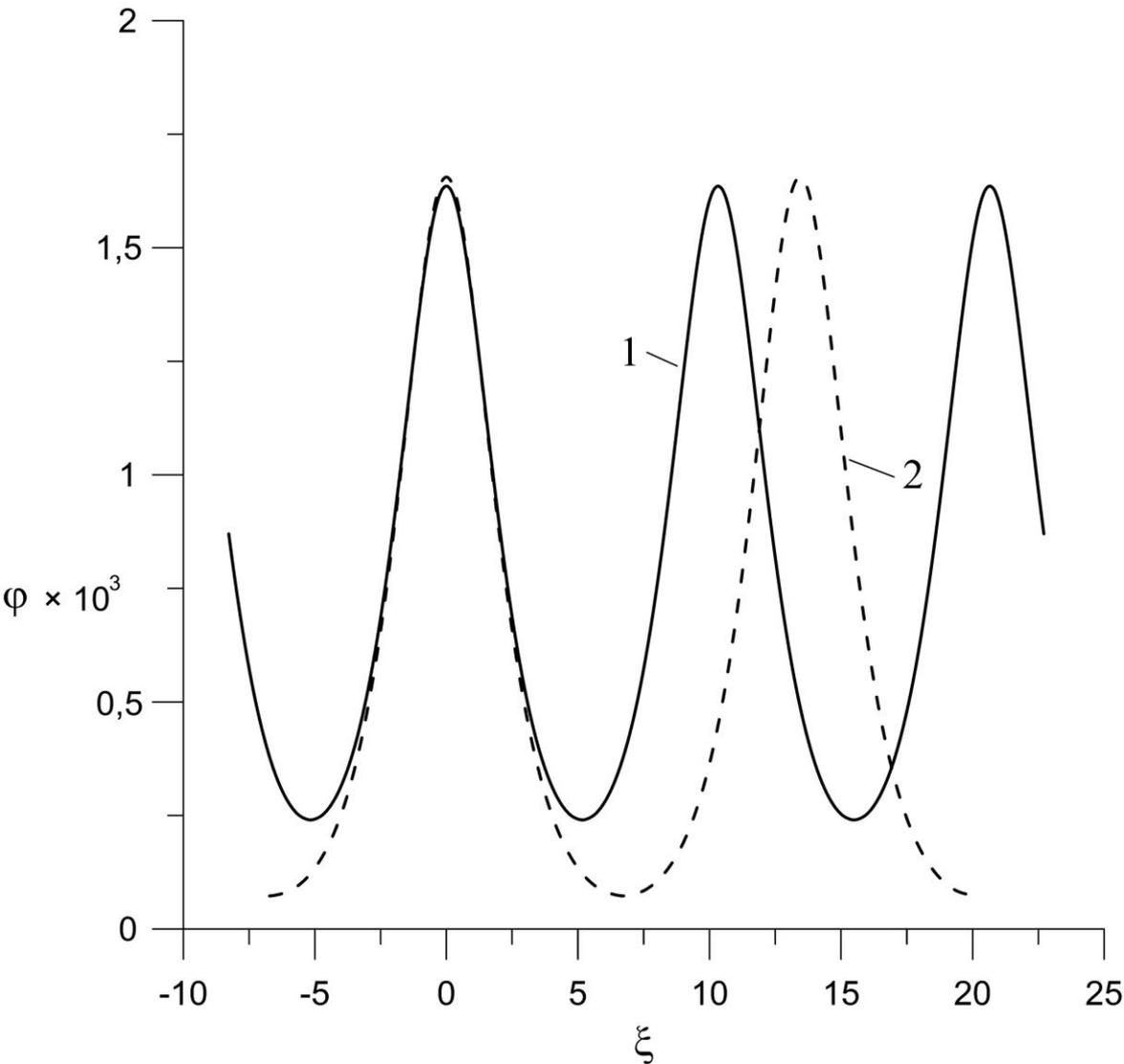
Профили амплитуд пылевых звуковых солитонов в зависимости от значений числа Маха  $M$  и невозмущенной концентрации пылевых частиц  $n_{d0}$  в случае ночной плазмы при  $T_e = T_i = 85$  К,  $n_{e0} = 10^3 \text{ см}^{-3}$ ,  $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$ ,  $Z_d = 10$ . в случае учета адиабатического захвата ионов плазмы (а) и в случае, когда ионы считаются распределенными по Больцману (б).



Профили амплитуд пылевых звуковых солитонов в зависимости от значений числа Маха  $M$  и невозмущенной концентрации пылевых частиц  $n_{d0}$  в случае дневной плазмы с фотоэффектом при  $T_e = T_i = 100$  К,  $n_{e0} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_d = 1 \text{ cm}^{-3}$ ,  $Z_d = 100$  в случае учета адиабатического захвата электронов плазмы и в случае, когда электроны считаются распределенными по Больцману (b).



Примеры профилей нелинейных волн  $\phi(\xi)$  при  $C = 0.1 \times V_{\min}$  (сплошная кривая) и  $C = 0.01 \times V_{\min}$  (штриховая кривая) в случае ночной плазмы ( $T_e = T_i = 85$  К,  $n_{e0} = 10^3$  см<sup>-3</sup>,  $n_d = 1$  см<sup>-3</sup>,  $Z_d = 10$ ).



Примеры профилей нелинейных волн  $\phi(\xi)$  при  $C = 0.1 \times V_{\min}$  (сплошная кривая) и  $C = 0.01 \times V_{\min}$  (штриховая кривая) в случае дневной плазмы при наличии фотоэффекта ( $T_e = T_i = 100$  К,  $n_{e0} = 10^4$  см $^{-3}$ ,  $n_d = 1$  см $^{-3}$ ,  $Z_d = 100$ ).

- Приведены уравнения модели, описывающей самосогласованным образом плазменно-пылевые структуры в ионосфере Марса. В рамках представленной модели проиллюстрировано образование слоистой структуры и резких границ пылевого облака, характерное время формирования и существования которого определяется временем седиментации составляющих его пылевых частиц.
- Показано, что важным фактором, влияющим на формирование плазменно-пылевых облаков, является неустойчивость Рэля–Тейлора, приводящая к тому, что плазменно-пылевые облака могут существовать лишь при достаточно малых значениях размеров составляющих их пылевых частиц.
- Рассмотрены пылевые звуковые солитоны и нелинейные периодические волны, распространяющиеся в ионосфере Марса в плазменно-пылевых облаках на высотах около 100 км. Показано, что свойства солитонов существенным образом зависят от таких параметров как величина заряда пылевых частиц и концентрация электронов плазмы. Кроме того, показано, что важным фактором, влияющим на параметры солитона, является адиабатический захват электронов (ионов) плазмы.
- Продемонстрирована возможность распространения в ионосфере Марса нелинейных периодических волн. Показано, что величина пространственного периода волны может быть достаточной для её регистрации космическими аппаратами и, в частности, можно ожидать наличие на Марсе явлений, схожих с полярными дюнами земной ионосферы.