ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, *2024*, *том 50*, *№ 7*, *с. 788–793*

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

УДК 533.951; 523.682.2

ИОННО-ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХВОСТОВ МЕТЕОРОИДОВ С ИОНОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

© 2024 г. Т. И. Морозова[a,*], С. И. Попель[a]

[a] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

**e-mail: timoroz@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.
После доработки 10.05.2024 г.
Принята к публикации 15.05.2024 г.

Исследуется ионно-звуковая неустойчивость в хвостах метеороидов в результате их пролета в атмосфере Земли и приводятся условия, при которых она развивается. Развитие данной неустойчивости происходит в результате относительного движения плазмы хвостов метеороидов и пылевой плазмы ионосферы Земли. Пыль в свою очередь создает условия, когда данная неустойчивость может развиваться в ситуации приблизительно равных температур ионов и электронов, что наблюдается в рассматриваемой плазменно-пылевой системе. Показан механизм возбуждения ионно-звуковых волн в результате развития ионно-звуковой неустойчивости в хвостах метеороидов. Найдены инкременты ионно-звуковой неустойчивости и характерные времена ее развития. Показано, что неустойчивость успевает развиться за времена пролета метеорного тела в атмосфере Земли и образования метеороидного следа, которые имеют значения, много большие времен развития ионно-звуковой неустойчивости в рассматриваемой системе. Найдено, при каких значениях волновых векторов и скоростей метеорных тел предполагается развитие ионно-звуковой неустойчивости. Отмечается, что для возможных больших амплитуд волн можно ожидать выхода неустойчивости на нелинейный режим.

Ключевые слова: пылевая плазма, ионосфера Земли, хвосты метеороидов, ионно-звуковые волны, ионно-звуковая неустойчивость

DOI: 10.31857/S0367292124070084, **EDN:** OINEYN

1. ВВЕДЕНИЕ

Метеорные явления играют важную роль в формировании свойств ионосферы Земли. В частности, в результате сгорания метеорных тел на высотах 80–120 км обнаруживаются пылевые частицы, которые приобретают заряды и влияют на состав ионосферной плазмы и прохождение различных процессов в ней.

При влете метеорного тела в плотные слои атмосферы (ниже 120–130 км), начинает образовываться метеорный след, который состоит из электронов, ионов, нейтралов и заряженных пылевых частиц. Это происходит в результате столкновений атомов и молекул, и их последующей ионизации, а также в результате воздействия тока термоэлектронной эмиссии с поверхности метеорного тела, механоэммиссии и фототока от излучения следа [1, 2]. Метеорный след излучает в результате возбуждения атомов и ионов метеорного вещества и атмосферных газов. В нижних слоях атмосферы образующаяся ударная волна перед метеорным телом приводит к большим потерям энергии тела, вследствие чего оно тормозится и энергии столкновения атомов оказываются недостаточными для ионизации и возбуждения атомов и молекул метеорного вещества и атмосферных газов. Также торможению метеорного тела способствуют вихревые движения воздуха. Мощное излучение, образующееся ударной волной, ионизует воздух, происходит плавление и испарение метеорного вещества. Далее помимо дробления метеороида происходит затвердевание расплавленных струй и конденсация испаренного вещества, которые совместно

образуют пылевой след. В результате воздействия токов электронов и ионов окружающей плазмы, а также эмиссионных токов образующиеся в следе пылевые частицы приобретают заряд. Для ярких метеоров при достаточной интенсивности излучения от ударной волны следует также учитывать фототок, чего не было сделано ранее.

В ионизованном метеорном следе могут происходить плазменно-пылевые явления: возбуждаться различные волновые моды и развиваться ряд неустойчивостей. Ранее рассматривались такие неустойчивости в хвостах метеороидов, как модуляционная неустойчивость электромагнитной волны, связанная с пылевой звуковой модой [2–7], неусточивости типа Бунемана, а также распространение ленгмюровских и нижнегибридных волн и связанные с ними модуляционные неустойчивости [8–10]. Метеорные следы образуются на высотах 70–130 км и время их жизни составляет от долей секунды до нескольких секунд и даже минут.

Типичная ситуация взаимодействия плазмы хвостов метеороидов и ионосферной плазмы может приводить к возбуждению различных волновых мод и развитию ряда неустойчивостей. В данной работе исследуются условия возбуждения ионно-звуковых волн в результате развития ионно-звуковой неустойчивости в хвостах метеороидов при их пролете в ионосфере Земли и приводятся характерные времена ее развития.

2. ИОННО-ЗВУКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Присутствие пылевой компоненты изменяет условия распространения ионно-звуковых волн и развития ионно-звуковой неустойчивости и оказывается возможным при равенстве температур ионов и электронов [11], что наблюдается в хвостах метеороидов [1, 2].

Ионно-звуковая неустойчивость создает в системе возможность стабильного возбуждения ионно-звуковых волн, а они в свою очередь влияют на развитие модуляционного взаимодействия электромагнитных волн, связанного с ионным звуком. Этот процесс может объяснить возникновение электрофонных шумов одновременно с пролетом метеороидов в диапазоне частот от нуля до нескольких килогерц, что совпадет с наблюдаемыми при пролете метеорных тел шумами [12–16] и является предметом дальнейшего исследования.

Условия распространения и возбуждения ионно-звуковых волн в хвостах метеороидов определяются условиями развития ионно-звуковой неустойчивости.

Основные величины, используемые в задаче [2], сведены в табл. 1.

То, что происходит в хвосте метеороид – сложная картина, однако мы предполагаем, что скорость хвоста совпадает со скоростью метеорного тела, как единственно известная скорость.

Получается, что для рассматриваемого диапазона частот

$$kv_{TiIon} \ll kv_{TiTail} \ll \omega \ll kv_{TeIon} \ll kv_{TeTail},$$

движение плазмы хвоста метеороида относительно плазмы ионосферы создает условия для развития ионно-звуковой неустойчивости, дисперсионное уравнение которой принимает вид

$$1 + \frac{1}{k^2\lambda^2_{DeTail}}\left(1 + i\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{\omega - ku}{kv_{TeTail}}\right) + \\ + \frac{1}{k^2\lambda^2_{DeIon}} - \frac{\omega^2_{iIon}}{\omega^2} - \\ - \frac{\omega^2_{iTail}}{(\omega - ku)^2} = 0, \qquad (1)$$

С учетом того, что $\omega^2_{iIon} / \omega^2 \ll \omega^2_{iTail} / (\omega - ku)^2$, малым членом $\omega^2_{iIon} / \omega^2$ можно пренебречь, получая дисперсионное уравнение третьего порядка. Для данного уравнения третьего порядка и условий диапазона частот

$$kv_{TiIon} \ll kv_{TiTail} \ll ku + \\ + k\sqrt[3]{1 / i\sqrt{2 / \pi}v_{TeTail}\lambda^2_{Tail}\omega_{iTail}} \ll \\ \ll \omega \ll kv_{TeIon} \ll kv_{TeTail}$$

можно получить решение

$$\omega(k) = ku + i\left(\frac{kv_{TeTail}(\lambda^2_{Ion} + \lambda^2_{Tail})}{\sqrt{\pi / 2}\lambda^2_{Ion}} + \\ + \frac{kv_{TeTail}\lambda^2_{Tail}}{\sqrt{\pi / 2}}\right). \qquad (2)$$

Здесь и далее все дебаевские радиусы указаны с опущенными индексами и обозначают электронные дебаевские радиусы соответствующих компонент: ионосферы и хвоста метеороида.

Таблица 1. Основные величины параметров плазмы, используемые в задаче.

Параметр	Определение
$T_{eTail} = 0.1–10$ эВ	Температура электронов хвоста метеороида
$T_{iTail} = 0.1–10$ эВ	Температура ионов хвоста метеороида
$T_{eIon} = 0.1$ эВ	Температура электронов ионосферы Земли
$T_{iIon} = 0.1$ эВ	Температура ионов ионосферы Земли
$T_{nIon} = 0.1$ эВ	Температура нейтралов ионосферы Земли
$n_{eTail} = 10^{10}–10^{13}$ см$^{-3}$	Концентрация электронов хвоста метеороида
$n_{iTail} = 10^{8}–10^{12}$ см$^{-3}$	Концентрация ионов хвоста метеороида
$n_{eIon} = 100$ см$^{-3}$	Концентрация электронов ионосферы Земли
$n_{iIon} = 100$ см$^{-3}$	Концентрация ионов ионосферы Земли
$n_{nTail} = 10^{12}–10^{15}$ см$^{-3}$	Концентрация нейтралов хвоста метеороида
$n_{dTail} = 10^{4}–10^{6}$ см$^{-3}$	Концентрация пыли хвоста метеороида
$n_{nIon} = 10^{12}–10^{15}$ см$^{-3}$	Концентрация нейтралов ионосферы Земли
$n_{dIon} = 100$ см$^{-3}$	Концентрация пыли ионосферы Земли
$v_{TiTail} = 10^{6}$ см/с	Тепловая скорость ионов хвоста метеороида для $T_{iTail} = 1$ эВ
$v_{TeTail} = 3 \cdot 10^{7}$ см/с	Тепловая скорость электронов хвоста метеороида для $T_{eTail} = 1$ эВ
$v_{TeIon} = 10^{7}$ см/с	Тепловая скорость электронов ионосферы Земли для $T_{eIon} = 0.01$ эВ
$v_{TiIon} = 3 \cdot 10^{5}$ см/с	Тепловая скорость ионов ионосферы Земли $T_{iIon} = 0.01$ эВ
$\lambda_{Tail} = 10^{-3}$ см	Дебаевский радиус электронов хвоста метеороида для $T_{eTail} = 1$ эВ, $n_{eTail} = 10^{12}$ см$^{-3}$
$\lambda_{Ion} = 30$ см	Дебаевский радиус электронов ионосферы Земли для $T_{eIon} = 0.01$ эВ, $n_{eIon} = 100$ см$^{-3}$
$\omega_{iTail} = 1.5 \cdot 10^{8}$ с$^{-1}$	Плазменная частота ионов хвоста метеороида для $T_{iTail} = 1$ эВ, $n_{iTail} = 10^{10}$ см$^{-3}$
$\omega_{eTail} = 5 \cdot 10^{10}$ с$^{-1}$	Плазменная частота электронов хвоста метеороида для $T_{eTail} = 1$ эВ, $n_{eTail} = 10^{12}$ см$^{-3}$
$\omega_{iIon} = 1.5 \cdot 10^{4}$ с$^{-1}$	Плазменная частота ионов ионосферы Земли для $T_{iIon} = 0.01$ эВ, $n_{iIon} = 100$ см$^{-3}$
$\omega_{eIon} = 5 \cdot 10^{5}$ с$^{-1}$	Плазменная частота электронов ионосферы Земли для $T_{eIon} = 0.01$ эВ, $n_{eIon} = 100$ см$^{-3}$
$u = (1.1 - 7.2) \cdot 10^{6}$ см/с	Скорость движения метеорного тела в ионосфере Земли

Тогда легко найти инкремент неустойчивости

$$\gamma(k) = \mathrm{Im}\,\omega = \left(\frac{k v_{TeTail} (\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2)}{\sqrt{\pi / 2}\lambda_{Ion}^2} + \frac{k v_{TeTail} \lambda_{Tail}^2}{\sqrt{\pi / 2}} \right). \quad (3)$$

Условие развития неустойчивости $\gamma > 0$, что в данном случае выполняется для любых волновых векторов k. Таким образом, в рассматриваемом диапазоне частот ионно-звуковая неустойчивость развивается всегда.

Характерные значения волновых векторов можно определить из соотношения $\omega(k) > k v_{TiTail}$, таким образом

$$k > \mathrm{Re}\left(\sqrt{\frac{i\sqrt{\pi / 2}\lambda_{Ion}^2 (u - v_{TiTail}) - v_{TeTail}(\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2)}{v_{TiTail}\lambda_{Ion}^2 \lambda_{Tail}^2}} \right). \quad (4)$$

Отсюда можно оценить волновые вектора для типичных параметров плазмы хвостов метеороидов и запыленной ионосферы Земли и оказывается, что они принимают значения, характерные для поперечных размеров хвостов метеороидов $k = 0.001–1$см$^{-1}$. Для параметров плазмы $T_{eTail} = 1$эВ, $n_{eTail} = 10^{12}$ см$^{-3}$, $T_{iTail} = 1$ эВ, $n_{iTail} = 10^{10}$ см$^{-3}$, $T_{iIon} = 0.01$ эВ, $n_{iIon} = 100$ см$^{-3}$, $u = 2 \cdot 10^{6}$ см/с, $k = 0.1$ см$^{-1}$, характерное значение инкремента развития неустойчивости в данном случае $\gamma = 3 \cdot 10^{6}$ с$^{-1}$. Соответственно, время развития неустойчивости $\tau = 1 / \gamma = 0.3 \cdot 10^{-6}$ с, что меньше времени жизни метеорного следа.

Для случая диапазона частот

$$k v_{TiIon} \ll k v_{TiTail} \ll \omega \ll k u + k \sqrt[3]{1 / i\sqrt{2 / \pi} v_{TeTail} \omega_{iTail} \lambda_{Tail}^2} \ll \ll k v_{TeIon} \ll k v_{TeTail}$$

оказывается, что дисперсионное уравнение не имеет неустойчивых решений. Дисперси-

онное выражение в данном случае задается выражением

$$\omega(k) = ku + \sqrt{\frac{k^2\lambda_{Ion}^2\lambda_{Tail}^2\omega_{iTail}^2}{k^2\lambda_{Ion}^2\lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2}}. \quad (5)$$

В случае более точного нахождения корней дисперсионного уравнения (1) следует решить уравнение 5-го порядка, рассмотрев случаи различных диапазонов частот и находя для них различные ветви колебаний. Уравнение (1) можно переписать в виде

$$\begin{gathered}\omega^5 B + \omega^4(A - 3kuB) + \\ + \omega^3(-2kuA + 3Bk^2u^2) + \\ + \omega^2(-Ak^2u^2 - Bk^3u^3 - C - D) + \\ + \omega \cdot 2Cku - Ck^2u^2 = 0,\end{gathered} \quad (6)$$

где коэффициенты

$$A = k^4\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + k^2\lambda_{Tail}^2 + k^2\lambda_{Ion}^2,$$

$$B = i\sqrt{\pi / 2}k^4\lambda_{Ion}^2 / kv_{TeTail},$$

$$C = k^4\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2\omega_{iu}^2,$$

$$D = k^4\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2\omega_{iTail}^2.$$

Для оценки диапазонов частот, в которых лежат наиболее значимые корни уравнения, рассмотрим следующие ситуации.

В случае, когда $\omega^5 B \ll \omega^4(A - 3kuB)$

$$\omega \ll \frac{k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2}{i\sqrt{\pi / 2} / (kv_{TeTail})\lambda_{Ion}^2}, \quad (7)$$

Когда в дополнение к этому

$\omega^4(A - 3kuB) \ll \omega^3(-2kuA + 3Bk^2u^2)$, т. е.

$$\omega \gg -\frac{ku(k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2)}{k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2 - i3u\lambda_{Ion}^2\sqrt{\pi / 2} / v_{TeTail}} - ku, \quad (8)$$

то дисперсионное уравнение для выбранного диапазона частот

$$\begin{gathered}kv_{TiIon} \ll kv_{TiTail} \ll \\ \ll -\frac{ku(k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2)}{k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2 - i3u\lambda_{Ion}^2\sqrt{\pi / 2} / v_{TeTail}} - \\ -ku \ll \omega \ll \frac{k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2}{i\sqrt{\pi / 2} / (kv_{TeTail})\lambda_{Ion}^2} \ll \\ \ll kv_{TeIon} \ll kv_{TeTail},\end{gathered} \quad (9)$$

можно решить аналитически с учетом того, что член при частоте во второй степени всегда отрицательный и свободный член всегда больше члена первой степени частоты. Тогда получим решение дисперсионного уравнения в виде

$$\omega(k) = \sqrt[3]{\frac{ik^6u^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2\omega_{iIon}^2}{-2iuk(k^4\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + k^2\lambda_{Tail}^2 + k^2\lambda_{Ion}^2) - 3\sqrt{\pi / 2} / v_{TeTail} \cdot (k^3u^2\lambda_{Ion}^2)}}. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (10) имеет неустойчивые решения для любых значений волновых векторов, удовлетворяющих условиям рассматриваемой задачи.

Можно найти инкремент развития ионно-звуковой неустойчивости $\gamma = \mathrm{Im}\,\omega$

$$\gamma(k) = \sqrt[3]{\frac{a}{c \cdot \cos(arctgb / a)}} \sin\frac{\mathrm{arctg}(b / a) + 2\pi n}{3}, \quad (11)$$

где $n = \{0,1,2\}$ и введены коэффициенты

$$a = -2k^8u^3\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2\omega_{iIon}^2(k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2),$$

$$b = -3\sqrt{\pi / 2}k^7u^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2\omega_{iIon}^2 / v_{TeTail},$$

$$c = 4u^2k^6(k^2\lambda_{Tail}^2\lambda_{Ion}^2 + \lambda_{Tail}^2 + \lambda_{Ion}^2) + 9\pi k^6u^2\lambda_{Ion}^4 / (2v_{TeTail}^2).$$

Выбирая ветви уравнения таким образом, что для развития неустойчивости выполнялось неравенство $\gamma > 0$, находим итоговое решение в виде

$$\gamma(k) = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c}} \sin\frac{\mathrm{arctg}(b / a) + 2\pi}{3}. \quad (12)$$

Исследуя максимум данной функции $\gamma(k)$, можно получить характерные значения волновых векторов, при которых инкремент раскачки неустойчивости максимален. Вычисления дают величины волновых векторов, соотносимые с размерами хвостов метеороидов. Таким образом, следует ожидать развития неустойчивости, когда волновые вектора принимают значения, сопоставимые с поперечными размерами хвостов метеороидов.

Стоит отметить, что рассматриваемый в данном случае диапазон частот (9) при характерных волновых векторах, удовлетворяющих условиям задачи, реализуем при небольших скоростях метеорных тел $u = 1.1 - 2 \cdot 10^6$ см/с, т. е. в данной ситуации ионно-звуковая неустойчивость может развиваться только в случае достаточно медленных метеороидов.

Для типичных параметров плазмы хвостов метеороидов и типичных параметров пылевой плазмы ионосферы Земли: $T_{eTail} = 1$ эВ, $n_{eTail} = 10^{12}$ см$^{-3}$, $T_{iTail} = 1$ эВ, $n_{iTail} = 10^{10}$ см$^{-3}$, $T_{eIon} = 0.01$ эВ, $n_{eIon} = 100$ см$^{-3}$, $T_{iIon} = 0.01$ эВ,

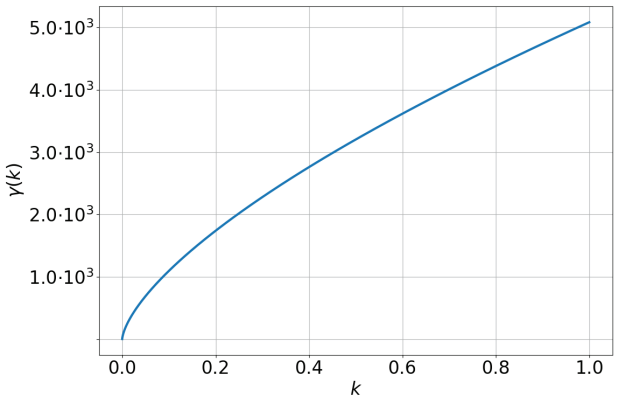

Рис. 1. Инкремент неустойчивости, являющийся решением уравнения (6) для диапазона (9).

$n_{iIon} = 100\,\text{см}^{-3}$, $u = 2 \cdot 10^6$ см/с, $k = 0.1\,\text{см}^{-1}$, характерное значение инкремента развития неустойчивости в данном случае принимает значения: $\gamma = 100\,\text{с}^{-1}$.

Времена развития ионно-звуковой неустойчивости отсюда имеют величины порядка $\tau = 1 / \gamma = 0.01$ с. Таким образом, ионно-звуковая неустойчивость успевает развиться за время пролета метеорного тела в ионосфере Земли, которое составляет от долей секунды до нескольких секунд (и в отдельных случаях может достигать нескольких минут [17]) и данный процесс наиболее вероятен для крупных метеорных тел с большими временами жизни метеорного следа.

Если брать волновые вектора для метеорных тел небольших размеров $k = 1\,\text{см}^{-1}$, то можно добиться раскачки неустойчивости при $\tau = 1 / \gamma = 10^{-4}$ с (рис. 1). При таких значениях инкрементов ионно-звуковой неустойчивости, максимальная амплитуда волны возрастает в 104 раз, и линейная неустойчивость с течением времени нарастает. Также этот режим реализуем для случая максимальных инкрементов из уравнения (3). Таким образом, можно ожидать перехода на нелинейный режим, и, в частности, распространения нелинейных волн и солитонов в данной плазменно-пылевой системе.

3. ВЫВОДЫ

Рассмотрена возможность распространения ионно-звуковых волн в хвостах метеороидов, связанная с развитием ионно-звуковой неустойчивости. Развитие данной неустойчивости связано с относительным движением плазмы хвоста метеороида и ионосферной пылевой плазмы. Отмечается, что развитие ионно-звуковой неустойчивости в системе, в которой температуры электронов и ионов имеют схожие значения, реализуемо в ситуации присутствия пыли, что наблюдается в плазме хвостов метеороидов. Найдены выражения максимальных инкрементов развития ионно-звуковой неустойчивости и характерных времен ее развития для наиболее значимых диапазонов частот. Показано, что ионно-звуковая неустойчивость успевает развиться за время пролета метеорного тела в ионосфере Земли ввиду того, что времена ее развития много меньше времени жизни хвостов метеороидов. Приведены значения инкрементов развития ионно-звуковой неустойчивости и времен ее развития для типичных параметров плазмы метеороидных хвостов и ионосферной плазмы. Показано, что характерные значения волновых векторов, при которых развивается ионно-звуковая неустойчивость, имеют соотносимые с размерами хвостов метеороидов. Найдены скорости метеорных тел, при которых оказывается возможным развитие ионно-звуковой неустойчивости в рассматриваемых диапазонах частот. Отмечается, что в результате раскачки ионно-звуковой неустойчивости и нарастания амплитуды колебаний возможен переход на нелинейный режим.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
2. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 993.
3. *Морозова Т.И., Коппин С.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 867.
4. *Борисов Н.Д., Коппин С.И., Попель С.И., Морозова Т.И.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 346.
5. *Morozova T.I., Popel S.I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1787. P. 012052.
6. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I., Borisov N.D.* // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 033703.
7. *Морозова Т.И., Коппин С.И., Попель С.И.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т.61. С. 794.
8. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 635. Doi: 10.31857/S0367292122600406.
9. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 924. Doi: 10.31857/S0367292122600777

10. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 42.
Doi: 10.31857/S0367292122601199.
11. *Shukla P.K., Silin V.P.* // Physica Scripta. 1992. V. 45. P. 508.
Doi: 10.1088/0031-8949/45/5/015.
12. *Keay C. S. L.* // Science. 1980. V.210. P. 11.
13. *Verveer P., Bland A., Bevan A. W. R.* // 63rd Ann. Meteoritical Soc. Meeting. 2000. P. 5233.
14. *Zgrablić G., Vinković D., Gradečak S., Kovačić D., Biliskov N., Grbac N., Andreić Ž., Garaj S.* // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. SIA 11-1.
Doi: 10.1029/2001JA000310.
15. *Trautner R., Koschny D., Witasse O., Zender J., Knöfel A.* // Proceed. Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2002. International Conference. 2002 / Ed. Warmbein, B. Noordwijk, Netherlands: ESA, 2002. P. 161.
16. *Spalding R., Tencer J., Sweatt W., Conley B., Hogan R., Boslough M., Gonzales G., Spurný P.* // Sci. Reps. 2017. V. 7. P. 41251.
Doi: 10.1038/srep41251.
17. *Михалев А. В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Еселевич М.В., Иванов К.И., Комарова Е.С., Подлесный А.В., Подлесный С.В., Сыренова Т.Е.* // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. С. 130.

ION-SOUND WAVES DURING THE INTERACTION OF METEOROID TAILS WITH THE EARTH'S IONOSPHERE

T. I. Morozova[a],* and S. I. Popel[a]

[a]*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

**e-mail: timoroz@yandex.ru*

The ion-acoustic instability in the tails of meteoroids as a result of their passage through the Earth's atmosphere is studied and the conditions under which it develops are given. The development of this instability occurs as a result of the relative motion of the plasma of meteoroid tails and the dusty plasma of the Earth's ionosphere. Dust, in turn, creates conditions when this instability can develop in a situation of approximately equal ion and electron temperatures, which is observed in the plasma–dust system under consideration. The mechanism of the excitation of ion-sound waves as a result of the development of the ionacoustic instability in meteoroid tails is shown. The growth rates of the ion-acoustic instability and the characteristic times of its development are found. It is shown that the instability has time to develop during the time of passage of a meteoroid body in the Earth's atmosphere and the formation of a meteoroid trail, which has values much greater than the time of development of ion-acoustic instability in the system under consideration. The wave vectors and velocities of meteoric bodies, at which the development of the ion-acoustic instability is expected, are found. It is noted that the instability can reach a nonlinear regime at possible large wave amplitudes.

Keywords: dusty plasma, Earth's ionosphere, meteoroid tails, ion-sound waves, ion-acoustic instability