

УДК 533.951; 523.682.2

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА МАРСЕ, СВЯЗАННАЯ С ПЫЛЕВОЙ ЗВУКОВОЙ МОДОЙ

© 2024 г. Т. И. Морозова^{а,*}, С. И. Попель^а^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: timoroz@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 25.05.2024 г.

Предполагается, что наблюдаемые низкочастотные шумы, регистрируемые на поверхности Марса, могут быть связаны с присутствием в его атмосфере заряженной пылевой компоненты и возникновением в такой системе пылевых звуковых возмущений, которые модулируют электромагнитную волну от Солнца. Также показана возможность данной связи с плазменно-пылевыми процессами в хвостах метеороидов. Описан механизм возбуждения модуляционной неустойчивости электромагнитной волны, связанной с пылевой звуковой модой в атмосфере Марса, а именно в пылевых облаках на высоте 60 и 100 км, где обнаруживается пылевая плазма с частицами из замерзшего углекислого газа. Показано, что развитие модуляционной неустойчивости обусловлено воздействием на пылевую плазму в атмосфере Марса высокочастотных электромагнитных волн как от природных источников (солнечное излучение, молниевые разряды), так и антропогенной природы (от оборудования с космических спутников и со станций на поверхности планеты). Найдены параметры электромагнитных волн накачки, при которых ожидается активное развитие модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевой звуковой модой и значения инкрементов модуляционной неустойчивости. Развитие модуляционной неустойчивости в пылевой плазме марсианских облаков в свою очередь может объяснить возникновение низкочастотных шумов, регистрируемых оборудованием на поверхности Марса. Обсуждается связь наблюдаемых радиошумов в диапазоне от 3 Гц — 3 кГц и плазменно-пылевых процессов в атмосфере Марса, в частности, в пылевых облаках на 60 и 100 км, а также в пылевой плазме хвостов метеороидов, где концентрация пыли высока.

Ключевые слова: пылевая плазма, атмосфера Марса, хвосты метеороидов, модуляционная неустойчивость, пылевые облака Марса, пылевой звук

DOI: 10.31857/S0367292124070072, **EDN:** OIZWWR

1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевая плазма обнаруживается широко в Солнечной системе и за ее пределами. В частности, она присутствует в ионосфере Земли на высотах 80–120 км, в атмосфере Марса, вблизи Луны и других безатмосферных тел, на некоторых спутниках планет с атмосферами (например, на Титане), в кольцах Юпитера и Сатурна [1], в комах комет [2–4], в протопланетных дисках [5–7], молекулярных облаках и других космических системах. Изучение процессов, происходящих в космической пылевой плазме, важно для понимания

их проявлений и описания наблюдательных эффектов. Исследования по изучению проявлений пылевой плазмы также представляют большой интерес и значимость в контексте будущих межпланетных миссий, в частности, на Луну и на Марс.

На Марсе пылевые частицы приобретают заряды под воздействием солнечного излучения, взаимодействия с заряженными частицами атмосферы и солнечного ветра, трибоэффекта в пылевых вихрях и других факторов. Атмосфера Марса имеет некоторую схожесть с земной атмосферой. На Марсе обнаруживаются пылевые об-

лака на 60 и 100 км, состоящие из частиц конденсированного углекислого газа, либо из силикатных частиц.

Пыль может попадать в атмосферу Марса в результате конвективных процессов с поверхности планеты, а также оставаться там в результате падения микрометеоритов и сгорания метеорных тел. В атмосфере Марса также, как и в земной атмосфере наблюдается сгорание метеорных тел, чему свидетельствуют пары металлов метеорного происхождения [8], и ожидается, что наблюдаемые радишумы могут быть связаны также и с процессами, происходящими в пылевой плазме хвостов метеороидов наравне с пылевыми облаками на 60 и 100 км в марсианской атмосфере.

Особое место в метеорной физике занимает изучение возникновения звуковых явлений, сопровождающих пролеты метеоров. Это могут быть как звуки одновременно с пролетом метеорных тел, так и после них. Аномальные звуки, слышимые одновременно с пролетом метеоров и называемые электрофонными, очевидно, связаны с электромагнитными явлениями. В такой ситуации наблюдатели на Земле могут слышать различные звуки, такие как свист, треск, шипение, гул [9].

Ранее было показано, что в ионосфере Земли в случае метеорных потоков, когда неоднозначно определяется одновременность звуков, модуляционная неустойчивость может объяснять возникновение электрофонных шумов одновременно с пролетом метеороидов [10, 11]. Электрофонные шумы представляют собой низкочастотные колебания, которые регистрируются одновременно с пролетом метеороидов. Спонтанность падения метеорных тел затрудняет наблюдения пролетов метеороидов. Низкочастотные электромагнитные волны могут быть преобразованы в звуковые у поверхности Земли посредством различных приемников и выпрямителей [11] или в результате нагрева предметов и теплопроводности воздуха [12]. Также была показана возможность существования модуляционной неустойчивости от отдельных метеороидов [13] с возможным возникновением электрофонных шумов.

Были получены данные по регистрации низкочастотных шумов в атмосфере Марса наземными аппаратами в диапазоне частот, аналогичном земным электрофонным шумам от пролета метеорных тел [14]. Предполагается, что в случае марсианской атмосферы данные

электромагнитные шумы могут наблюдаться также от пролетов метеорных тел или от областей пылевой плазмы на 60 и 100 км.

В целом для пылевой плазмы важным процессом, влияющим на распространение электромагнитных волн в плазме, является модуляционное взаимодействие [15]. Ранее [10, 16–20] проводились исследования линейной стадии модуляционного взаимодействия — модуляционной неустойчивости электромагнитных волн при их распространении в запыленной ионосферной плазме Земли во время высокоскоростных метеорных потоков и при воздействии на ионосферу мощной электромагнитной волны накачки. Модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с пылевой звуковой модой в пылевой плазме, может объяснить возникновение низкочастотных шумов в атмосфере Земли. Аналогично этой ситуации следует ожидать схожих эффектов в атмосфере Марса, которые подкрепляются наблюдениями. В частности, на это могут влиять процессы, происходящие в хвостах метеороидов, образующих плазменно-пылевые хвосты в ионосфере или в пылевых облаках на высотах 60 и 100 км, где непрерывно присутствуют пылевые частицы различного происхождения — конденсированные из углекислого газа и железосиликатного состава, в том числе металлические частицы вследствие конденсации паров металлов метеорного происхождения, и породы с поверхности планеты.

Структура работы следующая: в первом разделе приводятся типичные параметры запыленной атмосферы Марса, во втором — детали наблюдений низкочастотных шумов на Марсе, в третьем рассматривается модуляционная неустойчивость электромагнитной волны накачки, связанной с пылевой звуковой модой в марсианских пылевых облаках и в четвертом рассмотрен случай развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевой звуковой модой в хвостах метеороидов, сгораемых в марсианской ионосфере.

2. ЗАПЫЛЕННАЯ АТМОСФЕРА МАРСА

Атмосфера Марса существенно отличается от земной: содержание углекислого газа в ней составляет 95.3%, в то время, как кислород и азот имеют значительно меньшие доли, давление и плотность в 160 раз меньше земных, что способствует более глубокому проникновению сол-

нечного излучения и созданию ионосферных слоев и слоев пылевой плазмы на высотах, значительно меньших, чем в земной атмосфере. Ионосфера Марса занимает области от 80–100 км и до 500–600 км. Присутствие пылевых частицы наблюдается в широком диапазоне высот: пылевые облака могут присутствовать на 60–100 км, пылевые дьяволы могут поднимать с поверхности планеты пыль на высоты до нескольких километров, что в условиях наличия в данных системах вихревых движений и трибоэлектрического эффекта приводит к электризации пыли даже на высотах близко к поверхности планеты. На 60 и 100 км присутствуют облака, аналогичные земным серебристым облакам, но состоящие из льда углекислого газа.

Пылевые частицы в атмосфере Марса имеют характерные размеры порядка мкм и концентрации $0.005\text{--}0.05\text{ см}^{-3}$ в южном полушарии и $0.01\text{--}0.3\text{ см}^{-3}$ в северном. В северном полушарии присутствует и более мелкая пыль с размерами десятки нм. Следует отметить, что концентрация пыли уменьшается с ростом высоты [21].

Пыль от метеороидов может присутствовать на высотах 110 км и ниже. В атмосфере Марса в диапазоне высот 90–110 км происходит сгорание микрометеороидов с массами до 10^{-4} г, на высотах 60–90 км сгорают (в том числе частично) метеороиды с массами 10^{-4} г. Именно горение метеороидов обеспечивает присутствие металлических паров, недавно обнаруженных в атмосфере Марса [8]. Параметры плазмы марсианской ионосферы на 100 км следующие: концентрация нейтралов $n_n = 10^{10}\text{ см}^{-3}$, электронов $n_e = 10^4\text{ см}^{-3}$, ионов $n_i = 10^4\text{ см}^{-3}$ [22], температура электронов составляет 140 К, ионов – 150 К, нейтралов – 140 К [23].

Источниками пылевых частиц в атмосфере может служить пыль от сгорания метеорных тел и конденсация углекислого газа при низких температурах на высоте порядка 100 км. Также падения метеорных тел поднимают пыль у поверхности, которая потом конвекционными потоками и ветрами может переноситься в верхние слои атмосферы. Присутствие заряженных пылевых частиц на высотах 60 и 100 км при воздействии на них электромагнитных волн, в частности, от Солнца или от работы оборудования на поверхности Марса, может создать условия для развития модуляционной неустойчивости в пылевой плазме марсианских облаков. Это в свою очередь может

объяснить возникновение низкочастотных шумов, регистрируемых на поверхности Марса.

Спектр солнечного излучения в атмосфере Марса аналогично с земной атмосферой обрывается на некоторых энергиях, в случае Марса это соответствует 7.5 эВ на 100 км [24, 25]. Работа выхода CO₂ в твердой фазе составляет приблизительно 11.5 эВ (см. рис. 3 работы [26]). Таким образом, можно считать, что на рассматриваемых высотах влияние фотоэффекта на зарядку частиц сухого льда (CO₂) несущественно, и, ввиду большей подвижности электронов, чем ионов, заряды частиц сухого льда в дневное и ночное отрицательные [27]. Стоит отметить, что железо-силикатные пылевые частицы заряжаются днем положительно ввиду низкой работы выхода их материала, а ночью – отрицательно. В хвостах метеороидов зарядка частиц в основном положительна из-за доминирующего воздействия эмиссионных токов и фототока от ударной волны метеора.

При расчетах использовались следующие параметры солнечного ветра: $n_{eS} = n_{iS} = 3.7\text{ см}^{-3}$, $T_{eS} = 1.4 \cdot 10^5\text{ К}$, $T_{iS} = 7 \cdot 10^4\text{ К}$, $u_i = 468 \cdot 10^5\text{ см/с}$. Здесь $n_{e(i)}$ – концентрация электронов (ионов), $T_{e(i)}$ – температура электронов (ионов), индекс S характеризует величины, относящиеся к солнечному ветру, u_i – скорость солнечного ветра. В качестве ионов солнечного ветра выбирались протоны. В ночное время источником электромагнитных волн накачки солнечное излучение служить не может. На Марсе солнечное излучение в 2.5 раза слабее, чем на Земле.

3. НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ

Низкочастотные шумы в диапазоне 3 Гц – 3 кГц детектировались наземным оборудованием у поверхности Марса [14]. Поскольку рассматриваемые явления в основном имеют очень малую интенсивность, измерения проводились высокочувствительной и малозумящей аппаратурой на поверхности Марса. Полоса пропускания приемника составляла от 30 мГц до 1.5 кГц, были получены непрерывные необработанные данные измерений спектра и формы сигнала. Так как сигналы данных частот проходят большие расстояния, то оказывается возможным изучить свойства планеты в записи с одной станции. Для изучения электромагнитных свойств планеты можно использовать пассивную и активную электромагнитную разведку. Пассивные датчики могут

использоваться при наличии на планете естественных источников электромагнитного излучения, активные — при недостаточной интенсивности этих источников.

Авторы не дают однозначного объяснения наблюдаемого явления, они обозначают наличие источников радиоизлучения, но не указывают на явления, их вызывающие, однако выдвигают предположения, что это может быть связано с процессами зарядки частиц в атмосфере Марса и что источниками излучения могут быть пылевые дьяволы и молниевые разряды. Однако недостаточные знания об электромагнитных процессах в марсианской ионосфере и магнитосфере не позволяют точно определить их свойства и возможность их измерений с поверхности планеты.

Присутствие заряженных пылевых частиц на высотах 60 и 100 км при воздействии на них электромагнитных волн, в частности, от Солнца или от работы оборудования на поверхности Марса могут создать условия для развития модуляционной неустойчивости в пылевой плазме. Это в свою очередь может объяснить возникновение низкочастотных шумов, регистрируемых на поверхности Марса.

Атмосфера Марса отличается от земной, но тем не менее имеет схожую структуру и в ней могут протекать похожие процессы, как и в запыленной ионосфере Земли. В частности, ранее было показано, что в атмосфере Земли возникновение данных шумов также может быть связано с пролетом метеорных тел, возникновением различных мод колебаний и развитием ряда неустойчивостей в пылевой плазме метеороидных хвостов. А именно, модуляционной неустойчивости электромагнитной волны, связанной с пылевой звуковой модой [10–11, 13], неустойчивости типа Бунемана, а также распространением ленгмюровских и нижнегибридных волн [28, 29]. Также в атмосфере Марса на 60 и 100 км обнаруживаются облака, похожие на земные серебристые облака, но состоящие из льда углекислого газа, в которых также происходят плазменно-пылевые процессы. Аналогично проведенным ранее исследованиям [15–20] предполагается, что в пылевых облаках на Марсе может развиваться модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с пылевой звуковой модой. Развитие модуляционной неустойчивости в пылевой плазме марсианских облаков в свою очередь может объяснить возникновение низкочастотных

шумов, регистрируемых на поверхности Марса в диапазоне от 3 Гц — 3 кГц.

В данной работе предполагается, что наблюдение данных шумов также может быть связано с пролетом метеорных тел и микрометеоритов в атмосфере Марса и увеличению в этой связи концентрации пыли в пылевой плазме метеороидных хвостов и пылевых облаках Марса.

4. МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Решая основную систему уравнений, описывающих модуляционную неустойчивость электромагнитных волн в ионосферной плазме (см. уравнения (1)–(7) в [17]) для случая пылевой плазмы ионосферы Марса, можно найти инкременты развития модуляционной неустойчивости.

Введем основные обозначения: индекс 0 соответствует невозмущенным параметрам, индекс 1 — возмущенным величинам первого порядка малости, индекс eq обозначает, что соответствующая величина вычисляется при заряде пылевой частицы, равном его равновесному значению q_{d0} ; $\chi_e = 3.16T_e / (m_e v_e)$, $\chi_i = 3.9T_i / (m_i v_i)$ — электронный и ионный коэффициенты температуропроводности соответственно, $v_{e(i)n}$ — эффективная частота столкновений электронов (ионов) с нейтрами, $v_{e(i)}$ — сумма частот столкновений электронов (ионов) со всеми другими сортами частиц, включая нейтралы и пылевые частицы. Для них частоты столкновений электронов с нейтрами можно получить из [30]. Частоты столкновений электронов с другими частицами определяются в основном частотами столкновений электронов и нейтралов. Для высот марсианской атмосферы 60 и 90 км частота столкновений электронов определяется как $v_e = 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Модуляционная неустойчивость приводит к росту низкочастотных возмущений электрического поля, связанных с пылевой звуковой модой.

Предполагая, что низкочастотные колебания в плазме меняются как $\exp(i\Omega t + i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ (где Ω и $\mathbf{k}$ — частота и волновой вектор, связанные с низкочастотными возмущениями), уравнения, описывающие эволюцию высокочастотного электромагнитного поля, можно записать в виде

$$\epsilon_{\pm} \mathbf{E}_{\pm} - \frac{c^2}{\omega_{\pm}^2} \mathbf{K}_{\pm} \times (\mathbf{K}_{\pm} \times \mathbf{E}_{\pm}) = \frac{n_{e1}}{n_{e0}} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{\pm}^2} \mathbf{E}_{0\pm}, \quad (1)$$

где $\omega_{\pm} = \Omega \pm \omega_0$ и $\mathbf{K}_{\pm} = \mathbf{k} \pm \mathbf{K}_0$; $\omega_0, \mathbf{K}_0$ — частота и волновой вектор, соответствующие волне накачки; $\mathbf{K}$ — волновой вектор амплитудной модуляции электромагнитной волны накачки; $\omega_{pe}^2 = 4\pi n_{e0} e^2 / m_e$ — электронная плазменная частота; $\epsilon_{\pm} = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega_{\pm}^2$ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость ионосферной плазмы; $\mathbf{E}_+ = \mathbf{E}$, $\mathbf{E}_- = \mathbf{E}^*$, $\mathbf{E}_{0+} = \mathbf{E}_0$, $\mathbf{E}_{0-} = \mathbf{E}_0^*$ ($\mathbf{E}^*$ — комплексно-сопряженная величина).

В природной ситуации часто встречается воздействие электромагнитных волн широких спектров [31, 32]. Однако поскольку рассмотрение модуляционной неустойчивости широких спектров чрезвычайно сложно, то решение задач часто проводят, используя результаты исследования модуляционной неустойчивости монохроматической волны накачки, тем более что инкременты развития неустойчивости оказываются одного порядка.

В рассматриваемом в статье случае, когда $q_d > 0$, модуляционная неустойчивость развивается, когда [3]

$$\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} = \max \left(\frac{3}{8} \frac{C_{Sd} k}{v_e} \frac{\omega_0^2 v_e^2 + k^4 c^4}{k^2 c^2} \frac{\omega_0^2}{\omega_{pe}^4}, \frac{3 (\omega_{\chi e} + v_{en})^3}{8 v_e C_{Sd}^2 k^2} \frac{\omega_0^2 v_e^2 + k^4 c^4}{k^2 c^2} \frac{\omega_0^2}{\omega_{pe}^4} \right). \quad (2)$$

Здесь $C_{Sd} = |q_{d0} / e| \sqrt{n_d T_e / (n_e m_d)}$ — скорость пылевого звука, $k = |\mathbf{k}|$ — длина волнового вектора модуляционных возмущений, c — скорость света, $\omega_{\chi e} = \chi_e k^2 / 2$, $\omega_{\chi i} = \chi_i k^2 / 2$.

Для положительного заряда пылевых частиц частота низкочастотных возмущений, возбуждаемых в результате развития модуляционной неустойчивости при условии $\omega_{\chi e} \gg \Omega \gg C_{Sd} K$ дается выражением [33]

$$\Omega \sim \gamma \sim \left(\omega_0 \frac{C_{Sd}^2}{\chi_e} \frac{\omega_{pe}^4}{\omega_0^4} \right)^{1/2} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где γ — максимальный инкремент модуляционной неустойчивости.

В случае отрицательных зарядов частиц для пыли силикатного или железного происхождения в ночное время и для ледяных частиц в ситуации дня и ночи в отсутствии фотоэффекта модуляционное возбуждение пылевых звуковых низкочастотных возмущений частоты Ω характеризуется

инкрементом развития модуляционной неустойчивости

$$\Omega \sim \gamma \sim \left(\frac{v_e c^2}{\chi_e} \right)^{1/2} \frac{\omega_{pe}^6}{v_e \omega_0^5} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{3/2}. \quad (4)$$

Для плазменно-пылевых облаков на 60 и 100 км наблюдается относительно стационарная ситуация и следует ожидать, что даже на больших временных масштабах неустойчивость также будет развиваться. Нестационарность заключается в процессах седиментации частиц в облаках под действием гравитации. Данные процессы протекают достаточно медленно, и занимает время больше часа. Следовательно, на меньших временах можно ожидать развития модуляционной неустойчивости. Время развития неустойчивости определяется как $\tau = 1 / \gamma$. Для ситуации марсианских облаков следует ожидать раскачки неустойчивости в диапазоне порядка частот пылевых звуковых колебаний. Таким образом, с учетом вышеперечисленных факторов, для развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевыми звуковыми колебаниями, в условиях пылевых облаков атмосферы Марса инкремент неустойчивости должен принимать значения $\gamma = 10^{-1} - 10$ с $^{-1}$.

Вычисления для типичных параметров пылевой плазмы и атмосфере Марса и для волн накачки широкого спектра солнечного излучения в атмосфере Марса с амплитудой $E_0 = 0.01$ В/м дают следующие значения инкрементов модуляционной неустойчивости для данной ситуации для параметров пылевой плазмы марсианских облаков ($n_e = 10^4$ см $^{-3}$, $n_i = 10^4$ см $^{-3}$, $n_n = 10^{10}$ см $^{-3}$, $n_d = 1$ см $^{-3}$, $T_e = 0.01$ эВ, $T_i = 0.01$ эВ):

1) для $q_d > 0$ (силикатных частиц днем): $\omega_0 = 10^2$ с $^{-1}$, $\gamma = 10$ с $^{-1}$; $\omega_0 = 10^3$ с $^{-1}$, $\gamma = 1$ с $^{-1}$;

2) для $q_d < 0$ (ледяных частиц в любое время суток и силикатных частиц ночью): $\omega_0 = 10^5$ с $^{-1}$, $\gamma = 1$ с $^{-1}$; $\omega_0 = 10^4$ с $^{-1}$, $\gamma = 10$ с $^{-1}$.

5. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ ПРИ ПРОЛЕТЕ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

Для условий Земной ионосферы было показано, что модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с пылевой звуковой модой, может объяснить возникновение электрофонных звуков от пролета метеороидов в нижнем диапазоне частот. То, что данные звуки наблюдались одновременно с пролетом метеорных тел,

свидетельствует о связи электрофонных шумов с электромагнитными явлениями. Наблюдались также и электромагнитные низкочастотные шумы, сопровождающие пролеты метеороидов у поверхности Земли [12].

Приведем расчеты инкрементов неустойчивости для параметров плазменно-пылевых хвостов от пролета метеороидов в марсианской атмосфере. Характерные параметры хвостов метеороидов: концентрация электронов $n_{eTail} = 10^8 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$, ионов $n_{iTail} = 10^6 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$, нейтралов $n_{nTail} = 10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, пыли $n_{dTail} = 10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$, температура электронов хвоста $T_{eTail} = 0.1 - 1 \text{ эВ}$, ионов — $T_{iTail} = 0.1 - 1 \text{ эВ}$.

Зарядка пылевых частиц с учетом фототока и тока термоэлектронной эмиссии [10] с метеорного тела приводит к тому, что частицы в хвосте заряжаются положительно. Стоит отметить, что работа выхода металлов и силикатных частиц низка.

Вычисления для типичных параметров пылевой плазмы в атмосфере Марса и для широкого спектра частот солнечного излучения в атмосфере Марса дают следующие значения инкрементов модуляционной неустойчивости: $\gamma < 10 \text{ с}^{-1}$.

Для частиц с $q_d > 0$ метеорного вещества и диапазона волн накачки $\omega_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\gamma < 10 \text{ с}^{-1}$, в частности, при $\omega_0 = 10^3 \text{ с}^{-1}$ инкремент развития неустойчивости $\gamma < 15 \text{ с}^{-1}$ (расчеты производились для параметров плазмы $n_{eTail} = 10^8 \text{ с}^{-3}$, $n_{iTail} = 10^6 \text{ см}^{-3}$, $n_{nTail} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_{dTail} = 10^3 \text{ см}^{-3}$, $T_{eTail} = 1 \text{ эВ}$, $T_{iTail} = 1 \text{ эВ}$). Соответственно, времена развития неустойчивости для рассмотренных случаев $\tau < 0.1 \text{ с}$, что меньше времени жизни метеорного следа для слабых метеоров. В случае более длительных событий диапазоны частот, при которых имеет место развитие модуляционной неустойчивости электромагнитной волны в хвостах метеороидов, имеют более широкие пределы.

Пространственный инкремент модуляционной неустойчивости в рассматриваемых случаях принимает вид

$$\gamma_{space} = \frac{k^3 \lambda_{De}^2}{\omega_d} \left(1 + \frac{1}{k^2 \lambda_{De}^2} \right)^{3/2} \gamma. \quad (5)$$

Значения пространственного инкремента для характерных параметров пылевой плазмы марсианских облаков и плазмы хвостов метеороидов ($n_e = 10^4 \text{ см}^{-3}$, $n_i = 10^4 \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_d = 1 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0.01 \text{ эВ}$, $T_i = 0.01 \text{ эВ}$, $n_{eTail} = 10^8 \text{ см}^{-3}$,

$n_{iTail} = 10^6 \text{ см}^{-3}$, $n_{nTail} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_{dTail} = 10^3 \text{ см}^{-3}$, $T_{eTail} = 1 \text{ эВ}$, $T_{iTail} = 1 \text{ эВ}$) в случае характерных волновых векторов для марсианских облаков $k = 0.00001 \text{ см}^{-1}$: $\gamma_{space} = 50 \text{ см}^{-1}$, и в случае хвостов метеороидов для $k = 0.1 \text{ см}^{-1}$: $\gamma_{space} = 10^4 \text{ см}^{-1}$. В обоих рассматриваемых случаях выполняется условие развития модуляционной неустойчивости: $1 / \gamma_{space} = r$, где r — характерный пространственный масштаб задачи (для марсианских плазменно-пылевых облаков $r \sim 10^5 \text{ см}$, для хвостов метеороидов $r \sim 10 \text{ см}$. То есть значения пространственного инкремента в минус первой степени оказываются много меньше характерных пространственных масштабов задачи, что показывает возможность развития рассматриваемой модуляционной неустойчивости.

6. ВЫВОДЫ

Описан механизм возбуждения модуляционной неустойчивости электромагнитной волны, связанной с пылевой звуковой модой в атмосфере Марса, а именно, в пылевых облаках на высоте 60 и 100 км, где обнаруживается пылевая плазма с частицами из замерзшего углекислого газа. Показано, что развитие модуляционной неустойчивости обусловлено воздействием на пылевую плазму в атмосфере Марса высокочастотных электромагнитных волн как от природных источников (солнечное излучение, молниевые разряды), так и антропогенной природы (от оборудования с космических спутников и со станций на поверхности планеты). Развитие модуляционной неустойчивости в пылевой плазме марсианских облаков в свою очередь может объяснить возникновение низкочастотных шумов, регистрируемых на поверхности Марса. Данные шумы наблюдаются в диапазоне от 3 Гц — 3 кГц и до настоящего времени не дано однозначного объяснения природы их возникновения. Отмечается, что наблюдение данных шумов также может быть связано с пролетом метеорных тел и метеороидов в атмосфере Марса и увеличению в этой связи концентрации пыли в пылевой плазме метеороидных хвостов и пылевых облаках Марса. При этом показано, что время развития модуляционной неустойчивости в хвостах метеороидов в атмосфере Марса много меньше времени жизни метеорного следа, что свидетельствует о том, что можно ожидать активного развития данной неустойчивости в рассмат-

риваемой плазменно-пылевой системе. В свою очередь, в плазменных облаках на 60 и 100 км также может развиваться модуляционная неустойчивость электромагнитной волны, связанная с пылевой звуковой модой на временах меньших, чем нестационарные перестройки марсианских облаков. Найдены диапазоны частот солнечного излучения, приводящие к развитию модуляционной неустойчивости, связанной с пылевой звуковой модой в данных плазменно-пылевых системах. Обычно модуляционное взаимодействие рассматривают как некий выделенный процесс. В данной работе удалось показать, что эти шумы могут быть объяснены с помощью модуляционного взаимодействия, но мы не против того, что могут быть и другие процессы, однако более детальное изучение всех процессов требует отдельного рассмотрения и является предметом дальнейших исследований. Также предполагается, что в плазменно-пылевых системах Марса может возникать модуляционная неустойчивость, связанная с ионно-звуковой модой. Вопрос возможности развития данной неустойчивости является предметом дальнейшего исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попель С. И. Лекции по физике пылевой плазмы. М.: МФТИ, 2012. 160 с.
2. Gueymard C. // Solar Energy. 2004. V. 76. P. 423.
3. Альвен Х., Арпенуус Г. Эволюция солнечной системы. М.: Мир, 1979. 511 с.
4. Goertz C.K. // Rev. Geophys. 1989. V. 27. P. 271.
5. Drain B.T. Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium. Princeton Univ. press, 2011. 540 P.
6. Морозова Т.И., Гарасев М.А., Кузнецов И.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65. С. 1.
7. Морозова Т.И., Кузнецов И.А. // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2023. Т. 78. С. 2330802.
8. Haider, S.A., Pandya, B.M. // Geosci. Lett. 2015. V. 2. P. 8.
Doi: 10.1186/s40562-015-0023-2.
9. Бронштэн В.А. Метеоры. Метеориты. Метеороиды. М.: Наука. 1987.
10. Морозова Т.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 993.
11. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т.61. С. 794.
12. Trautner R., Koschny D., Witasse O., Zender J., Knöfel A. // Proceed. Asteroids, Comets, Meteors. ACM 2002. International Conference, 2002.
13. Morozova T.I. Popel S.I. // J. Phys.: Confer. Ser. 2021. V. 1787. P. 012052.
14. Kozakiewicz, J., Kulak, A., Kubisz, J., Zietara K. // Earth Moon Planets. 2016. V. 118. P. 103.
Doi: 10.1007/s11038-016-9493-2.
15. Vladimirov S.V., Tsytoich V.N., Popel S.I., Khakimov F.Kh. // Modulational Interactions in Plasmas. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1995.
16. Копнин С.И., Попель С.И., Минг Ю. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 323.
17. Борисов Н.Д., Копнин С.И., Попель С.И., Морозова Т.И. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С.346.
18. Morozova T.I., Koptin S.I., Popel S.I., Borisov N.D. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 033703.
19. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 867.
20. Морозова Т.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 42.
Doi: 10.31857/S0367292122601199.
21. Извекова Ю. Н., Попель С.И. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 1010.
22. Xu Sh., Thiemann Ed, Mitchell D., Eparvier F., Pawlowski D., Benna M., Andersson L., Liemohn M.W., Bougher S., Mazelle Ch. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 7382.
23. Fox J.L., Dalgarno A. // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 7315.
Doi: 10.1029/ja084ia12p07315.
24. Bertaux J.-L., Korabely O., Perrier S., Quemerais E., Montmessin F., Leblanc F., Lebonnois S., Rannou P., Lefèvre F., Forget F., Fedorova A., Dimarellis E., Reberac A., Fonteyn D., Chaufray J.Y., Guibert S. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. E10S90.
25. Bertaux J.-L., Fonteyn D., Korabely O., Chassefre E., Dimarellis E., Dubois, J.P., Hauchecorne A., Lefèvre F., Cabane M., Rannou P., Levasseur-Regourd A.C., Cernogora G., Quemerais E., Hermans C., Kockarts G., Lippens, C., de Maziere M., Moreau D., Muller C., Neefs E., Simon P.C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Moroz V.I., Rodin A., Sandel B., Stern A. // Mars Express: the scientific payload / Ed. A. Wilson. Eur. Space Agency Spec. Publ., 2004. ESA-SP 1240. P. 95.
26. Campbell M.J., Liesegang J., Riley J.D., Jenkin J.G. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1982. V. 15. P. 2549.
27. Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И. // Письма ЖЭТФ. 2023. Т. 117. С. 420.
28. Морозова Т.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 635.
Doi: 10.31857/S0367292122600406.

29. Морозова Т.И., Попель С.И. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 924.
Doi: 10.31857/S0367292122600777.
30. Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. М.: Гидрометеиздат, 1989. 264 с.
31. Popel S.I., Tsytovich V.N., Vladimirov S.V. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. P. 2176–2188.
32. Попель С.И. // Физика плазмы. 1998. Т. 24. С. 1093.
33. Popel S.I., Elsasser K. // Comments Plasma Phys. Cont. Fusion. 1994. V. 16. P. 79.

MODULATIONAL INSTABILITY OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON MARS ASSOCIATED WITH DUST ACOUSTIC MODE

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*

It is assumed that the low-frequency noise recorded on the surface of Mars may be associated with a charged dust component in its atmosphere and the occurrence of sound perturbations in such a dust system that modulate the electromagnetic wave from the Sun. It is also shown that it can be associated with plasmadust processes in meteoroid tails. The mechanism for the excitation of modulational instability of an electromagnetic wave associated with a dust acoustic mode in the Martian atmosphere, namely in dust clouds at an altitude of 60 and 100 km, where the dusty plasma with particles of frozen carbon dioxide is detected, is described. It is shown that the development of modulational instability is due to the influence of high-frequency electromagnetic waves on the dusty plasma in the Martian atmosphere from both natural sources (solar radiation, lightning discharges) and anthropogenic nature (from equipment from space satellites and from stations on the surface of the planet). The parameters of electromagnetic pump waves, at which the active development of modulational instability of electromagnetic waves associated with the dust acoustic mode is expected, and the modulational instability growth rates are found. The development of the modulational instability in the dusty plasma of Martian clouds, in turn, can explain the occurrence of low-frequency noise recorded by equipment on the surface of Mars. The relation between observed radio noise in the range of 3 Hz – 3 kHz and plasma-dust processes in the Martian atmosphere, in particular, in dust clouds at 60 and 100 km, as well as in dusty plasma meteoroid tails, where the dust concentration is high, is discussed.

Keywords: dusty plasma, Martian atmosphere, meteoroid tails, modulational instability, Martian dust clouds, dust sound