

ПРОЯВЛЕНИЯ МОДУЛЯЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ, ВКЛЮЧАЯ ХВОСТЫ МЕТЕОРОИДОВ¹

© 2023 г. Т. И. Морозова^a, *, С. И. Попель^a

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: timoroz@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.

После доработки 15.09.2022 г.

Принята к публикации 01.10.2022 г.

Описан механизм модуляционного взаимодействия различных волновых мод в хвостах метеороидов. Модуляционная неустойчивость различных мод колебаний может приводить к возникновению ряда наблюдательных эффектов в метеороидных хвостах таких, как электрофонные шумы. В частности, это может быть модуляционная неустойчивость электромагнитных волн от ударной волны метеороида, связанная с пылевой звуковой модой, а также модуляционная неустойчивость нижнегибридных и ленгмюровских волн. В первом случае могут рождаться волны, которые потом преобразуются в звуковые, когда дойдут до поверхности Земли. В двух последних случаях могут возникать магнитные поля, величины которых сравнимы с наблюдаемыми магнитными полями во время экспериментов с магнитометрами, а также распространяться поперечные электромагнитные колебания, которые, достигая поверхности Земли, могут восприниматься как электрофонные шумы, слышимые одновременно с пролетом метеороидов. Рассматривается влияние вспышек метеоров на параметры пылевой плазмы хвостов метеороидов в зависимости от высоты пролета метеорных тел. Оценены характерные концентрации пылевых частиц в хвостах метеороидов во время вспышек от высоты. Показано на примере модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевой звуковой модой, как концентрация пылевых частиц, увеличенная во время вспышек, будет влиять на величину инкрементов неустойчивости и условия ее развития.

Ключевые слова: метеороиды, метеороидный след, плазменно-пылевые процессы, пылевая плазма, дробление метеорного тела, электрофонные звуки, пылевые частицы в атмосфере Земли, модуляционное взаимодействие, ленгмюровские волны, нелинейные процессы

DOI: 10.31857/S0367292122601199, EDN: BFXQUE

ВВЕДЕНИЕ

Отдельное место в физике метеорных явлений занимает рассмотрение электромагнитных эффектов, связанных с пролетами метеороидов. В частности, возникновение электрофонных звуков. Пролеты метеороидов являются труднопрогнозируемыми и не зависящими от человека природными явлениями и изучение процессов, связанных с ними, является актуальной и не до конца изученной задачей. Физические явления и эффекты, возникающие в результате пролетов метеороидов, могут оказывать влияние на работу радиолокационных систем, радиотелескопов, приборов геолокации и экспериментов пролетных ракет, что важно при учете работы вышеперечисленных систем и устранения их сбоев.

Пылевая плазма метеороидных хвостов содержит в себе электроны и ионы метеорного вещества и атмосферных газов, нейтралы и пылевые частицы, отделенные от метеорного тела. Следует отметить, что метеороид, или метеорное тело — это непосредственно летящее тело (вне атмосферы или внутри ее), а метеор — это явление, которое сводится к свечению паров метеороида.

Столкновение метеорного тела с молекулами воздуха вызывает их ионизацию и ионизацию выбитых атомов метеорного вещества при влете метеорных тел в атмосферу Земли. К процессам абляции метеороида относятся плавление, испарение и дробление. Чем больше скорость и плотность метеорного тела, тем больший вклад дает испарение по отношению к плавлению, которое наблюдается в основном на нижних высотах атмосферы. Остывание расплавленных струй и конденсация испарившегося метеорного вещества наблюдаются в конце хвоста метеороида, где температура резко падает. Когда давление на ме-

¹ Доклад “Some aspects of modulational interaction in earth’s dusty ionosphere including dusty plasmas of meteor tails” был сделан на 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia, May 23–27, 2022).

теорное тело превышает прочностные характеристики метеорного вещества, происходит дробление метеороида. Это может возникать на краях метеорного тела, где велики касательные напряжения, создаваемые в результате воздействия давления ударной волны в головной части хвоста метеороида, а также в местах плавления метеорного вещества и возникновения термических напряжений. Для первого случая часто происходит непрерывное дробление, когда постоянно отшелушиваются мельчайшие фрагменты метеорного тела. Во второй ситуации, в основном во время вспышек метеоров, которые наблюдаются на высотах 72–100 км с пиком на 92 км, отлетают значительные фрагменты метеорного вещества, которые в дальнейшем могут испытывать прогрессивное дробление.

Характерные параметры пылевой плазмы хвостов метеороидов в зависимости от высоты пролета метеорных тел: концентрация электронов $n_e = 10^9 - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, ионов — $n_i = 10^8 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и пылевых частиц $n_d = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ и более во время вспышек и температурой хвоста от 0.1–10 эВ. Размеры пылевых частиц варьируются от долей микрометров до нескольких десятков микрометров [1]. Механизмы зарядки пылевых частиц в хвостах метеороидов следующие — налипание электронов и ионов на пылевые частицы, термоэлектронная эмиссия, механоэмиссия.

Метеорная пыль также влияет и на процессы, происходящие во всей ионосфере Земли на высотах 80–120 км, где она задерживается на длительное время. Основными источниками такой пыли являются метеорные потоки (Персеиды, Леониды, Ориониды и другие). В такой плазменно-пылевой системе могут также возникать различные волновые процессы, в частности, возбуждаться пылевые звуковые волны и при определенных условиях будет развиваться модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с пылевой звуковой модой. Однако на высотах 80–90 км она будет подавлена столкновениями пыли с нейтралами, концентрация которых высока в земной ионосфере [4]. Было также показано, что неупругие столкновения нейтралов с электронами и ионами не оказывают влияния на развитие модуляционной неустойчивости. Параметры запыленной ионосферы следующие: температура электронов в зависимости от высоты и времени дня составляет 180–400 К, концентрация электронов $10^3 - 10^5 \text{ см}^{-3}$, концентрация нейтралов $10^{12} - 3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, концентрация пылевых частиц варьируется до 10^{-4} см^{-3} , что на несколько порядков меньше, чем в хвостах метеороидов.

Поведение пылевой плазмы хвостов метеороидов и учет электрических и магнитных полей важны для понимания процессов, происходящих

при вторжении метеорных тел в атмосферу Земли, и их последствий, влияющих на природу и человека.

Ключевой задачей исследования является взаимодействие хвостов с ионосферной пылевой плазмой. Ранее было показано, что при взаимодействии хвоста метеороида и пылевой плазмы ионосферы Земли наблюдается генерация различных волн и при определенных условиях развивается их модуляционная неустойчивость. Наблюдаемые явления, такие как возникновение электрофонных шумов от пролета метеороидов, инфразвуковые колебания, зеленое свечение неба и возникновение неоднородностей плотности удается объяснить [2–5] посредством развития модуляционной неустойчивости в земной ионосфере. Однако важной задачей для исследования является генерация магнитных полей при пролете метеороидов в атмосфере Земли.

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 [6].

Метеорные тела, влетая в атмосферу Земли создают возмущения магнитного поля, что выявлялось в наблюдениях с магнитометров. Величины магнитных полей, которые при этом возникают, имеют значения $(0.01 - 0.1) \times 10^{-5} \text{ Гс}$ [7–9]. Из магнитограмм вертикальной составляющей геомагнитного поля были сделаны выводы, что появление хвоста метеороида по радионаблюдениям совпадает с временем наблюдения магнитных импульсов. В более поздних работах приводятся вариации магнитных полей во время пролетов метеороидов со значениями вплоть до $\delta B = 10^{-4} \text{ Гс}$ [10]. Стоит также учитывать внешнее магнитное поле Земли, которое также влияет на процессы, происходящие в хвостах метеороидов.

В плазме хвостов метеороидов может возбуждаться ряд волновых мод. Нижнегибридные волны возбуждаются в результате развития неустойчивости ввиду относительного движения плазмы хвоста метеороида и пылевой плазмы ионосферы Земли [11]. При взаимодействии хвоста метеороида и плазмы ионосферы могут развиваться турбулентные процессы, приводящие в конечном итоге к возбуждению ленгмюровских колебаний [12]. В условиях развития турбулентности в плазме в результате нелинейных взаимодействий наиболее эффективно возбуждаются именно ленгмюровские волны [13].

Структура статьи следующая: в 1 разд. рассматривается модуляционная неустойчивость электромагнитных волн в хвостах метеороидов, в следующем разд. изучается влияние вспышек метеоров на модуляционную неустойчивость электромагнитных волн в метеороидных хвостах, в 3 разд. рассматривается модуляционная неустойчивость нижегибридных волн и модуляционное взаимодействие ленгмюровских волн. В четвертом разделе обсуждается влияние модуляционной неустойчивости всех упомянутых волновых мод в рассматриваемой плазменно-пылевой системе на возникновение электрофонных шумов от пролета метеороидов. В последнем разд. приведены результаты и выводы.

1. МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

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 $\mathbf{K}_{\pm} = \mathbf{k} \pm \mathbf{K}_0$; ω_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; $\mathbf{E}_{+} = \mathbf{E}$, $\mathbf{E}_{-} = \mathbf{E}^*$, $\mathbf{E}_{0+} = \mathbf{E}_0$, $\mathbf{E}_{0-} = \mathbf{E}_0$ (* — комплексно-сопряженная величина).

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

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

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 [14]

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

где Γ — максимальный инкремент модуляционной неустойчивости, ω_{pe} — плазменная электронная частота.

Отметим, что в данной работе выражения, характеризующие развитие модуляционного взаимодействия в запыленной ионосфере, приведены для дальнейшего рассмотрения эффектов, возникающих при взаимодействии хвостов метеороидов с ионосферной пылевой плазмой. Однако схожий подход возможно использовать и при анализе эффектов, возникающих при радарном зондировании ионосферы [15, 16] или же при взаимодействии с ионосферой метеорных потоков [см., например, 17].

2. ВСПЫШКИ МЕТЕОРОВ

В [1] показано, что главный пик вспышек приходится на высоту 92 км. Более того, вспышки и связанное с ними дробление метеорного тела зависят от состава и конфигурации метеорного тела, от его скорости и угла входа в атмосферу Земли. Чем быстрее метеор, тем позже на его пути возникают вспышки. Возможно, у медленных метеорных тел скорее происходит плавление, чем испарение и изменение прочностных характеристик приводит к вспышкам. Самые мощные вспышки случаются при уже достаточном разогреве метеорного тела. Наблюдаются разные формы взрывов метеорных тел из-за их разных форм и составов. В том числе, из-за особенностей строения метеорного тела и комбинаций легкоплавких включений. Чем ниже высота пролета метеороида, тем больше разогревается метеорное тело и тем больше вероятность и частота вспышек.

При постоянном разрушении метеорного тела в основном в процессе шелушения отделяются частицы с размерами 100 мкм–1 мм [1]. При плавлении и остывании струй в хвостах метеороидов образуются достаточно крупные пылевые частицы, которые имеют не очень большую концентрацию. В [18] показано, что во время вспышек метеоров отделяются частицы меньшего размера порядка 80–120 мкм.

Исходя из формулы для скорости пылевого звука и формулы (3), чем больше концентрация пылевых частиц и меньше их радиус, тем больше инкремент модуляционной неустойчивости и, соответственно, за меньшее время успевает раз-

Таблица 1. Параметры пылевой плазмы хвостов метеороидов и величины, характеризующие развитие модуляционной неустойчивости электромагнитных волн в хвостах метеороидов (концентрации и температуры приведены для расстояния более 40 м от метеорного тела) для метеорного тела радиусом 5 см и скоростью 40 км/с с учетом вспышек на характерных высотах [20]

h , км	T_e , эВ	T_n , эВ	n_n , см $^{-3}$	n_d , см $^{-3}$	n_e , см $^{-3}$	K_{ch} , см $^{-1}$	C_{sd}/λ_d , с $^{-1}$	Γ , с $^{-1}$	$v_{dn}/2$, с $^{-1}$
80	2	0.01	10^{16}	10^8	5×10^{14}	10^4	5×10^5	240	18
90	1	0.015	10^{15}	2×10^9	10^{13}	5×10^3	2×10^4	360	2
100	0.8	0.019	10^{14}	4×10^7	10^{12}	1.7×10^3	6×10^4	15	0.21
110	0.6	0.02	10^{13}	10^7	10^{10}	2×10^3	5×10^3	9	0.025
120	0.4	0.026	10^{12}	10^6	10^8	33	1.5×10^4	2.4	0.003

виться неустойчивость. На нижних высотах модуляционная неустойчивость оказывается не подавленной столкновениями пыли с нейтрами в случае учета вспышек метеоров в отличие от ситуации без вспышек [2]. Важны интенсивность вспышек и частота (т.е. сколько вещества и как часто отделяется от метеорного тела). Чем мощнее вспышка, тем больше пылевых частиц образуется в хвосте. Самые высокие концентрации пылевых частиц достигаются непосредственно у метеорного тела. На удалении от хвоста концентрации пыли будут иметь значительно более низкие значения порядка 10^4 см $^{-3}$, в связи с чем модуляционная неустойчивость развиваться не будет.

В процессе вспышек образуются как довольно крупные осколки, так и мелкие частицы, которых в сумме больше. Если во время вспышки сбрасывается масса вещества порядка 1 г, раздробленная на частицы размером 100 мкм, то концентрация пылевых частиц в головной части хвоста будет $n_d = 2 \times 10^{19}$ см $^{-3}$ для тела размером 1 см и радиуса метеорного следа 1 м. Следует допустить и больших возможных размеров частиц. Данные осколки также могут испытывать последующее дробление, о чем свидетельствует регистрация более мелких вспышек. Однако такие тела будут замедляться и не так интенсивно дробиться. Из данных, приведенных в табл. 1 можно заключить, что модуляционная неустойчивость успевает развиваться на более низких высотах сравнительно с ситуацией без вспышек, рассмотренной в работе [19].

3. МОДУЛЯЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ И НИЖНЕГИБРИДНЫХ ВОЛН

В случае развития модуляционной неустойчивости ленгмюровских волн фурье-представление вариаций магнитного поля будет иметь вид [21]

$$\delta \mathbf{B} = \frac{iec}{m_e \omega_{pe}} \int \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}^2 c^2 - \omega^2 \epsilon} \mathbf{E}_2^+ \times \mathbf{E}_3^- d_{2,3}. \quad (4)$$

Здесь E — напряженность электрического поля, $\mathbf{k}$ — волновой вектор, ω — частоты волны накачки. Индексы “+” и “−” относятся к высокочастотному и низкочастотному полям соответственно. Отсюда можно найти характерные значения вариаций магнитного поля в хвостах метеороидов.

Амплитуда вариации магнитного поля в хвостах метеороида примет вид [21]

$$\Delta \delta B = \frac{ie \Delta(\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*)}{m_e c \omega_{pe}}, \quad (5)$$

где $\mathbf{E}^*$ — комплексно-сопряженное значение напряженности электрического поля. Для типичных параметров пылевой плазмы хвостов метеороидов ($T = 1$ эВ, $n_e = 10^{11} - 10^{13}$ см $^{-3}$, $\omega_{pe} = 10^{10} - 10^{11}$ с $^{-1}$) вычисления дают значения $\delta \mathbf{B} = 5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-6}$ Гс. Для более ярких метеороидов с плотными метеороидными хвостами можно ожидать возникновения вариаций магнитных полей со значениями до $\delta \mathbf{B} = 10^{-4}$ Гс, что соответствует максимально наблюдаемым величинам магнитных полей в хвостах метеороидов [7–10].

Вариации магнитного поля, возникающие при модуляционной неустойчивости нижнегибридных волн [21, 22]

$$|\delta B| \sim \frac{\omega_{peM}^2}{\omega_0^2} \frac{|\mathbf{E}|^2}{|\mathbf{B}_0|} \cos \theta_0, \quad (6)$$

что дает значения $\delta \mathbf{B} = 10^{-4} - 10^{-5}$ Гс для типичных параметров пылевой плазмы хвостов метеороидов.

Таким образом, магнитные поля, создаваемые в хвостах метеороидов в результате развития модуляционной неустойчивости нижнегибридных волн и в результате модуляционного взаимодействия ленгмюровских волн согласуются с наблюдаемыми величинами вариаций магнитных полей по измерениям магнитометров во время пролета метеорных тел звездных величин до +5 [7–10]. Это соответствует метеорным телам, большим по

размеру 2 мм. Именно метеорные тела данных размеров интересны для изучения рассматриваемых процессов, так как они не полностью сгорают в атмосфере и успевают образовать метеорный хвост.

4. ЭЛЕКТРОФОННЫЕ ЗВУКИ ПРИ ПРОЛЕТЕ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

Ранее было показано, что в случае метеорных потоков, когда не однозначно определяется одновременность звуков, модуляционная неустойчивость может объяснять возникновение электрофонных шумов одновременно с пролетом метеороидов [3, 22].

Электрофонные шумы представляют собой низкочастотные колебания, которые регистрируются одновременно с пролетом метеороидов. Низкочастотные электромагнитные волны могут быть преобразованы в звуковые у поверхности Земли посредством различных приемников и выпрямителей [22] или в результате нагрева предметов и теплопроводности [26]. Также была показана возможность существования модуляционной неустойчивости от отдельных метеороидов [5] с возможным возникновением электрофонных шумов.

Электромагнитные волны от метеорного следа распространяются как поперечные модулированные пылевым звуком волны и могут достигать поверхности Земли одновременно с падением метеорных тел. Модуляционная неустойчивость приводит к низкочастотным возмущениям в широком диапазоне частот. Если в результате этого одни из возмущений стали волнами, т.е. приобрели закон дисперсии, то они могут распространяться далее в ионосфере и достигать поверхности Земли. Однако параметры системы должны быть такими, чтобы она это поддерживала. Если корреляция между фазами волн мала, то волны независимы и достигается состояние слабой турбулентности. Уширение спектра может происходить за счет дисперсии или нелинейности. Если последнее, то низкочастотные возмущения могут стать волнами. Например, солитон может нести информацию о низкочастотном шуме в форме солитон-огигающей.

Полученные значения вариаций магнитного поля δB для ленгмюровских и нижнегибридных волн характеризуют квазистационарные возмущения магнитного поля, которые могут наблюдаться в ионосфере. Однако возможна ситуация, когда ω и k , описывающие фурье-компоненту δB , связаны между собой законом дисперсии электромагнитных волн. В этой ситуации δB характеризует вектор магнитного поля электромагнитной волны, которая распространяется в атмосфере Земли и может достигать ее поверхности, где воз-

можна ее трактовка как электрофонных шумов, имеющих метеорное происхождение [23–27].

ВЫВОДЫ

Модуляционное взаимодействие ленгмюровских и нижнегибридных волн, возбуждаемых при определенных условиях в хвостах метеороидов, приводит к возникновению вариации магнитных полей, сравнимых по величине с магнитными полями, наблюдаемыми магнитометрами во время пролетов метеорных тел.

Модуляционная неустойчивость волн в хвостах метеороидов может объяснить электрофонные звуки от пролета метеорных тел.

Рассмотрено влияние вспышек метеоров на возникновение модуляционной неустойчивости электромагнитных волн в хвостах метеороидов, связанной с пылевой звуковой модой, чего не было сделано ранее. Показано, что модуляционная неустойчивость успевает развиться на более низких высотах сравнительно с ситуацией без вспышек, рассмотренной в работе [22].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: “Наука”, 1981. 416 с.
2. *Борисов Н.Д., Копнин С.И., Попель С.И., Морозова Т.И.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 346.
3. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 993.
4. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I., Borisov N.D.* // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 033703.
5. *Morozova T.I., Popel S.I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1787. P. 012052.
6. *Бронштэн В.А.* Метеоры. Метеориты. Метеороиды. М. Наука. 1987.
7. *Калашиников А.Г.* // ДАН СССР. 1949. Т. 66. С. 373.
8. *Калашиников А.Г.* // Известия АН СССР. Сер. Геофизика. 1952. № 6. С. 7.
9. *Зевакина Р.А.* // Труды НИИЗМ. 1953. № 9 (19). С. 46–81.
10. *Черногор Л.Ф.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. С. 375.
11. *Морозова Т.И., Попель С.И.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 635.
12. *Цытович В.Н.* Теория турбулентной плазмы. М.: Атомиздат. 1971. 424 с.
13. *Цытович В.Н.* // УФН. 1966. Т. 90. С. 435.
14. *Popel S.I., Elsasser K.* // Comments Plasma Phys. Cont. Fusion. 1994. V. 16. P. 79.
15. *Stenflo L.* // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 5355.
16. *Stenflo L., Shukla P.K., Yu M.Y.* // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 11369.

17. *Kopnin S.I., Popel S.I., Yu M.Y.* // *Phys. Plasmas*. 2009. V. 16. P. 063705.
18. *Simonenko A.N.* // *Physics and Dynamics of Meteors* / Eds. L. Kresak, P.M. Millman. Dordrecht: D. Reidel Publishing company. 1968. P. 207.
19. *Tsytoich V.N., Bel'kov S.A.* // *Comments Plasma Phys. Cont. Fusion*. 1980. V. 5. P. 219.
20. *Мишин В.А., Ружин Ю.Я., Телегин В.А.* Взаимодействие электронных потоков с атмосферной плазмой. М.: Гидрометеиздат. 1989. 264 с.
21. *Vladimirov S.V., Tsytoich V.N., Popel S.I., Khakimov F.Kh.* *Modulational Interactions in Plasmas*. Dordrecht—Boston—London: Kluwer Academic Publishers, 1995. 539 p.
22. *Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И.* // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61. С. 794.
23. *Keay C.S.L.* // *Science*. 1980. V. 210. P. 11.
24. *Verveer A., Bland P.A., Bevan A.W.R.* // 63rd Annual Meteoritical Society Meeting. 2000.
25. *Zgrablic G., Vinkovic D., Gradečak S., Kovačić D., Biliskov N., Grbac N., Andreić Ž., Garaj S.* // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. S1A 11-1-S1A 11-9. <https://doi.org/10.1029/2001JA000310>
26. *Trautner R., Koschny D., Witasse O., Zender J., Knöfel A.* // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2002. International Conference*. 2002.
27. *Spalding R., Tencer J., Sweatt W., Conley B., Hogan R., Boslough M., Gonzales G., Spurný P.* // *Sci. Reps.* 2017. V. 7. P. 41251. <https://doi.org/10.1038/srep41251>