

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРОИДА

И.Х. Ковалева, А.Т. Ковалев, С.И. Попель, О.П. Попова

Рассмотрены электромагнитные возмущения различной природы и масштаба, сопровождающие падения метеороидов. Предложен новый механизм генерации электромагнитного сигнала в диапазоне частот от Гц до кГц при таких падениях. Проанализированы особенности падения Челябинского метеороида. Проведены оценки возмущений параметров ионосферной плазмы и характеристики электромагнитных сигналов, которые могут быть зарегистрированы на Земле или спутниками.

Введение

При оценке возмущений, сопровождающих падения метеороидов, как правило, ориентируются на два различных типа экспериментальных данных, к которым относятся: 1 – оптические и радарные наблюдения, 2 – дистанционные измерения акустических возмущений и электромагнитных полей. На основе данных 1-го и 2-го типов проводится оценка возмущений, различающихся по масштабу на несколько порядков величины, представляющих собой по сути локальный и масштабный отклики на данное возмущение. При рассмотрении электромагнитных эффектов, сопровождающих падения метеороидов, традиционно основное внимание уделяется эффектам, которые могут возникнуть вблизи падающего тела или в его следе. Рассматривается локальная область сильного возмущения, регистрируются её параметры, строятся в ней модели генерации электромагнитных возмущений ELF-VLF частотного диапазона [Keay, 1992a; Beech et al., 1995; Price and Blum, 2000; Jenniskens, 1996], и/или электрофонных шумов (сигналов, приходящих к Земле в виде электромагнитного возмущения и возбуждающих у поверхности Земли вторичное звуковое возмущение на частотах электромагнитного шума) [Keay 1980a,b; Kaznev, 1994; Keay, 1994; Keay and Cepelcha, 1994; Vinkovic' et al., 2000; Zgrablic' et al., 2002]. Состояние нижней ионосферы, как среды, в которой происходит основное взаимодействие метеороида с веществом, как правило, не анализируется. Наличие или отсутствие регистрации того или иного вида электромагнитного сигнала не связывается с состоянием среды. Работы, посвящённые нелокальным возмущениям ионосферы, сопровождающим падение метеороида, связаны с возмущением ионосферы акусти-

ческой волной, приходящей из точки взрывного распада метеороида. При этом существующие теории не могут объяснить многие свойства низкочастотных электромагнитных сигналов и электрофонных шумов. В качестве объяснения предлагается взаимодействие геомагнитного поля с турбулентной плазмой, образующейся в головной части метеороида (это объяснение подходит только для метеороидов, спускающихся на низкие высоты) [Bronshen 1983] или формированием сигнала в процессе взрыва [Keay, 1992b], разделение зарядов при прохождении ударной волны через ионизованную метеороидом плазму [Beech and Foschini, 1999]. Также предлагается модель зарядки метеороида в процессе абляции [Bronshen, 1991]. Высказывались предположения о возможном наличии нескольких механизмов формирования электромагнитного сигнала от метеороидов. Это связано в частности с тем, что иногда электромагнитный сигнал приходит раньше времени максимального свечения и, следовательно, источник электромагнитного шума возникает в ионосфере во время прохождения метеороида (например, [Price and Blum, 2000; Zgrablic' et al., 2002]). В данной работе сделана попытка проанализировать возможные ионосферные источники электромагнитных шумов и определить их параметры. Анализируется возможность генерации геофизических возмущений как в локальной области, так и на больших по сравнению с размером метеороида и его следа ионосферных масштабах. В качестве нового механизма формирования возмущения предлагается фотоионизация области высот ионосферы, содержащей легкоионизируемые молекулы NO. Электромагнитный шум в этом случае возникает в результате возбуждения ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых волн на градиентах концентрации ионов NO⁺ [Ковалева 2012, 2013] и магнитозвуковой волны. Электромагнитные возмущения нижней ионосферы рассматриваются как возмущения среды, находящейся вблизи положения локального равновесия при учете пространственного распределения концентраций ионов, соответствующих данному времени суток. Это распределение определяет направление распространения электромагнитных шумов и, следовательно, области, где возможна их наземная регистрация. Работа построена следующим образом: в первом разделе рассмотрены параметры локального возмущения плазмы в следе метеороида. Во втором разделе – возможные параметры нелокального возмущения, формирующегося по механизму фотоионизации. В третьем разделе рассмотрены возможные нелокальные механизмы возбуждения в ионосфере волн различной природы. Проведены оценки частотных диапазонов формирующихся электромагнитных сигналов.

Формирование локального возмущения. Пылевая плазма

Локальные источники электромагнитных возмущений это: область в головной части движущегося метеороида, формирующийся метеорный след и происходящие в нём плазменные процессы, электромагнитные возмущения, сопровождающие акустическую волну, возникающую в точке взрывного развала метеорного тела. Метеорное вещество поступает в атмосферу в форме свободных атомов и мелкодисперсных пылевых частиц [Rosinski, Snow, 1961; Hunten, Turco, Toon 1980]. Считается, что мелкодисперсные пылевые частицы формируются в следе метеороида в результате конденсации испаренного вещества. По-видимому, абляция метеороидов является единственным источником для формирования слоев свободных металлов (например, Na, Fe, Ca, K), которые существуют в атмосфере [von Zahn, Gerding, Höffner, 1999]. Указанные слои наблюдаются в широких полосах, посто-

янно присутствующих в атмосфере на высотах 80–110 км, а также в так называемых спорадических металлических слоях, представляющих собой узкие нерегулярные слои, расположенные обычно на высотах более 90 км [Clemesha 1995; Gerding, Alpers, Höffner, von Zahn, 2001]. Для быстрых метеороидов, имеющих скорости более 30 км/с, их абляция происходит преимущественно в высотном диапазоне 90–105 км. Однако типичные метеорные следы (хвосты) начинают формироваться на высотах около 130 км. Для более медленных метеороидов, со скоростями меньшими 30 км/с, абляция происходит в высотном диапазоне от 75 до 90 км.

Для больших метеороидов существуют визуальные наблюдения, показывающие, что метеорные пылевые следы появляются сразу же после его прохождения. Возможные механизмы эволюции и распада локального метеорного следа, формирования металлических слоёв находятся в стадии изучения.

Возможное воздействие пыли на диффузию метеорных следов до сих пор не исследовалось. Ряд наблюдений [Spurny, Betlem, Jobse, et al., 2000; Borovicka, Stork, Bossek, 1999] указывают на то, что некоторые метеоры состоят из металлических или силикатных мелкодисперсных частиц, скрепленных материалами, имеющими низкие точки кипения. Анализ неустойчивостей затруднён неопределенностями в отношении распределений частиц по размерам и химическому составу. Результирующие значения концентрации образованных мелкодисперсных пылевых частиц в стационарном состоянии в области мезопаузы оцениваются следующим образом: $n_d \gg 10^3 \text{ см}^{-3}$ для частиц с размерами $r_d \sim 1 \text{ нм}$ и $n_d > 10^4 \text{ см}^{-3}$ для частиц с размерами $r_d \sim 0,5 \text{ нм}$ [Hunten, Turco, Toon, 1980]. Непосредственные наблюдения мелкодисперсных частиц в тропической мезосфере [Gelinas, Lynch, Kelley, 1998] дают концентрации мелкодисперсных частиц, не превосходящие нескольких десятков частиц в см^{-3} . Они наблюдаются в слое толщиной около 5 км с положительно заряженными частицами на высотах выше $\sim 90 \text{ км}$ и отрицательно заряженными пылинками на высотах ниже $\sim 90 \text{ км}$.

Для Челябинского метеороида, характеризующегося энергетическим эквивалентом 300–500 кт ТНТ, диаметром от 16 до 19 м, скоростью 18–19 км/с, углом входа по отношению к горизонту 15–17° [см. Попова и др., настоящий сборник] можно сделать следующие выводы.

1) При входе Челябинского метеороида в атмосферу абляция начинается на высотах, не превосходящих $\sim 90 \text{ км}$. Основные плазменные процессы вблизи него и в следе происходят в мезосфере (а не в термосфере), то есть фоновая температура электронов в ионосфере $T_e \sim 300 \text{ К}$, соответствующая тепловая скорость электронов $v_{Te} \sim 50 \text{ км/с}$. Тепловая скорость электронов превосходит скорость метеороида. Следовательно, метеороид увлекает за собой плазму со скоростью, меньшей v_{Te} . Поскольку область абляции метеороида может пересекаться с областью существования мелкодисперсных пылевых частиц в мезосфере, движение увлекаемой метеороидом плазмы относительно фоновой плазмы может приводить к возникновению неустойчивостей типа ионно-звуковой, приводящих к генерации ионно-звуковых волн. Закон дисперсии ионного звука в присутствии пылевых частиц следующий:

$$\omega_k \approx \frac{|\mathbf{k}| c_s \sqrt{n_i/n_e}}{\sqrt{1 + |\mathbf{k}|^2 \lambda_{De}^2}},$$

где $c_s = \sqrt{T_e/m_i}$, $n_{e(i)}$ – концентрация электронов (ионов), λ_{De} – дебаевский радиус электронов. Что даёт оценку частотного диапазона $5 \cdot 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Сомнительно, что возбуждаются пылевые звуковые волны, поскольку тепловая скорость ионов плазмы $v_{Ti} \sim 1 \text{ км/с}$ вряд ли будет превышать скорость относитель-

ного движения плазмы (имеющей в нулевом приближении порядок скорости движения метеороида, то есть 18–19 км/с). Хотя, возможно, что будут существовать некоторые области, где скорость относительного движения плазмы будет меньше, чем скорость v_{Ti} , но при этом будет превышать тепловую скорость пылевых частиц. В этом случае за счет развития пылевой звуковой неустойчивости возможно возбуждение пылевого звука с законом дисперсии

$$\omega_k \approx \frac{\omega_{pd} |\mathbf{k}| \lambda_D}{\sqrt{1 + |\mathbf{k}|^2 \lambda_D^2}}, \sim 0 \div 50 \text{ с}^{-1},$$

где $\omega_{pd} = \sqrt{4\pi Z_d^2 e^2 n_d / m_d}$ – пылевая плазменная частота, Z_d – зарядовое число пылевой частицы (для рассматриваемой ситуации пыль из-за малого размера однозарядна, то есть $|Z_d| = 1$), m_d – масса пылевой частицы, n_d – концентрация пылевых частиц, $\lambda_D^{-2} = \lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}$, λ_{Di} – дебаевский радиус ионов [Popel, 1997].

2) В случае Челябинского метеороида метеорная пыль может так или иначе влиять на амбиполярную диффузию (см., например, для лабораторной плазмы [Losseva, Popel, Yu, Ma, 2007], увеличение концентрации пыли приводит к уменьшению диффузионной длины). При входе в атмосферу Челябинского метеороида абляция начинается на высотах, не превосходящих ~90 км. В этом случае из-за интенсивных электрон-нейтральных столкновений диффузия электронов поперек поля равна диффузии ионов поперек поля. Как следствие, нет аномальной диффузии, и основные диффузионные процессы связаны с амбиполярной диффузией.

Крупномасштабное ионизационное возмущение, формирующееся в результате фотоионизации

Необходимо отметить, что кроме прямого воздействия на ионосферу пролетающего метеороида, возникает пятно возмущения за счёт его излучения. Эта область возмущения имеет гораздо меньшую амплитуду, но значительно больший масштаб. При своём движении метеороид проходит слой ионосферы, содержащий легкоионизируемую компоненту нейтральной части среды – молекулы NO. Интерес к этой малой составляющей нейтральной ионосферы возрос в последние годы так как выяснилось, что благодаря низкому порогу фотоионизации эти молекулы играют существенную роль как в процессах ионизации на высотах порядка 100 км, так и в процессах энергообмена [Bailey, Barth, 2002; Barth, Bailey, 2004; Hedin, Rapp, Khap-

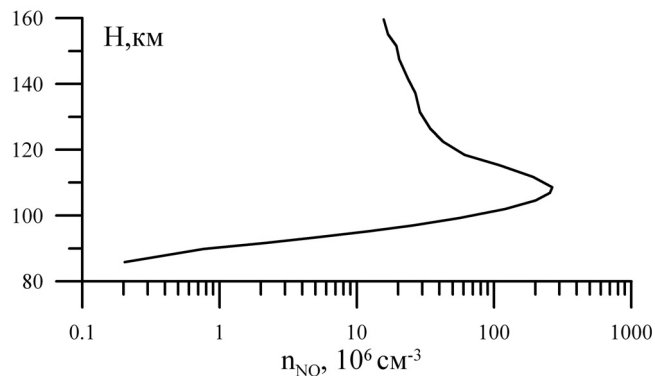
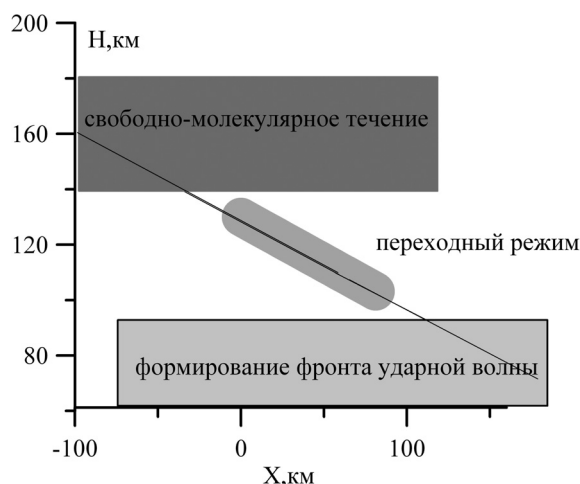


Рис. 1. Высотная зависимость концентрации NO

Рис. 2. Распределение режимов течения плазмы вдоль траектории Челябинского метеороида



[anov et al., 2012]. Из-за значительной изменчивости NO (в зависимости от уровня солнечного излучения и ряда других процессов) определить точную концентрацию этого вида молекул в день падения метеорита затруднительно, но можно сказать, что в зимний период в средних широтах эта концентрация достигает максимальных значений. Изменение концентрации NO с высотой (по модели [Bailey, Barth, 2002]) приведено на рис. 1. Именно эта зависимость использовалась при оценке возникающего фотоионизационного следа метеороида. При моделировании фотоионизационного гало вокруг метеороида использовались следующие предположения, полученные на основе наблюдений Челябинского метеороида.

Свечение начинается в переходной области от свободномолекулярного течения к непрерывному потоку с формированием ударной волны (как изображено на рис. 2). На рис. 2 эти области отмечены на траектории Челябинского метеорита (согласно основанным на наблюдениях расчётам см. Попова и др. настоящий сборник]). В переходной области (высоты 140–100 км) осуществляется нагрев поверхности метеороида и окружающей его плазмы. В качестве оценки взята температура 5000 К. В отличие от свечения в области формирования ударной волны ультрафиолетовое излучение в переходной области поглощается нелокально, сечения взаимодействия гораздо слабей, пробеги фотонов достаточно велики и поэтому для оценок производимой этим излучением ионизации окружающей ионосферной плазмы использовался метод Монте-Карло. При моделировании траекторий отдельных фотонов учитывалось релеевское рассеяние (в несколько упрощённом виде) и неупругие процессы фотоионизации на компонентах среды с учётом изменения с высотой состава нейтральных компонент ионосферной плазмы и зависимостей сечений от длины волны. Высотная зависимость мощности, излучаемого метеороидом света, оценивалась на основе высотной зависимости свечения в видимом диапазоне длин волн, приведённом на рис. 3,а [Попова и др. настоящий сборник]. Пороговое значение рассматриваемых длин волн ультрафиолетового излучения и его место на спектре абсолютно чёрного тела с температурой 5000 К приведено на рис. 3,б. Мощность, излучаемая в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, оценивалась на основе этого спектра.

В результате моделирования получено следующее распределение дополнительной ионизации в ионосфере. На рис. 4 (см. цв. вкл.) приведено распределение уровней ионизации в см^{-3} в вертикальной плоскости, содержащей траекторию метеороида.

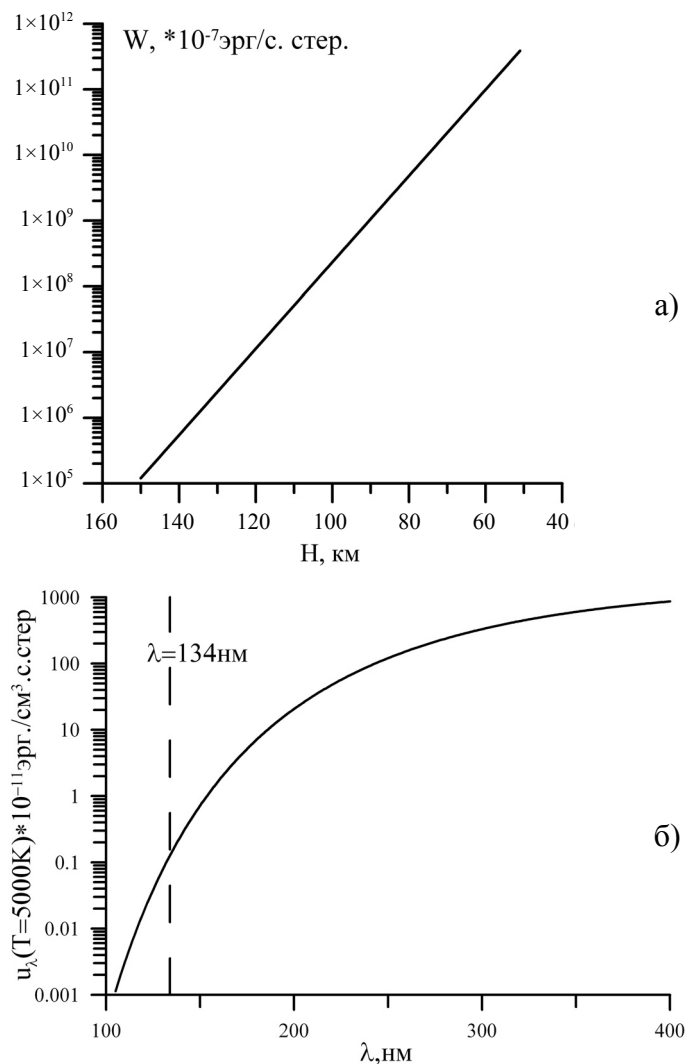
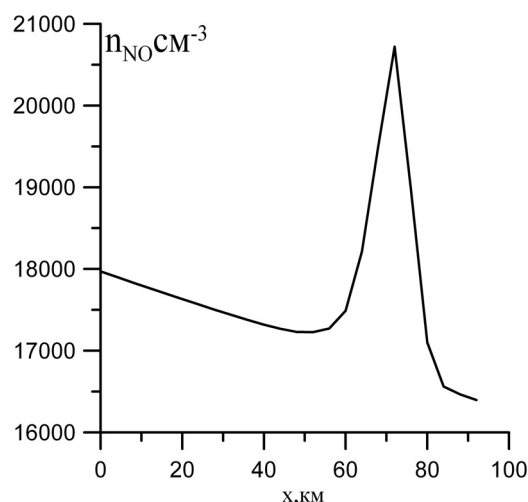


Рис. 3. (а) – зависимость мощности излучения в видимом диапазоне длин волн от высоты при падении Челябинского метеороида; (б) – модельный спектр излучения.
Пунктир – пороговое значение длины волны для процесса фотоионизации

Из рисунка видно, что метеороид создаёт за несколько секунд ионизованную область (дополнительную ионизацию) на масштабе ~ 40 км на высотах 100–120 км. Безусловно, полученная в процессе моделирования оценка уровней ионизации пространственной формы возмущения, является качественной. Слишком много параметров моделирования имеют оценочные значения (форма спектра, мощность излучения и т.д.). Вместе с тем, моделирование демонстрирует наличие процесса образования ионизационного пятна в области вхождения метеороида в плотные слои ионосферы (высоты ~ 100 км) до формирования ударной волны и взрывного разрушения. Рассмотрим, как это возмущение может возбудить, в частности, дрейфовые волновые структуры. Возмущение ионосферы накладывается на те градиенты концентраций ионов, которые присутствуют в ионосфере в естественных

Рис. 5. Изменение уровня ионизации в направлении восток-запад на высоте 105 км, формирующейся при падении Челябинского метеороида.
Ноль по горизонтали – точка прохождения высоты 130 км (начало переходного режима взаимодействия со средой)



условиях. Для примера на рис. 5 приведено изменение концентрации ионов NO^+ на высоте 105 км в долготном направлении (ось направлена на запад) при падении Челябинского метеороида. Общее направление градиента плотности ионов связано с изменением концентрации ионов в утренние часы. Хорошо видно, что в области входа метеороида сформировался резкий пик концентрации NO^+ с наибольшим градиентом в западном направлении.

Нелокальные электромагнитные возмущения

Кроме локального энерговыделения в следе метеороида существует целый ряд каналов передачи энергии метеороида в окружающую среду. Эти вторичные возмущения могут иметь гораздо большие масштабы и тоже могут быть источниками электромагнитных возмущений различной природы.

Рассмотрение формирующегося при распаде метеороида акустического возмущения и сопровождающих его движение возмущений электронной концентрации и высоты F-слоя выходит за рамки настоящей работы. Отметим только, что при рассмотрении движения нелинейной ионосферной АГВ/ВГВ волны необходимо учитывать и модификацию диффузионных свойств среды, описанную выше, и те движения ионизованных компонент плазмы, которые присутствуют в ионосфере и оказывают влияние на движение акустической волны, определяя предпочтительное направление её распространения. Отметим, что акустическое возмущение может конвертироваться в ионно-звуковую моду. Это происходит на высотах 150–200 км. Время, за которое акустическое возмущение от точки взрывного разрушения достигает этих высот составляет $5 \cdot 10^2$ с. Процесс конверсии акустической волны в ионно-звуковую предполагает сохранение частоты ω . Характерная длина акустического импульса $\sim 10^5$ см. Скорость $c = \sqrt{\gamma kT/M_n} \sim 5 \cdot 10^4$ см с^{-1} . Для ионного звука $V_{is} = \sqrt{kT_e/M_i} \sim 5 \cdot 10^4$ см с^{-1} (мы предполагаем $\gamma = 5/3$ $T \sim 600$ К; электронная температура $T_e \sim 800$ К; плазма содержит ионы NO^+ и O_2^+ ; нейтральные компоненты N_2 , O , O_2). Характерная величина волнового вектора акустической волны $k_a \sim 2\pi/\lambda \approx 4 \cdot 10^{-5}$ см^{-1} и частота $\omega = k_a c \sim 1$ с^{-1} . Эта частота существенно меньше ионной гирочастоты основных ионосферных ионов. К тому же она много меньше частоты

столкновений электронов $v_e \sim v_{en} \sim v_{in} \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ на высоте 150 км. Акустическое воздействие может породить ионно-звуковые турбулентные слои как вторичные возмущения. Все эти эффекты возникают после распада метеороида в плотных слоях атмосферы.

Рассмотрим эффекты, возникающие до распада метеороида. В результате очень быстрого формирования области повышенной ионизации, рассмотренной в предыдущем разделе, возможно формирование быстрой магнитозвуковой волны. На рис. 6 показан результат расчета магнитозвукового импульса, сгенерированного появлением ионизованного следа с параметрами, близкими к рис. 4: максимальное увеличение ионизации равно 15%, длина следа 60 км, диаметр 20 км. На рисунке показано электрическое поле волны (в относительных единицах) на расстоянии 200 км к западу от центра следа, направление магнитного поля – вертикально вниз. Характерная частота импульса порядка герца. При учёте таких дополнительных факторов, как наличие электрического поля в ионосфере, наклона относительно вертикали магнитного поля, влияния проводящей поверхности Земли, форма импульса несколько изменится. Данный расчёт представляет собой качественную оценку.

Кроме магнитозвукового сигнала на градиенте концентрации ионов NO^+ , приведённом на рис. 5 будут возбуждаться диссипативные градиентно-дрейфовые ионно-циклотронные нелинейные волны, перенося плазму в западном направлении [Kovalova, 2012, 2013]. Дисперсионное соотношение для плазмы, содержащей два вида ионов предполагает два решения:

$$\eta(\omega^2 - \alpha^2)(\omega^2 - \alpha_p^2)(k^2 + 1) = (1 - \delta_p)(\omega^2 - \alpha^2) + \delta_p \frac{M_1}{M_2}(\omega^2 - \alpha^2).$$

Здесь $\eta = 1 - \delta_p + \delta_p M_1/M_2$ (в плазме с концентрацией n_0 содержится $(1 - \delta_p)$ ионов с массой M_1 и δ_p ионов примеси с массой M_2) $\alpha = eB_0/cM_1$, $\alpha_p = eB_0/cM_2$. В выражении: ω , k – используются в безразмерном виде (соответственно ω – делённая на ионную плазменную частоту и k – умноженное на дебаевский радиус). Поэтому в возбуждаемом на градиенте плотности спектре будет два максимума один на частоте $\sim 40\text{--}50$ Гц, второй – нескольких сотен Гц.

Распад этих нелинейных структур при потере устойчивости может регистрироваться к западу от места входа метеороида в плотные слои (высота ~ 100 км) как

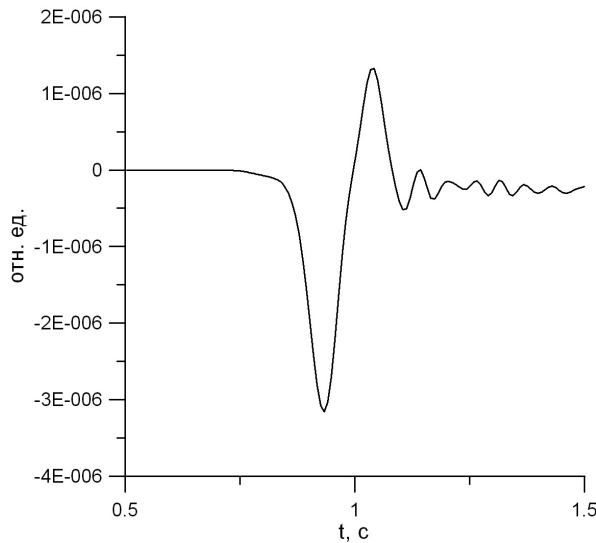


Рис. 6. Волновая форма импульса быстрой магнитозвуковой волны, формируемой ионосферной областью повышенной ионизации

низкочастотный электромагнитный шум в диапазоне частот десятков-сотен Гц до килогерц. Диапазон частот рассмотренных сигналов соответствует частотам, регистрируемых на Земле электромагнитных сигналов, в том числе и ответственных за электрофонный эффект.

Заключение

В работе рассмотрен целый ряд эффектов, возникающих в ионосфере при падении метеороида. Моделирование процессов фотоионизации при пролёте метеороида на ионосферных высотах ~130–100 км позволило получить оценку размера и формы ионизационного возмущения, формируемого на этих высотах до входа метеороида в плотные слои атмосферы. Это ионизационное возмущение может дать начало целому ряду ионосферных волновых процессов. К таким процессам относятся возникновение турбулентного слоя, возбуждение магнитозвуковой волны, формирование потока нелинейных диссипативных градиентно-дрейфовых ионно-циклотронных волновых структур. Эти процессы могут быть источником части электрофонного эффекта, регистрируемого при падениях метеороидов.

Авторы благодарят Ю.И. Зецера, чьё постоянное внимание к этой работе и обсуждения способствовали её написанию.

Литература

- Ковалева И.Х. Диссипативные ионно-циклотронные солитоны с чирпом в плазме нижней ионосферы, содержащей несколько видов ионов // Физика плазмы 2013. Т. 39. № 3. С 1–11. (Plasma Phys Reports 39, 3, p. 226–235, 2013).
- Попова О.А., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Глазачев Д.О., Емельяненко В.В., Карташова А.П. Параметры челябинского метеорита: анализ данных // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 4. (настоящий сборник).
- Bailey S.M. Barth C.A. A model of nitric oxide in the lower thermosphere // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. N. A8. 1205. doi:10.1029/2001JA000258.
- Barth C.A. Bailey S.M. Comparison of a thermospheric model with Student Nitric Oxide Explorer (SNOE) observations of nitric oxide // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. A03304. doi:10.1029/2003JA010227.
- Beech, M., and L. A. Foschini, A space charge model for electrophonic bursters // Astron. Astrophys, 1999. V. 345. P. L27–L31.
- Beech, M., and L. Foschini, Leonid electrophonic bursters // Astron. Astrophys. 2001. V. 367. P. 1056–1060.
- Beech, M., P. Brown, and J. Jones, VLF detection of fireballs // Earth Moon Planets 1995. V. 68. P. 181–188.
- Borovicka J., Stork R., Bocek J. First results from video spectroscopy of 1998 Leonid meteors // Meteor. Planet. Sci. 1999. V. 34. P. 987–994.
- Bronshten, V.A., A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Sys. Res. 1983. V. 17. P. 70–74.
- Bronshten, V.A., Electrical and electromagnetic phenomena associated with the meteor flight // Sol. Sys. Res. 1991. V. 25. P. 93–104.
- Brown, P., and R. Arlt. Detailed visual observations and modeling of the 1998 Leonid shower // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2000. V. 319. P. 419–428.
- Campbell M.D., Brown P.G., LeBlanc A.G., et al. Electro-Optical Results from the 1998 Leonid Shower: I. Atmospheric Trajectories and Physical Structure // Meteor. Planet. Sci. 2000. V. 35. P. 1259–1267.

- Clemesha B.R.* Sporadic neutral metal layers in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. V. 57. P. 725–736.
- Drobnock, G.J.* Meteors Producing VLF Signatures Independent of Producing Electrophonic Sounds // *WGN, Journal of the International Meteor Organization* 2001. V. 29, N. 1/2. P. 45–50.
- Drummond, J.D., C.S. Gardner, and M.C. Kelley*, Catching a falling star // *Sky Telescope*, June 2000. 99. P. 46–49.
- Gelinas L.J., Lynch K.A., Kelley M.C.* First observation of *meteoric charged* dust in the tropical mesosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 4047–4050.
- Gerding M., Alpers M., Höffner J., von Zahn U.* Sporadic Ca and Ca⁺ layers at mid-latitudes: Simultaneous observations and implications for their formation // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 47–59.
- Hedin J., Rapp M., Khaplanov M., Stegman J., Witt G.* Observation of NO in upper mesosphere and lower thermosphere during ECOMA 2010 // *Ann. Geophys.* 2012. V. 30. P. 1611–1621.
- Hunten D.M., Turco R.P., Toon O.B.* Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1980. V. 37. P. 1342.
- Jenniskens, P.* Meteor stream activity. III: Measurement of the first in a new series of Leonid outburst // *Meteorit. Planet. Sci.* 1996. V. 31. P. 177–184.
- Kaznev, V Y.* Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis // *Sol. Sys. Res.* 1994. V. 28. P. 49–60.
- Keay, C.S.L.* Anomalous Sounds from the entry of meteor fireballs // *Science*. 1980a. V. 210. P. 11–15.
- Keay, C.S.L.* Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs // *J. R. Astron. Soc. Canada*. 1980b, 74. P. 253–260.
- Keay, C.S.L.* Meteor fireball sounds identified // *Asteroids, Comets, Meteors*. 1991, 1992a, p. 297–300.
- Keay, C.S.L.* Electrophonic sounds from large meteor fireballs // *Meteoritics* 1992b. V. 27. P. 144–148.
- Keay, C.S.L.* Electrophonic Sounds Catalog // *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* 1994. V. 6. P. 151–172.
- Keay, C.S.L., and Z. Cepkecha.* Rate of observation of electrophonic meteor fireballs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 13,163–13,165.
- Kovaleva I.Kh.* Dissipative ion-cyclotron oscillitons in a form of soliton with chirp in Earth's low-altitude ionosphere // *Phys plasmas* 2012. 19, 102905, doi: 10.1063/1.4763561.
- Losseva T.V., S.I. Popel, M.Y. Yu, and J.X. Ma.* Ambipolar Diffusion in Complex Plasma // *Physical Review E* 2007. V. 75, No. 4. 046403.
- Popel S.I.* Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body // *Planet. Space Sci.* 1997. V. 45. N. 7. P. 869–875.
- Price, C., and M. Blum,* ELF/VLF Radiation Produced by the 1999 Leonid Meteors // *Earth Moon Planets*. 2000. 82/83. P. 545–554.
- Rosinski J., Snow R.H.* Secondary particulate matter from *meteor* vapors // *J. Meteor.* 1961. V. 18. P. 736–745.
- von Zahn U., Gerding M., Höffner J. et al.* Fe, Ca, and K atom densities in the trails of Leonids and other meteors: Strong evidence for differential ablation // *Meteor. Planet. Sci.* 1999. V. 34. P. 1017–1027.
- Spurny P., Betlem H. Jobse K. et al.* New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km // *Meteor. Planet. Sci.* 2000. V. 35. P. 1109–1115.
- Zgrablic G., D. Vinkovic', S. Gradec'ak, D. Kovac'ic', N. Bilis'kov, N. Grbac, Z. Andreic', and S. Garaj.* Instrumental recording of electrophonic sounds from Leonid fireballs // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N. A7, 10.1029/2001JA000310.