

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРОИДА

*И.Х. Ковалева, А.Т. Ковалев, О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов,
Ю.В. Поклад, Д.В. Егоров*

Рассмотрены электромагнитные возмущения различной природы и масштабов, сопровождающие падения метеороидов. Предложен новый механизм генерации электромагнитного сигнала в диапазоне частот от Гц до килогерц при таких падениях. Проанализированы особенности падения Челябинского метеороида. Проведены оценки возмущений параметров ионосферной плазмы и характеристики электромагнитных сигналов, которые могут быть зарегистрированы на Земле. Предложена модель формирования электрофонных шумов в результате резонансного возбуждения циклотронных частот ионов приземной плазмы.

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 – измерения акустических возмущений и электромагнитных полей. На основе данных 1 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 ее параметры, строятся модели генерации в ней электромагнитных возмущений ОНЧ-КНЧ 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 Ceprecha, 1994; Vinkovic' et al., 2000; Zgrablic' et al., 2002]. Состояние нижней ионосферы как среды, в которой так же происходит 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, сопровождаю-

щим падение метеороида, обычно связаны с возмущением ионосферы акустической волной, приходящей из области основного энерговыделения на траектории метеороида (вызванного разрушением и торможением метеороида и его фрагментов). 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, долетающих до низких высот) [Bronshiten, 1983] или формированием сигнала в процессе взрыва [Keay, 1992b]; разделение зарядов при прохождении ударной волны через ионизованную метеороидом плазму [Beech and Foschini, 1999]. Также предлагалась модель зарядки метеороида в процессе абляции [Bronshiten, 1991]. Высказывались предположения о возможном наличии нескольких механизмов формирования электромагнитного сигнала от метеороидов. Это связано в частности с тем, что электромагнитный сигнал приходит раньше времени максимального свечения и, следовательно, источник электромагнитного шума может возникать 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 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 ионноциклотронных 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 учёте пространственного распределения концентраций ионов, соответствующих данному времени суток. Это распределение определяет направление распространения электромагнитных шумов и, следовательно, области, где возможна их наземная регистрация.

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 своем 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, Kharlanov 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. Высотная зависимость концентрации NO (по модели [Bailey, Barth,

2002]) приведена на рис. 1,а. 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.

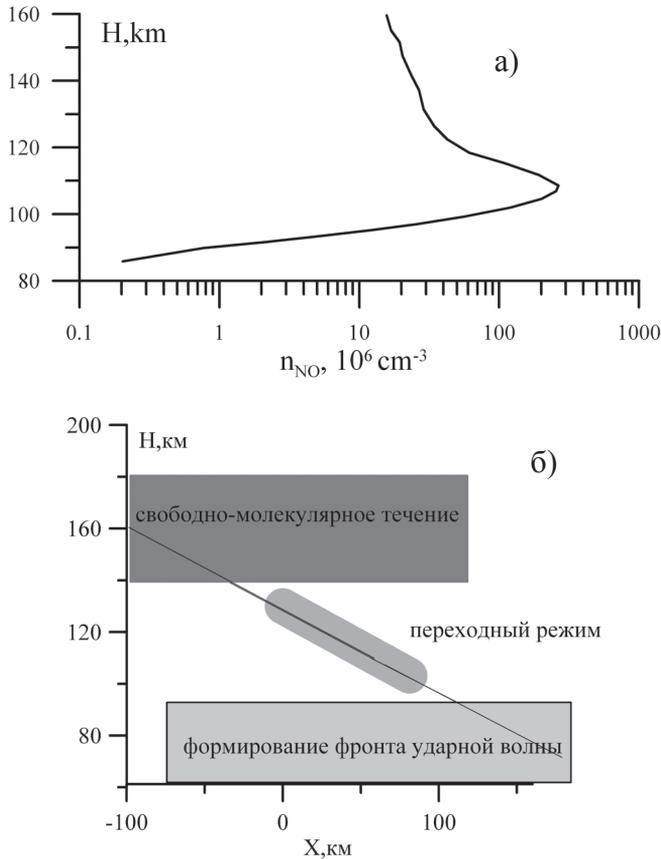


Рис. 1. (а) – высотная зависимость концентрации NO; (б) – схема различных режимов взаимодействия метеороида с атмосферой

Свечение начинается в переходной области от свободномолекулярного течения к непрерывному потоку с формированием ударной волны (как изображено на рис. 1,б). На рис. 1,б эти области отмечены на траектории Челябинского метеороида. В переходной области (высоты 140–100 км) осуществляется нагрев поверхности метеороида и формирование слоя паров (плазмы) вблизи метеороида. Как известно [Bronshthen, 1983], поверхность метеороида нагревается до температуры испарения, то есть, примерно, до 1500–2000 К, а слой паров и воздуха перед и вокруг тела нагревается до более высоких температур. В качестве очень грубой оценки взята температура 3000 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 по-

этому 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 волн. Высотная зависимость мощности, излучаемого метеороидом света, оценивалась на основе высотной зависимости свечения в видимом диапазоне длин волн, приведенном на рис. 2,а [Popova et al., 2013]. Пороговое значение рассматриваемых длин волн ультрафиолетового излучения и его место на спектре абсолютно черного тела для двух температур приведено на рис. 2,б. Мощность, излучаемая в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, оценивалась на основе этого спектра.

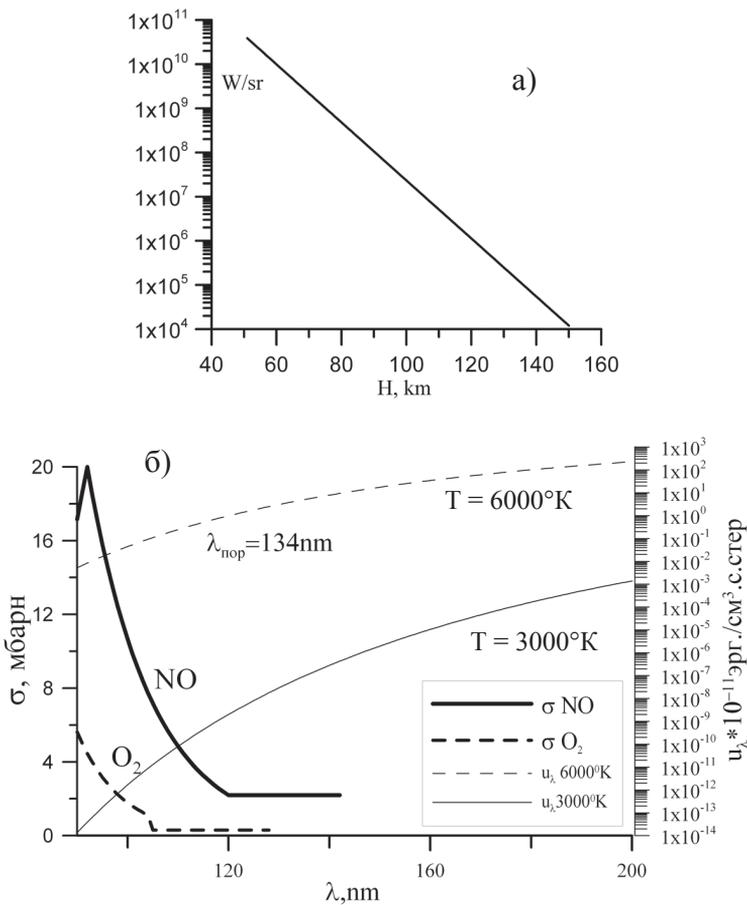


Рис. 2. (а) – зависимость мощности излучения в видимом диапазоне длин волн от высоты при падении Челябинского метеороида; (б) – сечения фотоионизации NO и O₂; модельный спектр излучения для двух температур

В результате моделирования получено следующее распределение дополнительной ионизации в ионосфере на начальной стадии полета (до формирования ударной

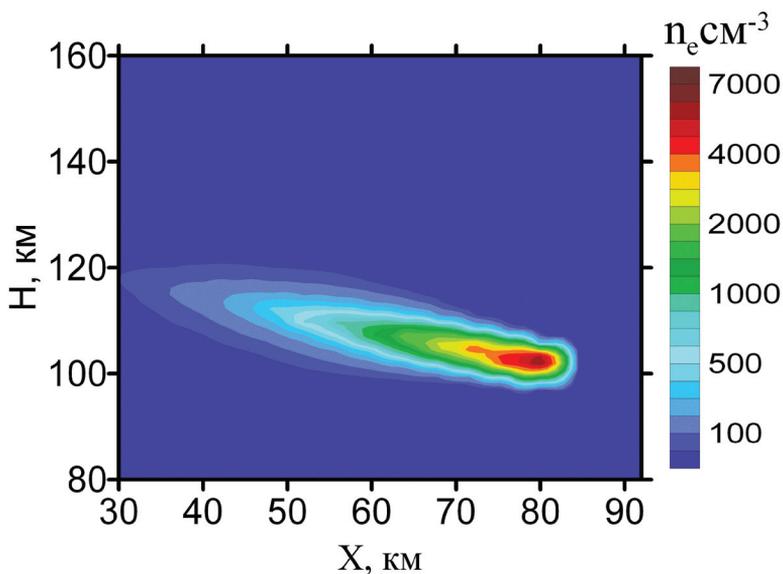


Рис. 3. Распределение уровней ионизации (cm^{-3}) в вертикальной плоскости, содержащей траекторию метеороида

волны). На рис. 3 приведено распределение уровней ионизации в cm^{-3} в вертикальной плоскости, содержащей траекторию метеороида. Ноль по горизонтали соответствует точке прохождения высоты 130 км.

Из рисунка видно, что метеороид создает за несколько секунд ионизованную область (дополнительную ионизацию) на высотах 100–120 км (на масштабе ~ 40 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 условиях. Для примера на рис. 4

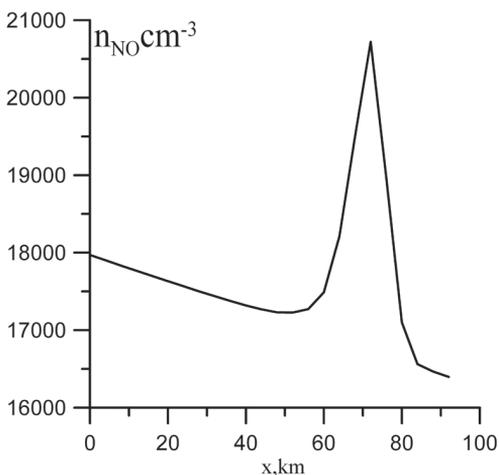


Рис. 4. Изменение уровня ионизации в направлении восток-запад на высоте 110 км

приведено изменение концентрации ионов NO^+ на высоте 105 км в долгом 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 также могут быть источниками электромагнитных возмущений различной природы.

Рассмотрение формирующегося при торможении и разрушении метеороида акустического возмущения и сопровождающих его движение возмущений электронной концентрации на высоте 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 ее распространения. Акустическое возмущение может конвертироваться в ионно-звуковую моду, что происходит на высотах 150–200 км. Время, за которое акустическое возмущение от точки основного энерговыделения достигает этих высот, составляет $5 \cdot 10^2$ с. Все эффекты возникают после разрушения метеороида в плотных слоях атмосферы.

Рассмотрим эффекты, возникающие до основного энерговыделения. В результате очень быстрого формирования области повышенной ионизации, рассмотренной в предыдущем разделе, возможно формирование быстрой магнитозвуковой волны. На рис. 5 показан результат расчета магнитозвукового импульса, сгенерированного появлением ионизованного следа с параметрами, близкими к рис. 3: максимальное увеличение ионизации равно 15%, длина следа – 60 км, диаметр – 20 км. На

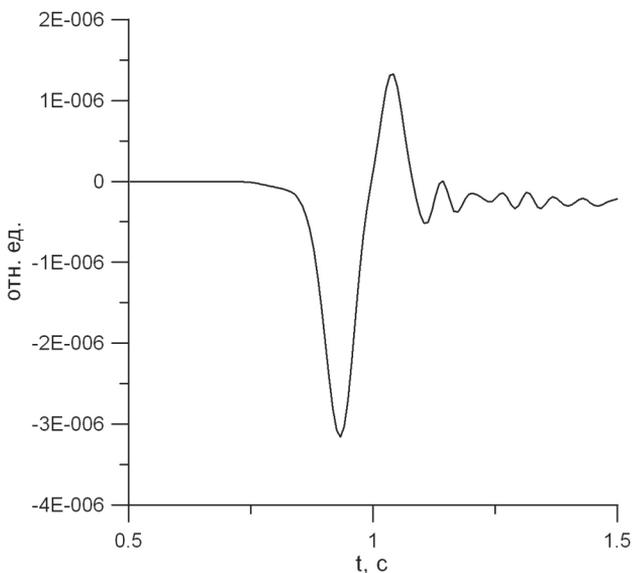


Рис. 5. Волновая форма импульса быстрой магнитозвуковой волны, формируемой ионосферной областью повышенной ионизации

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 1 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.

Формирование нелинейных градиентно-дрейфовых ионно-циклотронных волновых структур

Кроме магнитозвукового сигнала на градиенте концентрации ионов NO^+ , приведенном на рис. 4 будут возбуждаться диссипативные градиентно-дрейфовые ионно-циклотронные нелинейные волны, перенося плазму в западном направлении, осуществляя релаксацию возмущения [Kovaleva, 2012; Kovaleva, 2013]. При увеличении градиента плотности какого-либо вида ионов поперек магнитного поля возбуждаются волновые структуры, переносящие ионы против градиента. Частоты волновых структур отвечают дисперсионному соотношению ионно-циклотронных волн.

Дисперсионное соотношение для плазмы, содержащей два вида ионов, предполагает два решения:

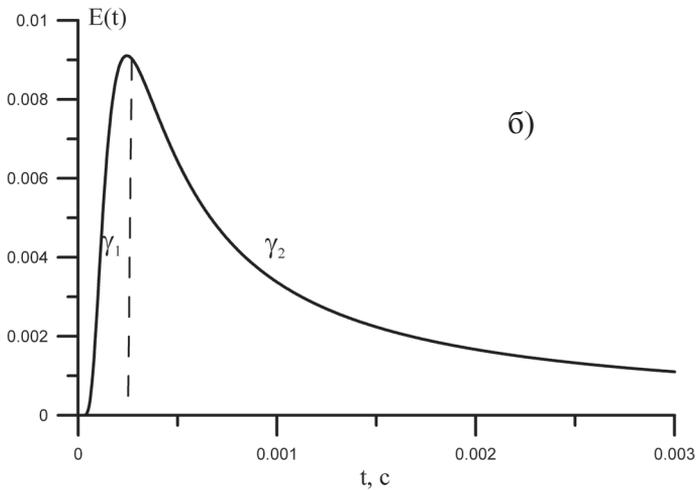
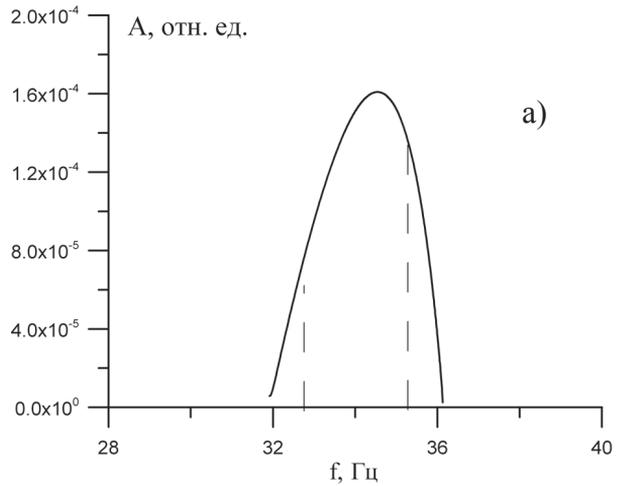
$$\eta(\omega^2 - \alpha^2)(\omega^2 - \alpha_p^2)(k^2 + 1) = (1 - \delta_p)(\omega^2 - \alpha_p^2) + \delta_p \frac{M_1}{M_2} (\omega^2 - \alpha^2).$$

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 , деленная на ионную плазменную частоту и k , умноженное на дебаевский радиус). Поэтому в возбуждаемом на градиенте плотности спектре будет два максимума, один из которых располагается в диапазоне частот $\sim 30\text{--}50$ Гц. Амплитуды солитонов и затронутый возбуждением диапазон частот определяются превышением градиента плотности над пороговым уровнем.

При этом амплитуды возбуждаемых солитонов имеют частотную зависимость, подобную представленной на рис. 6,а. При увеличении градиента растут захватываемый возбуждением диапазон частот и амплитуды солитонов.

При изменении по мере движения солитона параметров среды, параметры устойчивых солитонов постепенно изменяются, поэтому солитон подстраивается к этим изменениям, меняя свою амплитуду и частоту через излучение линейной волны. На границе плазмы возможен полный распад солитона. Оценим то линейное возмущение, которое при этих процессах формируется. Подробное решение, соответствующее перестройке солитона (решения уравнения Шредингера) при потере устойчивости, было получено в работах [Кузнецов, Михайлов, 1994; Kuznetsov, Mikhailov, Shimokhin, 1995]. На рис. 6,б приведена временная зависимость амплитуды такого импульса. Частота примерно соответствует частоте колебаний солитона. При этом необходимо отметить, что в отличие от солитона линейный волновой пакет расплывается при удалении от точки рождения. Поэтому сказать какими будут временные параметры импульса возбуждения, (приходящего в тропосферу в виде электромагнитного сигнала) на высотах тропосферы сложно. Примем, что

Рис. 6. (а) – зависимость амплитуд солитонов от частоты при некотором превышении порогового градиента; (б) – форма волнового импульса, испускаемого солитоном в процессе перестройки



импульс можно представить двумя характеризующими его экспонентами γ_1 (роста) и γ_2 (спада) $\gamma_1 \gg \gamma_2$. Частотное распределение таких импульсных волновых пакетов, зависимость их амплитуд от частоты в этом случае должны воспроизводить частотную зависимость амплитуд солитонов, представленную на рис. 6,а. Пунктирами на этом графике схематично представлены несколько пиков, на которых могут возбуждаться резонансы. Соотношение их амплитуд будет отражать частотную зависимость амплитуд солитонов.

Тропосферный отклик на приходящие электромагнитные шумы

Ионно-циклотронный резонанс, возбуждаемый при движении заряда в среде с сильной диссипацией в постоянном магнитном и переменных низкочастотных полях рассматривается на протяжении нескольких десятилетий в связи с процессами в биологических средах, демонстрирующих циклотронные резонансы [Durney

et al., 1988; Lednev, 1991; Edmonds, 1992; Thompson et al., 1995; Vincze et al., 2008]. Рассматриваются линейные и нелинейные резонансы.

Для качественного рассмотрения достаточно использовать простейшую так называемую модель Лоренца. В этом случае рассматривается движение заряда в скрещенных полях, постоянном магнитном $B_0 = (0, 0, B_0)$ и волновом электрическом $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$ при интенсивных соударениях v .

Система уравнений содержит диссипативный член и силу Лоренца

$$\begin{aligned} m_i n_i \frac{dV_x}{dt} + v n_i V_x &= e n_i (E_x + V_y B_0) \\ m_i n_i \frac{dV_y}{dt} + v n_i V_y &= -e n_i V_x B_0 \end{aligned}$$

Если нормировать время на циклотронную частоту $\omega_{Ci} = eB_0/m_i$ (разделив уравнения на eB_0), разделить оба уравнения на n_i , то система уравнений запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} - V_y + \beta V_x = E_0 \exp(\gamma t - it) \\ \frac{dV_y}{dt} + V_x + \beta V_y = 0, \end{cases}$$

где β – безразмерная частота соударений; $E_0 = E_x/B_0$.

Система преобразуется в колебательное уравнение:

$$\frac{d^2 V_y}{dt^2} + 2\beta \frac{dV_y}{dt} + (1 + \beta^2) V_y = -E_0 \exp(\gamma t - it)$$

Решение в случае $\beta \gg \gamma$ можно представить в виде:

$$V_y \approx -\frac{E_0}{\beta^2} e^{\gamma t - it}; \quad V_x \approx \frac{E_0}{\beta} e^{\gamma t - it}$$

Или в размерном виде для импульса электромагнитного излучения, рассмотренного выше

$$V_x \approx \frac{E_x \omega_{Ci}}{B_0 v} \exp(\gamma_1 \omega_{Ci} t - i \omega_{Ci} t) \quad \text{для } 0 < t < t_1$$

и

$$V_x \approx \frac{E_x \omega_{Ci}}{B_0 v} [\text{const} - \exp(-\gamma_2 \omega_{Ci} t)] \exp(-i \omega_{Ci} t) \quad \text{для } t > t_1.$$

Движение ионов оказывает влияние на движение нейтрального воздуха через диссипативный тензор $\vec{G} = \begin{bmatrix} \lambda_{XX} & \lambda_{XY} \\ \lambda_{YX} & \lambda_{YY} \end{bmatrix}$ (ion drag), члены которого $\lambda_{XY} = \lambda_{YX} \sim \alpha_i \left(\frac{v_i}{\omega_i} \right) \sim n_i$ концентрации ионов так как $\alpha_i = \frac{5 \cdot 10^{-10} n_i}{1 + (v_i/\omega_i)^2}$ [Brasseur, Solomon, 2005]. В уравнения движения для нейтрального воздуха член входит в виде произведения $\vec{G}V$, то есть, пропорционален скорости ионов относительно нейтральной составляющей. Таким образом, при достаточном уровне ионизации и наличии электромагнитного шума на резонансных циклотронных частотах можно ожидать появление на этих же частотах звукового шума – электрофонного эффекта. Так как скорости ионов при резонансном ускорении пропорциональны циклотронной частоте, то особенно интенсивным этот эффект будет на циклотронных частотах легких ионов приземной

плазмы, ионно-циклотронные частоты которых больше. Кроме основного резонанса возможно возбуждение гармоник циклотронных частот тропосферных ионов $n \cdot \omega_{Ci}$.

Для рассмотрения реакции ионов на приходящий из ионосферы электромагнитный шум применительно к средней и нижней атмосфере необходимо рассмотреть ионный состав среды.

Состав тропосферных ионов в спокойных и возмущённых условиях

Состав тропосферных ионов очень изменчив, зависит от времени суток, сезона, погодных условий и места, где проводятся измерения (в городских или сельских условиях). В качестве первичных в результате различных процессов образуются легкие ионы N_2^+ , N^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ , H^+ и так далее и электроны, которые за время порядка 10^{-5} вступают в ряд химических реакций (электроны прилипают к молекулам, образуя отрицательные ионы). Далее легкие ионы NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , и так далее вступают в дальнейшие химические реакции, образуя за время $\sim 10^{-3}$ с кластерные ионы типа $O_2(H_2O)_m$, $H^+((CH_3)_2CO)_x(H_2O)_y$, NO_3HNO_3 , $C_3H_3O_4HNO_3$, $H^+B_b(H_2SO_4)_x(H_2O)_y$, где B в большинстве случаев группа атомов, соответствующая ацетону и т.д. Подробный обзор экспериментальных данных по тропосферным ионам и расхождениям в измерениях различных авторов дан в работе [Hirsikko et al., 2011]. Тяжелые ионы живут в атмосфере десятки минут и более. Эти ионы становятся зародышами аэрозольных частиц. В целом в плазмохимической кинетике участвует несколько сотен различных химических соединений. Огромную роль играют примесные ионы, в том числе, возникающие в результате промышленных выбросов NO , NO_2 , N_2O , соединений углерода, серы, выхлопных газов. Типичные концентрации ионов $200\text{--}2500\text{ см}^{-3}$. В настоящее время существуют модели расчета стационарных распределений концентраций или динамических изменений (обычно на интервалах времени доли секунд). Поэтому значительное внимание исследователей уделено экспериментальным регистрациям ионного состава атмосферы, имеющего значительные вариации. Для того, чтобы продемонстрировать некоторое распределение атмосферных ионов по массам, на рис. 7,а приведён пример измерений масс положительных ионов воздуха масс-спектрометром [Junninen, et al., 2010]. Хорошо видно разделение на группу легких и тяжелых ионов.

Из рис. 7,а видно, что наибольшие концентрации отдельных положительных ионов можно зафиксировать для двух групп масс: с самых легких – до 150 а.е. и 250–400 а.е. Легкие ионы с массами менее 50 этим прибором не регистрировались. В качестве основных отрицательных легких ионов можно выделить NO_3^- (62) и HSO_4^- (97). По другим источникам [например, Lee et al., 2008] в качестве основных легких ионов, регистрируемых в сельской местности, называют NO_3^- , $NH_4^+SO_4^-$. По данным работы [Eisele et al., 1989] к наиболее распространенным легким ионам можно отнести $C_3H_5NH^+$, $(CH_3)_3NH^+$, $C_3H_5NOH^+$ с массами 60, 70 и 130 а.е. Соответственно циклотронные частоты легких ионов находятся в диапазоне 8–45 Гц. Циклотронные частоты, соответствующие более тяжелым положительным ионам с массой 320, 330 а.е., лежат в диапазоне 2–3 Гц. Следовательно, в этих двух частотных диапазонах можно искать основные циклотронные резонансы. В случае, если диапазон возбуждающих электромагнитных шумов лежит на других частотах, могут возбуждаться гармоники основных резонансов этих ионов.

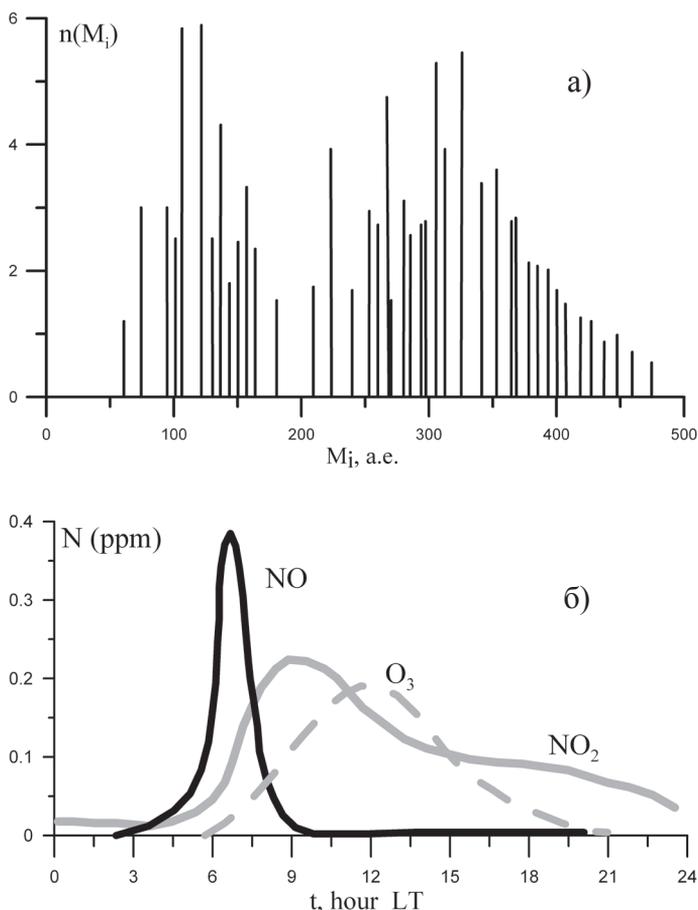


Рис. 7. (а) – пример измерения распределения положительных ионов по массе в тропосфере; (б) – изменение в течении дня концентраций примесных ионов в городской приземной атмосфере (ppm-доля 10^{-6} от основных компонент воздуха)

В возмущенных условиях при резком увеличении уровня ионизации состав приземной плазмы будет отличаться от стационарного в сторону преобладания легких ионов. При этом надо иметь в виду, что даже динамические плазмохимические атмосферные модели неприменимы в случае фотоионизации воздуха при падении метеороида. Это связано с тем, что в обычные модели заложен стандартный спектр солнечного излучения с учетом поглощений в ионосфере и стратосфере, что не реализуется при прохождении метеороида до более плотных слоев. В этом случае на воздушную среду тропосферы воздействует нехарактерное для обычных условий жесткое ультрафиолетовое излучение, постоянно меняющее свои характеристики. Поэтому получить точное распределение легких ионов не представляется возможным, но можно сделать некоторые качественные оценки. В случае быстрого возникновения УФ источника целый ряд легко фотоионизируемых нейтральных атмосферных примесей формирует (очень быстро, за время \sim секунды) достаточно большую область атмосферы с повышенной ионизацией. Состав ионов будет зависеть от того, в городских или сельских условиях произ-

водится возмущение среды и от времени суток (см., например, [Bradshaw et al., 2000]). На рис. 7,б приведён качественный суточный ход концентраций примесных газов в городе при наличии промышленного загрязнения (в зависимости от местного времени). Максимумы концентраций NO, NO₂ приходятся на утренние часы (время падения Челябинского метеороида). В Челябинске, как и во всех промышленных городах уральского региона, примесные газы значительно превышают средний уровень [Панкратова и др., 2011]. За средний уровень можно принять концентрации, приведённые в табл. 1. К легкоионизируемым примесным газам города относятся прежде всего, NO, NO₂, в сельской местности – NH₃. В той же таблице приведены пороговые длины волн (нм) для ионизации основных и некоторых примесных газов.

Таблица 1

N ₂	O ₂	NO	NO ₂	NH ₃
2.1 · 10 ¹⁹	5.6 · 10 ¹⁸	1.6 · 10 ⁹	2.2 · 10 ¹⁰	1.0 · 10 ¹¹
79.57	102.67	134.03	127.03	122

Спектры излучения крупных метеорных тел являются в основном линейчатыми с присутствием некоторого континуума [Голубь и др., 1997; Borovichka et al., 1998]. Очень грубо эффективную температуру излучения на последней стадии полета можно оценить как 4000–6000°K. Эта неопределенность в оценке температуры оказывает определяющее влияние на возможность точной оценки уровня фотоионизации в приземных слоях атмосферы, образуемой свечением этого тела. Как показано на рис. 2,б при двух возможных температурах 3000 и 6000°K уровень излучения вблизи порога фотоионизации основных компонент воздуха O₂ и N₂ различается примерно на 10 порядков. Поэтому сказать какой вклад внесет ионизация основных компонент воздушной смеси трудно. Но в любом случае фотоионизация примесных газов внесет свой вклад в образование ионов приземной плазмы.

Итак, на основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что у поверхности Земли можно ожидать регистрацию резонансных флуктуаций электрического и магнитного полей на циклотронных частотах приземных ионов в двух диапазонах частот: около 2–3 Гц и в области 8–70 Гц или на гармониках этих частот. Состав примесных ионов в городе и за его пределами различен, следовательно, несколько различным будет частотное распределение резонансных пиков в различных местах регистрации одного события. При этом, сигналы будут иметь вид, характерный для техногенных шумов (то есть спектр излучения будет иметь вид частотных пиков на конкретных частотах. Такой вид спектра сохраняется продолжительное время, так как флуктуации геомагнитного поля, регистрируемые у поверхности Земли, находятся в диапазоне 10⁻⁴–10⁻⁵ от значений постоянного магнитного поля. Сами сигналы (при более детальном анализе волновых форм) будут иметь вид коротких всплесков. Срыв регистрации излучения или изменение его мощности будут коррелировать с теми ионосферными крупномасштабными флуктуациями геомагнитного и электрического полей, которые или приводят к резким изменениям условий генерации или формируют области интенсивной турбулентности (что приводит к быстрому затуханию ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых солитонов – источника электромагнитного шума, возбуждающего резонанс).

Экспериментальные данные по сигналам на циклотронных частотах в спокойных условиях

То, что такое электромагнитное излучение существует, подтверждают экспериментальные данные ГФО ИДГ РАН «Михнево». На рис. 8 приведено временное распределение низкочастотных флуктуаций магнитного поля в течение часа с 3 до 4 часов UT 15.02.2013 г. На рис. 8,а – частотное распределение флуктуаций магнитного поля в B_z компоненте. Шумановские резонансы можно регистрировать в районе 20 и 30 Гц (шумы резонатора Земля – ионосфера вблизи частот 7,8; 14,1; 20,3; 26,4; 32,4 Гц и т.д.) с постоянно меняющейся частотой, техногенные импульсы (строго определённой длительности и с определёнными интервалами между ними) и циклотронная линия (помеченная стрелкой) с постоянно меняющейся мощностью, и скачками меняющейся частотой. Это связано с тем, что при сдвигах частот шумов, возбуждающих резонансы, резонанс соответствует то одному, то другому иону из смеси тропосферных ионов. В течение дня максимум данной линии постепенно сдвигается с 38,86 до 40,01 Гц и обратно, постоянно реагируя кратковременными сдвигами частоты на различные флуктуации.

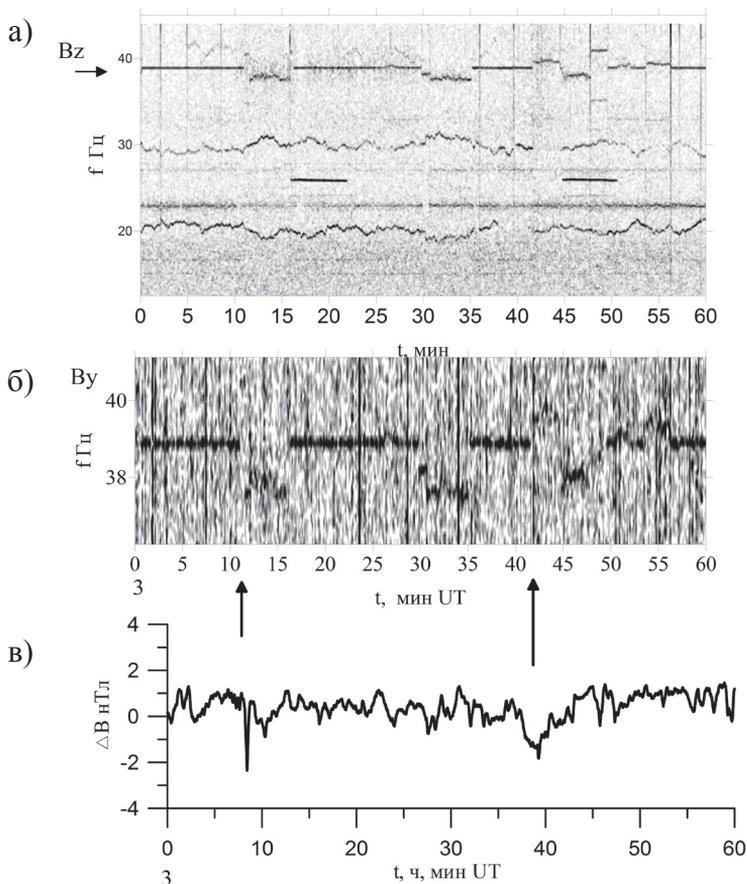


Рис. 8. (а) – пример регистрации низкочастотных электромагнитных шумов; (б) – частотное распределение шумов в компонентах B_z , B_y магнитного поля; (в) – временная зависимость флуктуаций квазипостоянного магнитного поля

На рис. 8,б в более крупном масштабе выделенная циклотронная линия в B_y компоненте и флуктуации квазипостоянного магнитного поля.

Стрелками показаны времена резких сдвигов резонансных частот. Они коррелируют с резкими флуктуациями квазипостоянного геомагнитного поля, представленного на рис. 8,в (с запаздыванием в несколько минут). Это связано с тем, что на частотный диапазон, возбуждающих резонансы шумов, влияют флуктуации магнитного и электрического полей в ионосферной области возбуждения шумов. Распространяясь на большие расстояния от области рождения под большими углами к геомагнитному полю, шумы приходят на тропосферные высоты со сдвигом в широтном и долготном направлениях.

Из рисунка можно сделать вывод, что примерно через 20 мин после падения Челябинского метеороида (временной интервал 40–50 мин) на спектральной линии отразилось волновое возмущение с периодом в несколько минут в виде кратковременных подъемов и опусканий частоты.

Линии, аналогичные рассмотренной циклотронной, присутствуют в низкочастотных записях для электрического поля. Так как в наличии имеются только флуктуации электрического поля в диапазоне до 10 Гц, то они регистрируют только циклотронные частоты тяжелых ионов. При превышении некоторого уровня шума частотные пики в электрическом поле коррелируют с частотными пиками в акустических шумах.

В настоящее время в качестве источника шумов этого частотного диапазона, как правило, рассматривают грозовую активность в удаленных районах Земли, хотя результаты отдельных исследований указывают на зависимость мощности шумов от локального прохождения над областью измерений атмосферных фронтов (в отсутствие гроз) [Молодых и др., 2012]. Эту зависимость легко объяснить увеличением в этом случае локальной концентрации тропосферных ионов.

В спектре звуковых шумов во время падения Челябинского метеороида регистрировались аналогичные частотные пики.

Экспериментальные данные по Челябинскому метеороиду

На основе проделанного в предыдущих разделах предварительного рассмотрения обсудим имеющиеся экспериментальные данные по Челябинскому метеороиду. В работе [Berngardt et al., 2013] по результатам радарного наблюдения Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН было зафиксировано крупномасштабное ионизационное пятно к западу от области основного энерговыделения. Авторы предположили формирование обширной области повышенной плотности ионизации в области F, необычное увеличение скорости движения неоднородностей в E слое в течение времени порядка минуты. Это говорит о справедливости гипотезы об образовании обширного ионизационного пятна на ионосферных высотах. Вблизи места падения метеороида фиксировалось значительное увеличение светового потока, многие очевидцы отмечают ощущение тепла. Вблизи траектории некоторые очевидцы получили ожоги, похожие на солнечные, что говорит о присутствии УФ излучения достаточной мощности [Ророва et al., 2013]. Фиксировался запах (как после грозы), что говорит об увеличении ионизации в приземном слое. Эти факторы указывают на справедливость предположений о формировании возмущенной области приземной плазмы с увеличенным уровнем ионизации.

Челябинский болид был электрофонным, о чем свидетельствуют показания очевидцев [Popova et al., 2013]. Среди 1674 человек, заполнивших интернет анкету, 198 сообщили, что слышали звук одновременно с болидом, до прихода ударной волны [Popova et al., 2013; Kartashova et al., 2014]. Большинство очевидцев характеризуют звук как свист, шипение, треск, похожий на бенгальские огни, шуршание. Три заслуживающих доверия очевидца (инженер, физик по образованию и водитель) описывают звук как шипение масла на сковороде (Челябинск), гудение трансформатора и рев двух истребителей (Еманжелинск). Ни один из этих очевидцев не носит очки, им казалось, что звук доносится со стороны болида. Часть свидетелей указывали на то, что слышали свист. Подробное территориальное распределение фиксаций шумов приведено в работе [Карташова и др., 2014] настоящего сборника. На основе этих данных можно сказать, что свидетели слышали низкочастотный шум в диапазоне ~ 30 Гц и выше. В этом же диапазоне частот регистрировались шумы при наблюдении метеоров потока Леониды [Zgrablic et al., 2002]. Для звуков, сопровождающих горение бенгальских огней характерны спектры в диапазоне частот от единиц до ~ 100 Гц.

Многочисленные видеорегистрации челябинского метеороида сопровождались записями звукового фона. В нашем распоряжении имеются записи автомобильных видеорегистраторов при падении Челябинского метеороида, собранные в базу данных. К сожалению, на большинстве записей присутствуют посторонние шумы (включенное радио, разговоры, вентилятор и т.д.). Поэтому реальный звуковой сигнал был зарегистрирован только регистрирующими устройствами немногих стоящих автомобилей. Те множественные трески, шуршания и свисты, которые слышали многие корреспонденты, были зафиксированы без значительных помех только в одном случае (Волков, Челябинск рис. 9,а). На рисунке приведены временные зависимости мощности регистрируемых звуковых шумов в частотных диапазонах 40–300 Гц (это основной диапазон электрофонных шумов), ниже 40 и выше 300 Гц (до 4000 Гц). Полутоновыми линиями отмечены время основной вспышки и время прихода ударной волны. Остальные записи в автомобилях производились при включенных печках и вентиляторах и поэтому низкочастотная часть шума «потонула» в помехах, образуемых шумом вентилятора, шум которого имеет максимум на частоте 30 Гц (см., например, рис. 9,а (Иванов – Первомайский), рис. 9,в (Манинин – Тургорякское шоссе, пригород Миасса)).

Расположение точек регистрации, используемых в дальнейшем анализе, приведено на рис. 6,в работы [Карташова и др., 2014]. Фактически мы имеем одну запись почти под траекторией, недалеко от основной вспышки, одну запись на расстоянии 40 км к северу – в Челябинске и одну – на расстоянии 80 км к западу.

На основе этих данных можно сказать, что электрофонный эффект представляет собой два явления. Одно из них – это сопровождающее падение метеороида низкочастотное шипение, треск, гул, иногда свист, которые, по мнению очевидцев, кончаются после распада метеороида. По данным записи рис. 9,а уровень шумов спадает до уровня меньшего уровня помех примерно за 10 с до вспышки (к значению времени 270 с), когда уровень шумов в диапазоне 40–300 Гц спадает примерно вдвое. Это соответствует высоте 75–84 км. Вторым явлением являются шумы в виде щелчка, одиночного импульса синхронного со вспышкой. На регистрацию данного вида сигнала (особенно вблизи траектории) оказывают влияние и собственные частоты автомобиля, и многократные отражения этого сигнала от зданий и сооружений. Рассмотрим подробнее первый вид шумов.

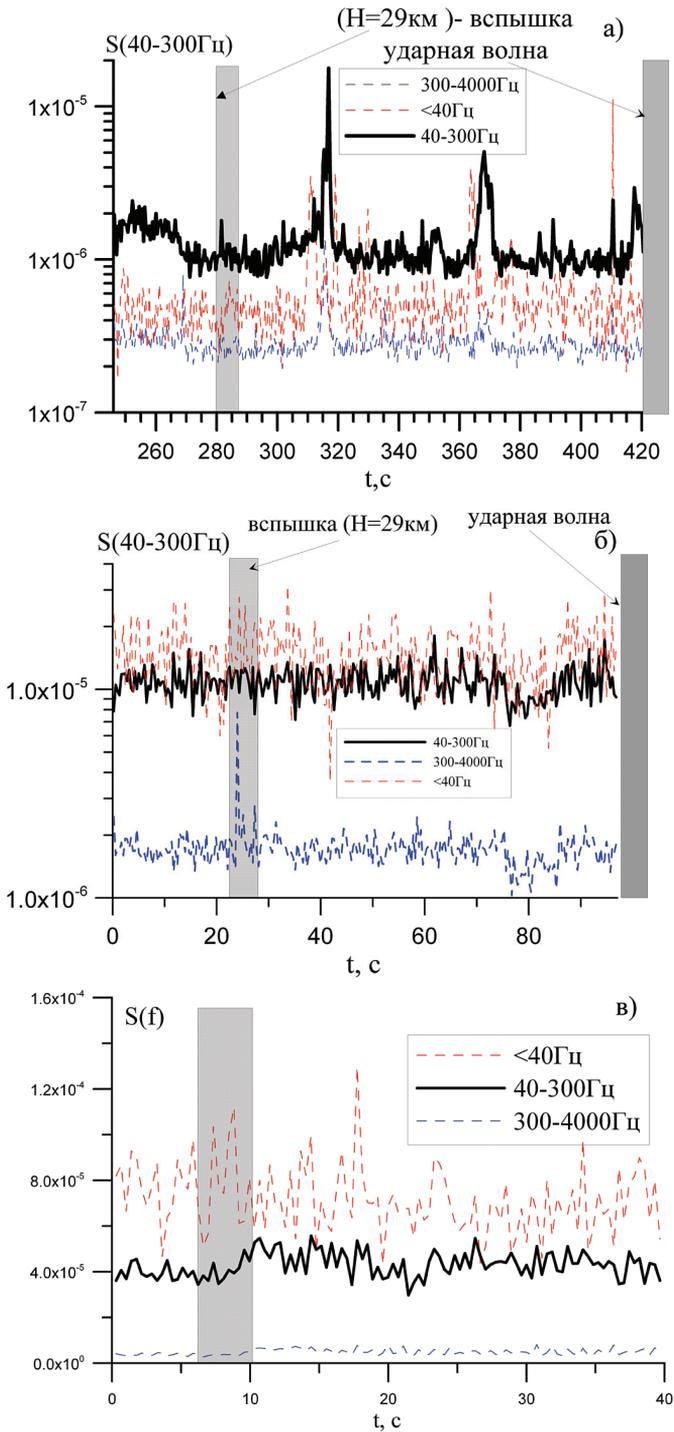


Рис. 9. (а) – соотношение мощностей шумов в различных частотных диапазонах, регистрировавшихся в Челябинске (запись Волкова); (б) – соотношение мощностей шумов, регистрировавшихся в Первомайском (запись Иванова); (в) – соотношение мощностей шумов, регистрировавшихся на Тургорякском шоссе (запись Манинина)

Общее распределение сигналов различных частот во времени (сван диаграмма) представлено на рис. 10: а – для Челябинска (Волков), б – для Тургойского шоссе (Манинин). Сравнение этих рисунков хорошо иллюстрирует различия в характере распределения шумовых всплесков. В близкой к области основного энерговыделения точке это распределение напоминает хаотично распределенные по частоте короткие всплески. В дальней области запись имеет вид скорее прерывающихся линий на конкретных частотах.

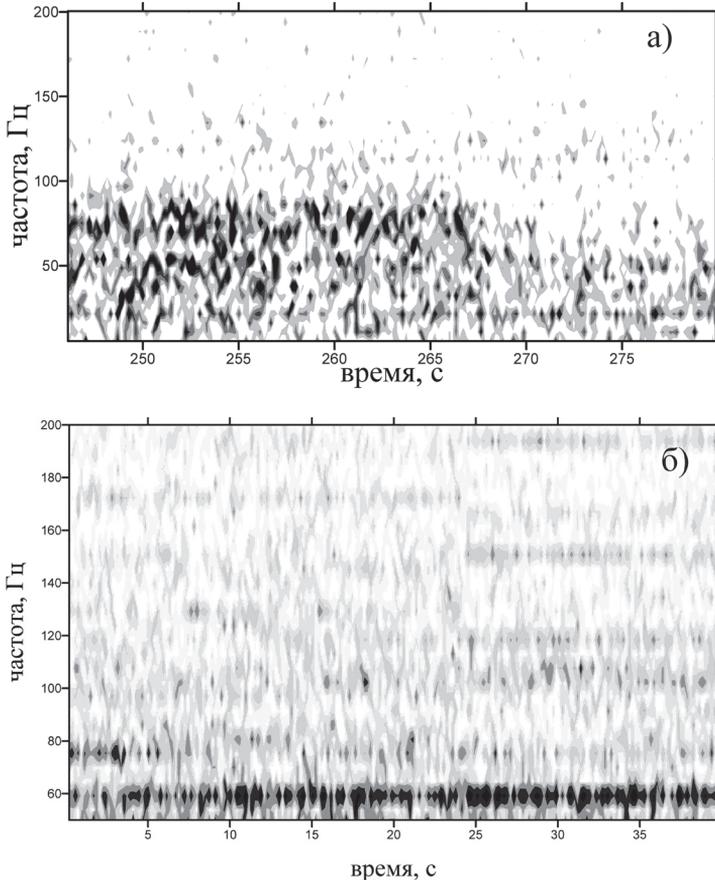


Рис. 10. (а) – зависимость спектрального распределения шумов от времени (Челябинск); (б) – зависимость спектрального распределения шумов от времени (Тургойское шоссе)

Проведем более детальный анализ спектров данных шумов. Спектры для нескольких временных интервалов приведены на рис. 11, а, б, в. Для каждой записи приведены несколько спектров с интервалом времени ~ 20 с в те моменты времени, когда отсутствовали явные антропогенные помехи. Общей чертой всех этих спектров является наличие пиков на циклотронных частотах различных ионов. При этом различие в ионных линиях характерно для различий в концентрациях тропосферных примесных газов в черте города и за городом. Так, в Челябинске основными линиями являются линии оксидов азота NO , NO_2 , а также кислород и углерод. За пределами города возникают ионизованные молекулы воды (возможно,

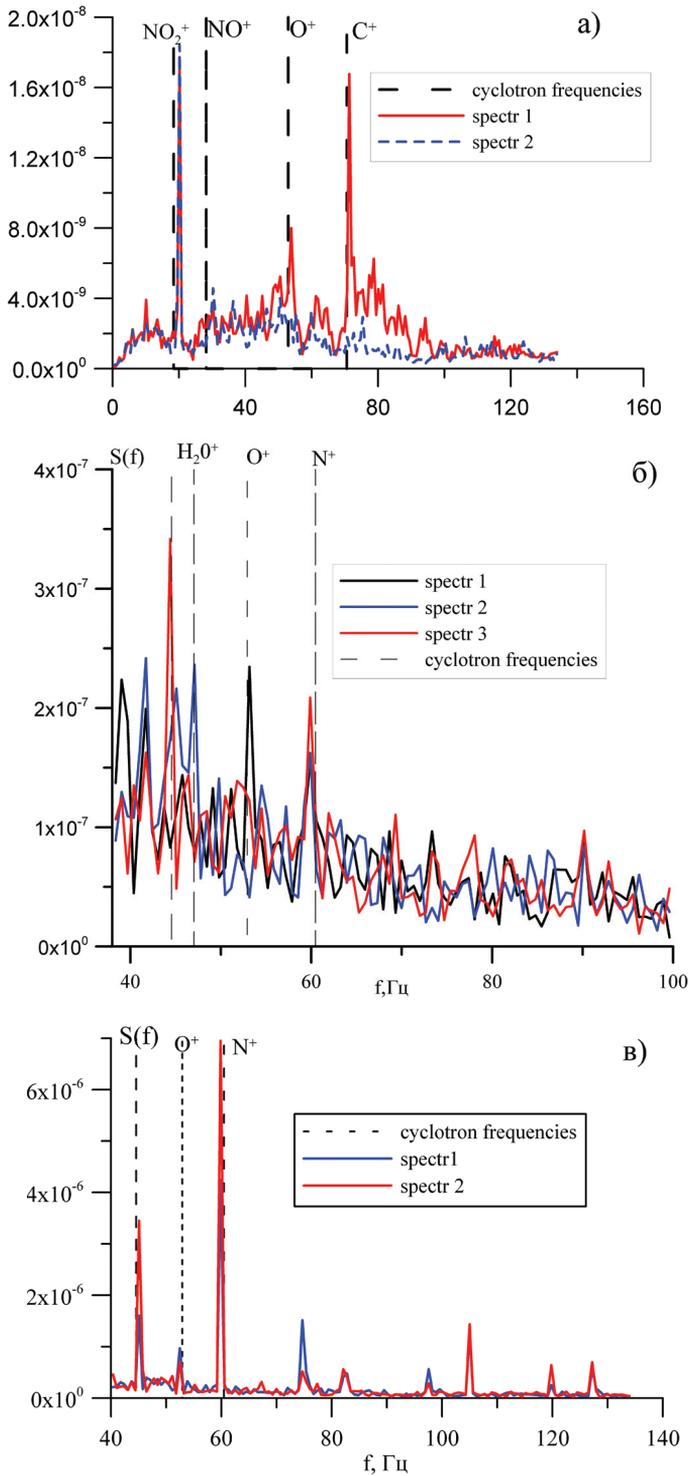


Рис. 11. (а) – спектр акустических шумов в Челябинске (Волков); (б) – спектр акустических шумов в Первомайском (Иванов); (в) – спектр акустических шумов на Тургойском шоссе (Манинин)

это вторичные ионы, образовавшиеся в результате соединения продуктов диссоциативной ионизации NH_3 , так как сечение ионизации воды имеет гораздо больший энергетический порог). По динамике пиков с течением времени видно, что в Челябинске постепенно исчезают легкие компоненты с более высокими циклотронными частотами. В Первомайском на третьем (последнем по времени) спектре самым выраженным становится пик, соответствующий циклотронной частоте ионов примерно той же массы (~44–45 Гц), (в ГФО «Михнево» ~39–40 Гц) что регистрировался в ГФО «Михнево» в спокойных условиях, с учетом разницы в геомагнитном поле в этих двух точках. В удаленном на 80 км к западу от Челябинска пункте (Тургойское шоссе) второй спектр демонстрирует даже более выраженные большие частоты, чем первый. Это, возможно, является проявлением того, что пятно повышенной ионизации дрейфует на запад. В наиболее приближенной к траектории точке (Первомайский рис. 11,а, рис. 11,б) спектры наиболее размыты.

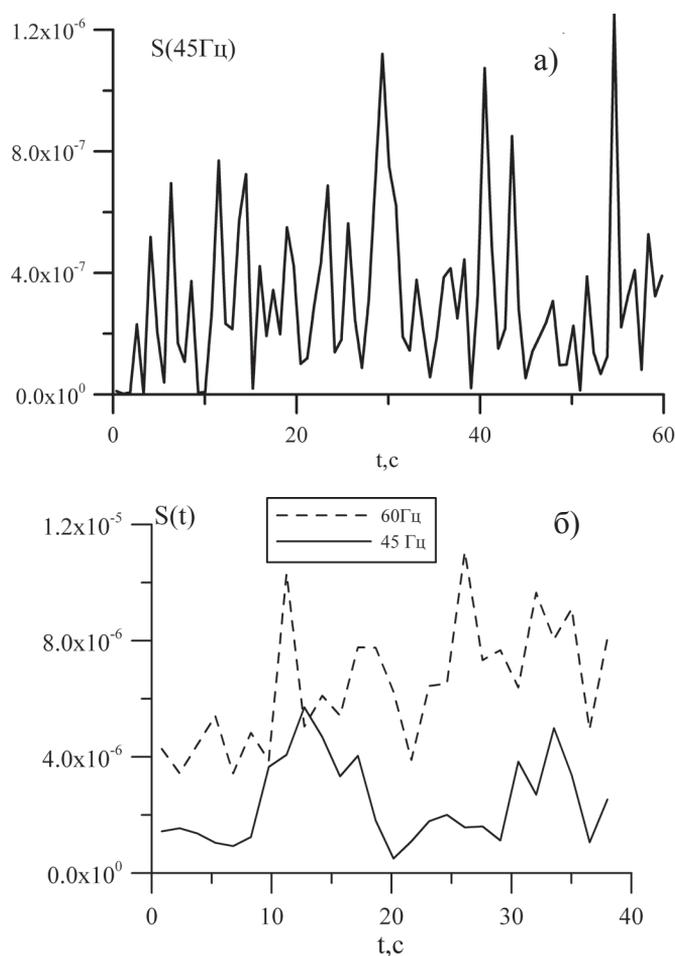


Рис. 12. (а) – временная зависимость интенсивности акустического шума в линии 45 Гц, регистрируемого под траекторией Челябинского метеороида (Первомайский); (б) – временная зависимость интенсивности шума в линиях 45 и 60 Гц, регистрируемого на Тургойском шоссе (80 км от Челябинского метеороида)

Если рассмотреть временную зависимость мощности акустического шума на отдельной частотной линии (45 Гц) для этого пункта, то явно видны колебания мощности с частотой около 0,27 Гц (рис. 12,а).

Эти колебания могут быть проявлением магнитозвуковой волны, теоретически рассмотренной выше. Как и в спокойных условиях (когда возмущения магнитного поля коррелировали с изменением частоты на циклотронной линии) изменения магнитного и электрического полей с частотой 0,27 Гц сдвигают резонансную линию по частоте, постоянно «разбивая» её. Это дает набор отдельных всплесков на разных частотах. Можно предположить, что при падении метеороидов под большими углами к поверхности Земли этот эффект проявляется еще больше и отдельные циклотронные пики не выделяются вообще. Именно поэтому характер шумов как набор циклотронных частот не был до настоящего времени идентифицирован. В точке, удаленной на 80 км, данных колебаний (с частотой 0,27 Гц) уже не видно, но во временной зависимости проявляется другое волновое возмущение, которое приводит к периодическим изменениям мощности линий с периодом около 20 с. Это возмущение возникает (или приходит в данную точку) несколько позже световой вспышки и имеет периодический характер.

Заключение

В работе рассмотрен отклик ионосферы на падение Челябинского метеороида. Показана возможность возникновения целого ряда ионосферных явлений:

1. Формирование крупномасштабной ионизованной области;
2. Возбуждение магнитозвуковой волны;
3. Возбуждение ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых волновых структур, испускающих при перестройке волновые пакеты электромагнитного излучения, приходящие к Земле.

Показано, что звуковые шумы, регистрировавшиеся при падении Челябинского метеороида, соответствуют по характеристикам тем же шумам, которые регистрируются в виде электромагнитного шума (а при повышении шума и как акустические шумы) в приземной атмосфере в спокойных условиях. Предложена модель формирования электрофонного шума как реакция атмосферы (тропосферы) на увеличение амплитуд ионосферных по происхождению электромагнитных шумов, сопровождающих процессы ионосферной релаксации. В основе механизма реакции тропосферы лежит возбуждение резонансов ионов приземной плазмы с дальнейшей передачей энергии нейтральным компонентам воздуха. Электрофонный шум является проявлением механизма естественного обмена энергией между ионосферой и тропосферой через электромагнитные шумы. Этот эффект становится заметен наблюдателю при значительном увеличении амплитуд волновых явлений.

Литература

- Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М., Наука. 1981.
Карташова и др. настоящий сборник.
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, pp. 226–235, 2013)

Кузнецов Е.А., Михайлов А.В. Релаксационные колебания солитонов // Письма в ЖЭТФ, 1994. Т. 60. С. 466–470.

Молодых С.И., Рахматуллин Р.А., Липко Ю.В., Пашинин А.Ю. Анализ периодов аномальных усиления вариаций электромагнитного поля в диапазоне частот 8–35 Гц // Седьмая Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. С.-Петербург, 24–27 сентября 2012. Сборник трудов. С. 170–171.

Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лавров О.В., Скороход А.И., Шумский Р.А. Озон и окислы азота в приземном воздухе северной Евразии по наблюдениям в экспериментах TROICA // Изв. РАН Физика атмосферы и океана 2011. Т. 47, № 3. С. 343–358.

Попова и др. 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 thetmospheric 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. L27–L31.

Beech, M., and L. Foschini, Leonid electrophonic bursters // Astron. Astrophys. 2001. V. 367. PP. 1056–1060.

Beech, M., P. Brown, and J. Jones, VLF detection of fireballs // Earth Moon Planets 1995. V. 68, PP. 181–188.

Berngardt O.I., V.I. Kurkin, G.A. Zhrebtsov, O.A. Kusonski, S.A. Grigorieva Ionospheric effects during first 2 hours after the Chelyabinsk meteorite impact // arXiv:1308.3918v1 [physics.geo-ph] 19 Aug 2013.

Borovička, J., Popova, O.P., Golub', A.P., Kosarev, I.B., Nemtchinov, I.V.: 1998, Astron. Astrophys. 337, 591–602.

Bradshaw J., Davis D., Grodzinsky G., Smyth S., Sandholm S. and S. Liu. Observed distribution of nitrogen oxides in the remote free troposphere from the NASA global tropospheric experiment programs // Reviews of Geophysics 2000, 38, 1, pp. 61–116.

Brasseur G.P., Solomon S. Aeronomy of the middle atmosphere: Chemistry and Physics of the stratosphere and mesosphere. Springer 2005.

Bronshnten V.A. A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Sys. Res. 1983. V. 17, pp. 70–74.

Bronshnten V.A. Electrical and electromagnetic phenomena associated with the meteor flight // Sol. Sys. Res. 1991. V. 25, pp. 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, pp. 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. PP. 1259–1267.

Drobnock G.J. Meteors Producing VLF Signatures Independent of Producing Electro-phonic Sounds // WGN, Journal of the International Meteor Organization. 2001. V. 29, N. 1/2, pp. 45–50.

Drummond, J.D., C.S. Gardner, and M.C. Kelley. Catching a falling star, Sky Telescope, June 2000. 99, pp. 46–49.

Durney C.H., Rushworth C.K., Anderson A.A. Resonant AC-DC magnetic fields: calculated response // Bioelectromagnetics 1988, V. 9, pp. 315–336.

Edmonds D.T. Larmor precession as a mechanism for elf effects tuned by static magnetic field // Proc. Of E.B.E.A. Conf 1992. PP. 7–11.

Eisele F.L. Natural and transmission line produced positive ions // J. Geophys Res. 1989. V. 94. PP. 6309–6318.

Golub', A.P., Kosarev, I.B., Nemtchinov, I.V., Popova, O.P. Emission spectra of bright bolides // *Solar System Res.* 1997, V. 31, 85–98.

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. PP. 1611–1621.

Hirsikko A., Nieminen T., Gagne S., Lehtipalo K., Manninen H.E., Ehn, M., Horrak U., Kerminen V.-M., Laakso L., McMurry P.H., Mirme A., Petaja T., Tammet H., Vakkari V., Vana M., Kulmala M. Atmospheric ions and nucleation: a revive of observations // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011. V. 11. PP. 767–798.

Jenniskens, P., Meteor stream activity. III: Measurement of the first in a new series of Leonid outburst // *Meteorit. Planet. Sci.* 1996. V. 31. PP. 177–184.

Junninen H., M. Ehn, T. Pluosujarvi, et al. A High-resolution mass spectrometer to measure atmospheric ion composition. *Atmos. Mens. Tech* 3, pp. 1039–1053, 2010.

Kartashova et al. A field study of the Chelyabinsk airburst event. 2014, IMC Proceedings (in press).

Kaznev, V.Y., Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis // *Sol. Sys. Res.* 1994. V. 28. PP. 49–60.

Keay, C.S.L., Anomalous Sounds from the entry of meteor fireballs // *Science*, 1980a. V. 210. PP. 11–15.

Keay, C.S.L., Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs // *J.R. Astron. Soc. Canada.* 1980b, 74. PP. 253–260.

Keay, C.S.L., Meteor fireball sounds identified // *Asteroids, Comets, Meteors*, 1991, 1992a, pp. 297–300.

Keay, C.S.L., Electrophonic sounds from large meteor fireballs // *Meteoritics.* 1992b. V. 27. PP. 144–148.

Keay, C.S.L., Electrophonic Sounds Catalog // *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* 1994. V. 6. PP. 151–172.

Keay, C.S.L., and Z. Ceplecha, Rate of observation of electrophonic meteor fireballs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. PP. 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.

Kuznetsov E.A., Mikhailov A.V., Shimokhin I.A. Nonlinear interaction of soliton and radiation // *Physica D.* 1995. V. 8. PP. 201–215.

Lednev V.V. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems // *Bioelectromagnetics.* 1991. V. 12. PP. 71–75.

Lee T., Yu X-Y, Kreidenweis S.M., Wi.C. Malm, J.L. Collett. Semi-continuous measurement of PM_{2.5} ionic composition at several rural locations in the United States // *Atmospheric Environment.* 2008. V. 42. PP. 6655–6669.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science.* 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Price, C., and M. Blum, ELF/VLF Radiation Produced by the 1999 Leonid Meteors // *Earth Moon Planets.* 2000. 82/83. PP. 545–554.

Thompson C.J., Briggs K.M., Farrell P., Fleming A., Hocking B., Joyner K., Anderson V., Wood A.W., Nonlinear dynamic of charged particles interacting with combined ac-dc electromagnetic fields // *Physica A.* 1995. V. 220. PP. 471–484.

Vince G., Szasz A., Liboff A.R. New Theoretical treatment of ion resonance phenomena // *Bioelectromagnetics.* 2008, V. 29. PP. 380–386.

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.