

УДК 551.594.12

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УНЧ ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ГРОЗЫ И ТАЙФУНЫ

© 2025 г. В. А. Пилипенко^{1, 2, *}, Д. Д. Позднякова^{1, 3, **}, Ю. В. Поклад^{4, ***}¹Институт физики Земли РАН, Москва, Россия²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия⁴Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: pilipenko_va@mail.ru,

**E-mail: d_pozdnyakova@live.ru,

***E-mail: poklad@mail.ru

Появление резонансной спектральной структуры (РСС) – многополосных спектров электромагнитных шумов в диапазоне первых Гц, наблюдаемой на земной поверхности в ночные часы, принято ассоциировать с возбуждением ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) в верхней ионосфере. В предлагаемом обзоре обсуждаются различные представления о конкретных механизмах возбуждения ИАР молниевыми разрядами: (1) генерация набора собственных мод ИАР, (2) образование эхо-импульса при отражении первичного импульса от верхней границы ИАР, (3) наличие уединённых импульсов с определенной длительностью. Рассматриваются аргументы как в пользу, так и против каждого предложенного механизма. Сформулированы качественные представления, как импульсная структура отклика на грозовой разряд должна быть видна в данных низкоорбитальных спутников. Рассмотрен отклик ионосферного магнитозвукового волновода на вулканическую грозовую активность. Обсуждается обнаружение над тайфунами в верхней ионосфере «магнитной ряби» – флуктуаций малой амплитуды с периодом 5–10 с, вызванных мелкомасштабными продольными токами, которые, по-видимому, генерируются акустическими волнами в нижней ионосфере. Сформулированы еще нерешенные проблемы электромагнитной связи между атмосферой и ионосферой в диапазоне ИАР.ⁱ

Ключевые слова: молния, тайфуны, волны Pc1, ионосфера, ионосферный альвеновский резонатор, резонансная спектральная структура, ионосферный волновод.

Для цитирования: Пилипенко В.А., Позднякова Д.Д., Поклад Ю.В. Электромагнитный УНЧ отклик ионосферы на грозы и тайфуны // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 1. С. 12–34. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_12

Введение

Геофизические процессы с большим выделением энергии в литосфере (землетрясения), атмосфере (тайфуны, грозы), магнитосфере (магнитные бури и суббури) охватывают все геофизические оболочки, при этом наибольшая плотность мощности имеет тенденцию концентрироваться в малых временных и пространственных масштабах. Таким образом, импульсные мелкомасштабные процессы, несмотря на их относительно небольшую длительность и масштаб, могут сопровождаться существенным энергетическим обменом между геофизическими средами. В качестве примера можно вспомнить процесс воздействия на ионосферу «сверху» с наибольшим энерговыделением в околоземной космической плазме – магнитосферную суббурю. Механизм возникновения суббури пока окончательно не установлен, но, вероятно, он тесно связан с мелкомасштабными альвеновскими структурами, которые несут очень локализованное, но интенсивное продольное электрическое поле, приводящее к ускорению авроральных электронов [Chaston et al., 2002].

ⁱ По материалам доклада на VII Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах».

Среди воздействий на ионосферу «снизу» в первую очередь надо упомянуть атмосферные грозы, которые представляют собой одно из самых мощных геофизических возмущений и обеспечивают импульсное взаимодействие атмосферы с ионосферой/магнитосферой со значительным выделением энергии над активными грозовыми ячейками. В земной атмосфере в каждый момент времени идет ~2000 гроз, сопровождаемых 50–100 молниями в секунду. Электрические грозовые разряды являются одним из естественных источников электромагнитного излучения в широкополосном диапазоне от долей Гц до десятков МГц, охватывающим диапазоны частот УНЧ-КНЧ-ОНЧ. Наибольшая спектральная плотность сосредоточена в диапазоне очень-низких-частот (ОНЧ – несколько кГц), хотя существенная спектральная мощность содержится и в диапазонах крайне-низких-частот (КНЧ – десятки-сотни Гц) и ультра-низких-частот (УНЧ – первые Гц) [Greifinger, Greifinger, 1976; Fraser-Smith, 1993].

Также на ионосферу могут оказывать влияние сильные метеорологические возмущения (ураганы, тайфуны), сопровождающиеся генерацией акустико-гравитационных волн (АГВ) и турбулентности в атмосфере [ПЕРЕВАЛОВА, ИШИН, 2010; Polyakova, Perevalova, 2013, АДУШКИН и др., 2022]. Возможный канал воздействия атмосферных процессов на возмущения ионосферной плазмы и геомагнитного поля связан с движениями нейтральной компоненты в нижней ионосфере, которые приводят к увлечению заряженных частиц и локальной генерации электрических токов и возмущений плотности плазмы [Исаев и др., 2010]. Возбуждаемая в Е-слое токовая система включает продольные токи, которые переносят возмущение вдоль силовых линий геомагнитного поля в верхнюю ионосферу. Исходя из этих представлений, можно ожидать повышения уровня электромагнитных шумов и плазменной турбулентности над тайфунами и ураганами в верхней ионосфере. Действительно, благодаря высокой чувствительности магнитометров на борту современных низкоорбитальных спутников, удалось обнаружить эффекты генерации магнитных возмущений, вызванных воздействием АГВ на проводящую ионосферную плазму [Park et al., 2015]. В частности, [Nakanishi et al., 2014] обнаружили наличие «магнитной ряби» – флуктуаций с малой амплитудой (от 1 до 5 нТ), перпендикулярных геомагнитному полю, с характерным периодом около нескольких десятков секунд. Предположительно наблюдаемые магнитные флуктуации обусловлены пересечением спутником пространственной структуры продольных токов от ионосферного динамо, возбуждаемого АГВ во время активности тайфуна [Aoyama et al., 2017].

Плазменное окружение Земли – ионосфера – играет роль своеобразного «камертона», реагирующего на возмущение не только «сверху», но и «снизу». Особенно эффективно электромагнитное взаимодействие между атмосферой и верхней ионосферой проявляется в частотном диапазоне природных резонаторов и волноводов [Pilipenko, 2012]. В предлагаемом обзоре обсуждаются существующие представления о механизмах электромагнитного отклика околоземного пространства в УНЧ диапазоне на воздействие «снизу» грозовой и метеорологической активности.

Резонансные структуры в околоземном пространстве

Резонаторы и волноводы для магнитогидродинамических (МГД) волн играют важную роль в космической геофизике – магнитосферный альвеновский резонатор, Шумановский резонанс (ШР) [Блиох и др., 1977], ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) [Поляков, Раппопорт, 1981; Belyaev et al., 1990], ионосферный волновод [Greifinger, Greifinger, 1968]. Они приводят к формированию квазипериодических излучений и способствуют накоплению волновой энергии в некоторых областях околоземного пространства [Pilipenko, Heilig, 2016]. Кроме того, формируемые ими гармонические излучения могут использоваться для дистанционной гидромагнитной диагностики параметров магнитосферы и ионосферы [Nakarjakov et al., 2016].

Глобальные ШР в полосе частот около нескольких десятков Гц постоянно подпитываются мировыми грозовыми центрами и наблюдаются на спектрограммах в виде шумовых полос, основной тон приходится на частоту ~7.8 Гц. В УНЧ диапазоне ниже ШР возникает резонансная спектральная структура (РСС), наблюдаемая на низких [Bosinger et al., 2002], средних [Беляев и др., 1987] и высоких [Belyaev et al., 1999; Yahnin et al., 2003; Semenova et al., 2008] широтах. Пример РСС на средних

широтах в ночные часы дан на рис. 1. Средняя разница между спектральными линиями в осенне-зимний период составляет $\sim 0.5\text{--}0.6$ Гц, а в летний период снижается до $\sim 0.2\text{--}0.3$ Гц [Hodnett et al., 2023]. Возникновение РСС принято связывать с ИАР в верхней ионосфере [Беляев и др., 1989]. Нижней границей ИАР является Е-слой ионосферы, тогда как верхняя граница образуется на высоте нескольких тысяч км из-за частичного отражения альвеновских волн от резкого градиента вертикального профиля альвеновской скорости $V_A(z)$ выше максимума F-слоя. Затухание и добротность мод ИАР сильно зависят от величины скачка альвеновской скорости в верхней ионосфере и от проводимости нижней ионосферы. Качественная иллюстрация возбуждения ИАР приведена на рис. 2.

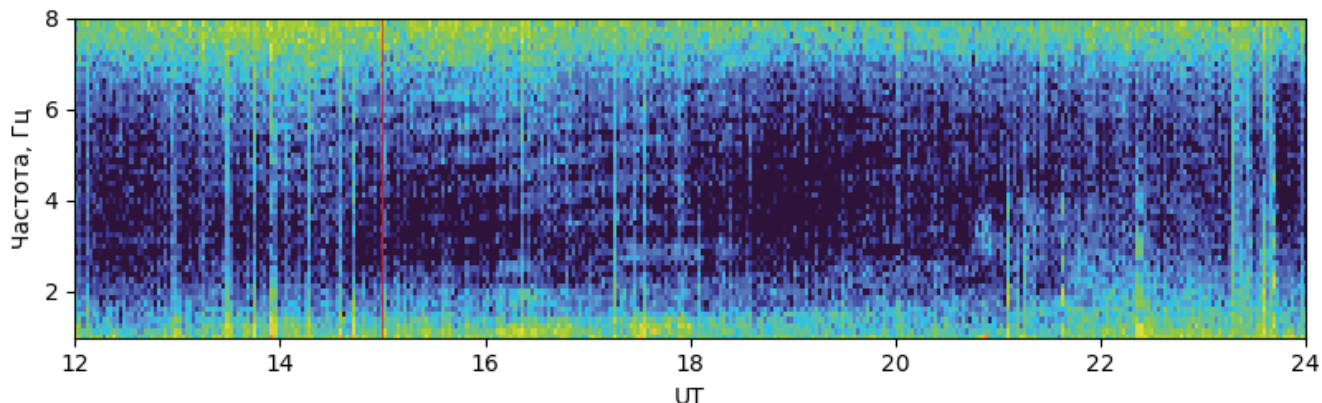


Рис. 1. Пример РСС, зарегистрированной в ночные часы на станции Kawatabi (Япония). Вертикальная красная линия – момент местной полночи

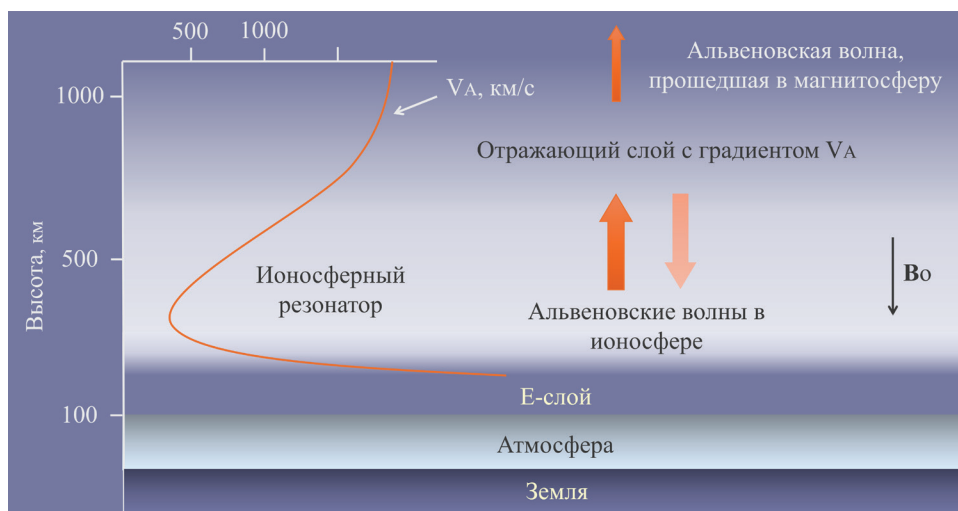


Рис. 2. Схема возбуждения альвеновских колебаний в ИАР. Часть колебаний отражается от градиента $V_A(z)$ и захватывается в верхней ионосфере, а часть вытекает в магнитосферу

Ионосферная полость с минимумом в вертикальном профиле $V_A(z)$ работает не только как резонатор для альвеновских волн, но и как волновод для быстрой магнитозвуковой (БМЗ) моды [Fujita, Tamao, 1988]. Волноводные БМЗ моды могут распространяться на большие расстояния (до нескольких тысяч км) вдоль ионосферы как от магнитосферных источников [Pilipenko et al., 2011], так и от технологического воздействия (ракетных запусков) [Pilipenko et al., 2005]. В частотной области волноводное распространение проявляется в возникновении нижней частоты обрезания, соответствующей критической частоте волновода (ниже основной частоты ИАР).

Хотя спектральные свойства ИАР хорошо воспроизводятся многочисленными аналитическими и численными моделями [Demekhov et al., 2000; Prikner et al., 2000; Lysak, 1993; 2013; Hebden et al., 2005], вопрос о физическом механизме возбуждения колебаний ИАР до сих пор не решен однозначно. В авроральных широтах может действовать механизм резонансной передачи энергии от магнитосферных конвективных потоков модам ИАР в режиме самовозбуждения [Trakhtenherts, Feldstein, 1991]. Также

ИАР может стимулировать неустойчивость, вызванную обратной связью между продольным током волны и ионосферой за счет модификации ионосферной проводимости высыпанием энергичных электронов [Lysak, 1991; Pokhotelov et al., 2001]. Очевидно, что эти механизмы не могут работать в средних и низких широтах. Более того, оказалось, что геомагнитная возмущенность подавляет появление РСС [Molchanov et al., 2004; Parent et al., 2010].

Возможный источник энергии для возбуждения ИАР на средних широтах связан с грозовыми разрядами. Таким источником могут быть мировые грозовые центры в экваториальной области [Demekhov et al., 2012; Ермакова и др., 2008]. Однако теоретические оценки показали, что вклад далеких отрицательных разрядов облако-земля с типичными зарядовыми моментами в среднеширотное электромагнитное поле в диапазоне ИАР примерно на два порядка меньше наблюдаемой интенсивности [Fedorov et al., 2006]. Чтобы преодолеть эту трудность, Shalimov и Bosinger (2008) предположили, что относительно редкие ($\sim 10\%$), но на порядок более интенсивные положительные разряды CG+ могут обеспечить необходимый уровень ИАР на больших расстояниях. Таким образом, возможная роль далеких гроз в стимуляции ИАР остается дискуссионной. Разумно полагать, что генерировать сигналы достаточной интенсивности в ИАР диапазоне могут и близлежащие грозы [Surkov et al., 2006; Plyasov et al., 2012].

Хотя в настоящее время все исследователи связывают генерацию РСС с грозовой активностью, но в представлениях о конкретных механизмах возбуждения ИАР молниевыми разрядами остаются существенные расхождения. Принципиально возможными являются следующие механизмы:

- (1) Одновременное возбуждение в ИАР набора стоячих альвеновских колебаний между нижней и верхней границами резонатора.
- (2) Парная импульсная структура электромагнитных возмущений, формирующаяся за счет отражения от верхней границы ИАР.
- (3) Импульсная составляющая с определенной длительностью импульсов.

Ниже мы рассмотрим эти механизмы более подробно и обсудим аргументы как в пользу, так и против каждого механизма. При этом мы попытаемся сформулировать возможные направления исследований для выяснения вклада перечисленных механизмов взаимодействия поля грозового разряда в формирование РСС по наземным и спутниковым данным.

(1) Возбуждение гармоник ИАР

Построение картины взаимодействия электромагнитного излучения грозовых разрядов с ионосферой требует решения большого числа взаимосвязанных задач. Предположим, следуя традиционным представлениям, что РСС обусловлена тем, что ИАР заполнен гармониками резонатора, представляющими собой стоячие колебания между точками отражения. Для того, чтобы корректно описать спектральные характеристики и пространственную структуру мод ИАР в реалистичных условиях, использовалась численная модель системы магнитосфера-ионосфера-атмосфера-земля [Fedorov et al., 2016a,b] с наклонным геомагнитным полем $\mathbf{B}_0$ (наклонение $I \leq \pi/2$). Была введена косоугольная система координат x_1, x_2, x_3 , в которой координатные линии x_3 совпадают с силовыми линиями магнитного поля. Атмосфера и земля полагались горизонтально-слоистыми средами с проводимостями σ_a и σ_g . Ионосферная плазма имеет анизотропную проводимость: педерсеновскую $\sigma_p(z, \omega)$ и холловскую $\sigma_H(z, \omega)$. Магнитосферная плазма над ионосферой характеризуется альвеновской скоростью V_A и альвеновским волновым числом $k_A = \omega/V_A$.

Для расчета спектральных характеристик ИАР рассматривалась полная система связанных волновых уравнений в неоднородной среде. Волновые электрическое и магнитное поля раскладывались на две моды: альвеновская, в которой продольная магнитная компонента вдоль $\mathbf{B}_0$ обращается в нуль ($b_{\parallel} = 0$); и БМЗ мода, в которой продольная составляющая тока равна нулю $j_{\parallel} = 0$. В свою очередь, электромагнитное возмущение в атмосфере состоит из электрической (ТМ) Е-моды и магнитной (ТЕ) Н-моды. Предполагалось, что поперечная структура волны вытянута в азимутальном направлении. В

этом случае альвеновская мода имеет только азимутальную магнитную составляющую B_2 , тогда как волновое электрическое поле с компонентой E_1 лежит в меридиональной плоскости и поперечно $\mathbf{B}_0$. В свою очередь БМЗ волна имеет ненулевую азимутальную электрическую составляющую E_2 , радиальную магнитную компоненту B_1 и компоненту сжатия $B_3 \equiv B_{\parallel}$, тогда как азимутальная составляющая $B_2 = 0$.

Волновая структура определялась из решения уравнений Максвелла с тензором комплексной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$. Элементы тензора $\epsilon_{\perp}$ и ig для холодной многокомпонентной столкновительной плазмы рассчитывались по соотношениям из [Гинзбург, 1967]. В системе координат, ориентированной по геомагнитному полю, компонента тензора $\epsilon_{\parallel} \rightarrow \infty$, и уравнения Максвелла сводятся к системе

$$\begin{aligned} \partial_3 B_1 &= ik \cot IB_1 - \omega \mu_0 g \sin^{-1} I E_1 + i(k^2 / \omega - \omega \mu_0 \epsilon_{\perp}) E_2, \\ \partial_3 B_2 &= i \omega \mu_0 \epsilon_{\perp} \sin^{-2} I E_1 - \omega \mu_0 g \sin^{-1} I E_2, \\ \partial_3 E_1 &= i \omega B_2, \\ \partial_3 E_2 &= -i \omega B_1 + ik \cot IE_2. \end{aligned} \quad (1)$$

где μ_0 и ϵ_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума. Если холловской проводимостью σ_H пренебречь, положив $g = 0$, то основная система (1) распадается на две несвязанные подсистемы для альвеновских и БМЗ волн.

Образование верхней отражающей границы ИАР нетривиально, так как волновое уравнение для альвеновских волн не имеет точки отражения в отличие от уравнения для БМЗ моды. Частичное отражение альвеновских волн происходит из-за нарушения ВКБ приближения на резком (по сравнению с длиной волны) градиенте профиля альвеновской скорости $V_A(z)$. Расчет волнового импеданса $Z(z) = \mu_0 E_1 / B_2$ дает на высотах $z > 1400$ км значение, соответствующее бегущей альвеновской волне $|Z| \rightarrow |Z_A| = \mu_0 V_A \sin I$, а на меньших высотах $|Z|$ падает до более низких значений. Фазовый сдвиг $\psi(z) = \text{Arg}(E_1 / B_2)$ между электрической и магнитной составляющими при $z > 1400$ км $\psi \rightarrow 0$, что является признаком волны, вытекающей из ИАР, а при $z < 1200$ км $\psi \rightarrow \pi/2$, что типично для стоячей волны внутри резонатора. Таким образом, высоту ~ 1400 км можно рассматривать как точку отражения альвеновской волны в рассматриваемой модели.

Рассмотрим, какие результаты вытекают из представлений об одновременном возбуждении грозами набора мод ИАР. Расчеты суточного хода собственных частот и добротностей резонатора для первых 4-х гармоник ИАР показаны на рис. 3 из [Fedorov et al., 2016]. Добротность Q определяется двумя

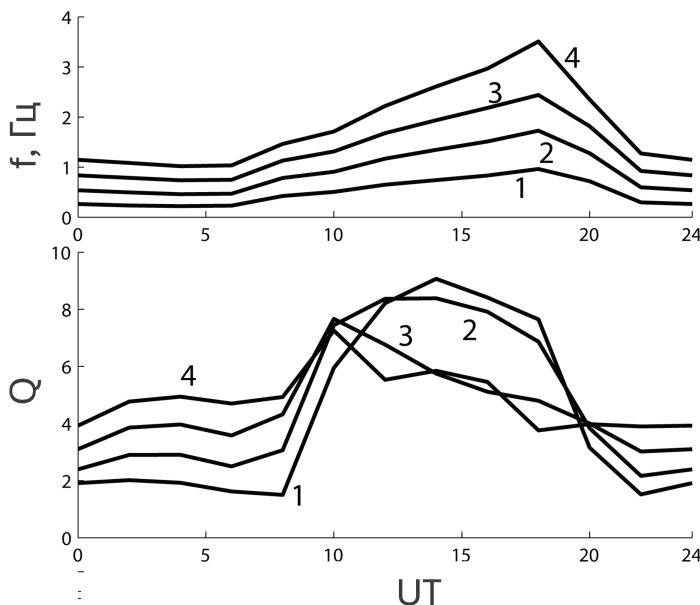


Рис. 3. Результаты расчета суточного хода собственных частот (верхний график) и добротностей резонатора Q (нижний график) для первых 4-х гармоник ИАР для среднеширотной станции Moshiri (LT = UT+9) [Fedorov et al., 2016]

видами потерь – джоулевым затуханием в Е-слое и утечкой в магнитосферу через верхнюю стенку резонатора. В дневные часы Q невелика, и резонансные свойства ИАР вряд ли смогут проявиться. В ночные же часы (09–20 UT) добротность заметно возрастает до $Q \sim 8$. При этом частоты гармоник резонатора меняются в течение ночи, следуя изменениям плотности плазмы верхней ионосферы.

Диагностика плотности верхней ионосферы и TEC по наземным магнитным наблюдениям спектральной структуры ИАР

Основную спектральную характеристику ИАР – разность между частотами гармоник Δf , можно использовать для наземного мониторинга максимальной плотности плазмы F-слоя N_m и полного электронного содержания (TEC) ионосферы в ночное время. Соответствие Δf с N_m и TEC (измеряемого в единицах TECu) в ночные часы, когда проявляется резонансная структура ИАР, согласно численной модели [Fedorov et al., 2016b], аппроксимируется следующими зависимостями:

$$N_m [m^{-3}] = 1.2 \cdot 10^5 \left(\frac{B_{0z}}{41200} \right) (\Delta f [Hz])^{-1}, \quad TEC [TECu] = 3.1 \left(\frac{B_{0z}}{41200} \right) (\Delta f [Hz])^{-1},$$

где B_{0z} – вертикальная компонента геомагнитного поля в точке наблюдения. Вариации этих величин в течение суток показаны на рис. 4. Методы наземной диагностики параметров верхней ионосферы по спектральным характеристикам РСС начали активно развиваться [Потапов и др., 2021].

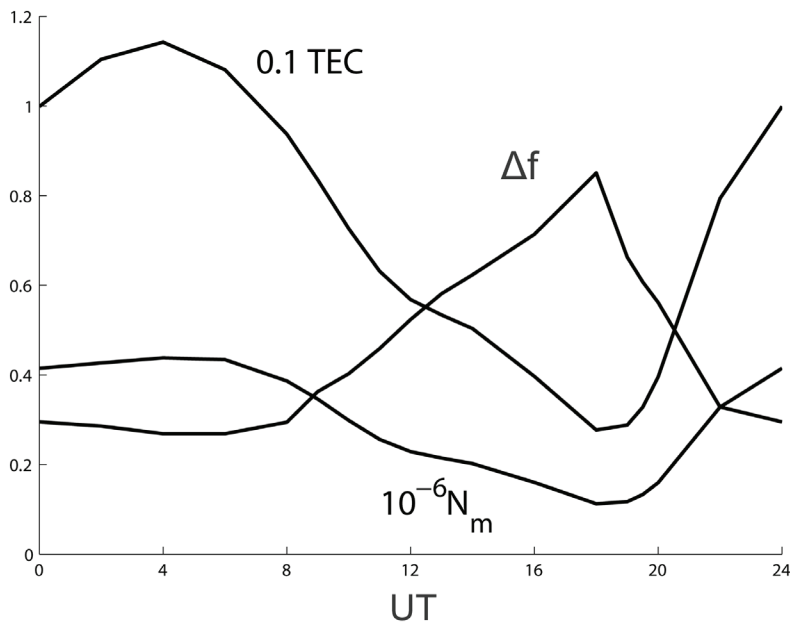


Рис. 4. Вариации РСС Δf и параметров верхней ионосферы N_m и TEC по численным расчетам для условий станции Moshiri [Fedorov et al., 2016b]

Диагностика граничных условий ИАР по набору зарегистрированных спектральных максимумов

По набору отношений частот гармоник можно установить симметрию/асимметрию граничных условий в ИАР. Для наглядности приведем решение элементарной задачи об альвеновских колебаниях в однородном резонаторе длиной L с различными условиями на границах резонатора $z = 0$ и $z = +L$:

$$d_z^2 E + k_A^2 E = 0.$$

Фундаментальная собственная частота резонатора $\omega_A = V_A/L$.

▼ В случае симметричных граничных условий $E(z = 0) = E(z = L) = 0$ (идеальное отражение от проводника с коэффициентом $R = 1$ без изменения фазы) получаем решение $\omega_n = n\omega_A$ ($n = 1, 2, \dots$).

Отношение частот гармоник к частоте основной моды $\frac{\omega_n}{\omega_1} = 2, 3, 4, \dots$

▼ При асимметричных граничных условиях $E(z=0)=0$, $\partial_z E(z=L)=0$ (отражение от верхней границы как от диэлектрика с коэффициентом $R = -1$, когда фаза меняется на π) получаем, что $\omega_n = \omega_A(0.5 + n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). В этом случае отношение частот гармоник к частоте основной моды $\frac{\omega_n}{\omega_0} = 3, 5, 7, \dots$

Статистический анализ спектральных характеристик РСС показал преобладание значений $\omega_n/\omega_1 = 3, 5, 7, \dots$ [Potapov et al., 2014]. Это подтверждает представления об отражении альвеновских волн от верхней стенки ИАР как от диэлектрика.

Pro and Con рассмотренного механизма

Таким образом, численное моделирование собственных частот и функций ИАР, основанное на решении волновых уравнений в реалистичной ионосфере, дает:

- (а) Качественно верное описание суточного хода параметров ИАР;
- (б) Показывает возможность мониторинга критической частоты F-слоя и TEC по наземным данным о спектральных параметрах РСС;
- (в) Указывает на возможность диагностики граничных условий ИАР по набору зарегистрированных спектральных максимумов.

Однако кажется удивительным, что столь короткий импульс грозового разряда способен раскачать ионосферную резонансную систему. Существует немало наблюдений, которые показывают, что в РСС может наблюдаться до 10–15 спектральных линий, а верхняя частотная граница может достигать фундаментальной частоты ШР, и даже превышать ее [Beggan, Musur, 2018]. Такую многоспектральную структуру с большим количеством гармоник трудно объяснить только высокой добротностью резонатора. Действительно, отражение от градиента альвеновской скорости происходит только на частотах, при которых нарушается условие применимости ВКБ, а более высокие частоты уходят в магнитосферу без отражения. Критическая частота, на которой нарушается ВКБ, определяется условием $k_A D \sim 1$, где D – характерный масштаб неоднородности $D^{-1} = \partial \ln V_A / \partial z$. При $V_A = 10^3$ км/с, $D = 50$ км, критическая частота оказывается ~ 4 Гц. Таким образом, ИАР мог бы удерживать не более нескольких мод резонатора. Поэтому в рамках этих представлений трудно понять возможность нарушения ВКБ одновременно для большого числа гармоник ИАР (> 10).

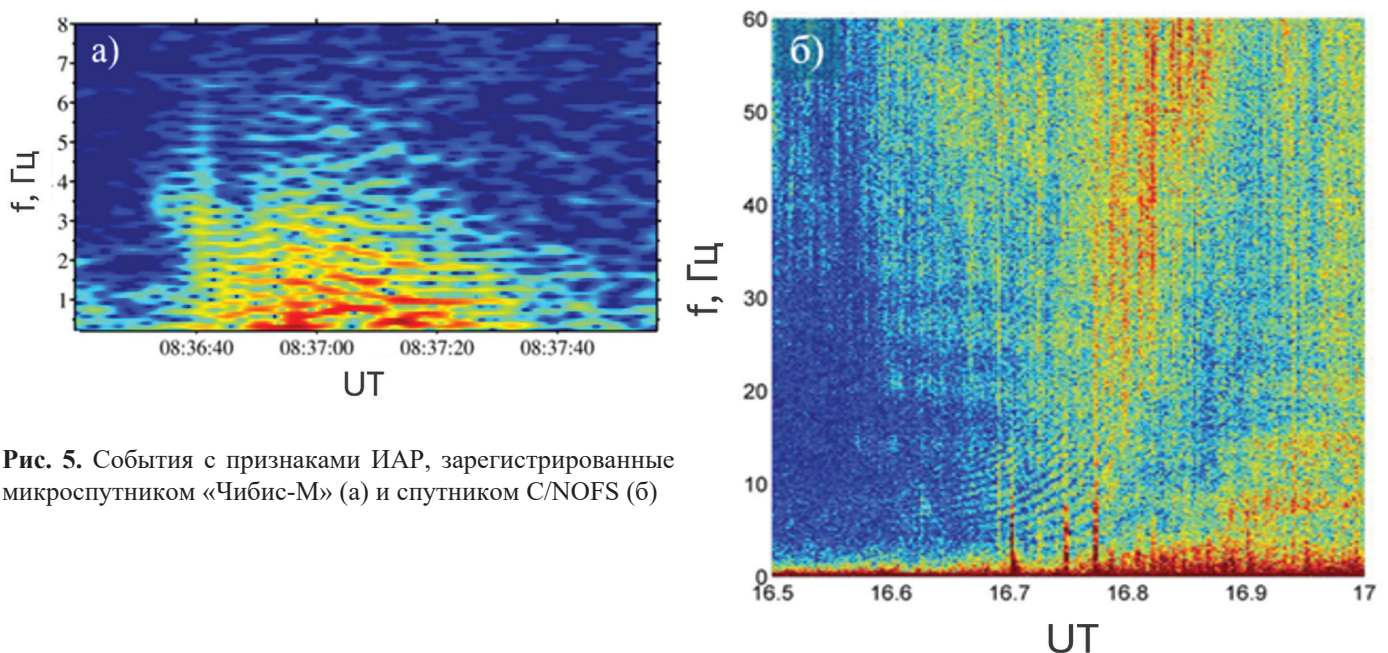


Рис. 5. События с признаками ИАР, зарегистрированные микроспутником «Чибис-М» (а) и спутником C/NOFS (б)

Также странным представляется практически полное отсутствие РСС в данных низкоорбитальных спутников (не более 2–3 событий за несколько лет), орбиты которых проходят внутри ИАР (500–1000 км), в то время как наземные наблюдения показывают регулярное наличие РСС практически каждую ночь. Специальный поиск признаков ИАР в данных микроспутника «Чибис-М» (~ 500 км) за три года работы выявил лишь несколько событий с возможными случаями возбуждения ИАР в верхней ионосфере [Dudkin et al., 2014]. Высокочувствительные измерения электрического поля с помощью 12-метровых антенн на борту спутника C/NOFS (400–850 км) выявили лишь редкие кратковременные излучения («*fingerprints*»), напоминающие спектральные структуры ИАР [Simoes et al., 2012b]. Однако частоты этих структур оказались как минимум в пять раз больше, чем типичные частоты ИАР (см. рис. 5). Стандартная интерпретация таких структур как гармоник ИАР требует необычно низкой плотности плазмы в верхней ионосфере, более чем на порядок, по сравнению с типичными значениями.

(2) Формирование импульсной структуры фона

Было высказано предположение, что механизм формирования РСС не связан с возбуждением набора колебаний в ИАР, а обусловлен специфической импульсной структурой геомагнитного фона во время грозовой активности [Schekotov et al., 2011; Fedorov et al., 2014]. Можно показать, что формально для получения РСС не нужен резонатор, а достаточно отражающей поверхности. Согласно этому сценарию, представленному на рис. 6, возможная схема возбуждения ИАР грозовым разрядом следующая. Разряд молнии возбуждает в атмосфере начальный электромагнитный импульс (ТМ мода). При этом за счет зацепления мод в анизотропной нижней ионосфере возбуждается ТЕ мода. Исходный ТМ-импульс вместе с ТЕ-импульсом распространяются в волноводе ионосфера-земля и практически мгновенно достигают места наблюдения. При этом ТЕ-импульс частично проникает в ионосферу, распространяется вверх по ионосфере как альвеновский импульс и отражается от верхней границы ИАР. Этот импульс возвращается обратно на землю в виде эхо-импульса в ТЕ моде. Задержка между эхом и первичным импульсом равна времени распространения альвеновского импульса вверх и вниз в ионосфере. Таким образом, период повторения импульсов равен основному периоду ИАР.

Как проявится при спектральном анализе наличие пар связанных импульсов и какие спектральные гармоники могут появиться? Для тестирования возможности образования РСС был сгенерирован

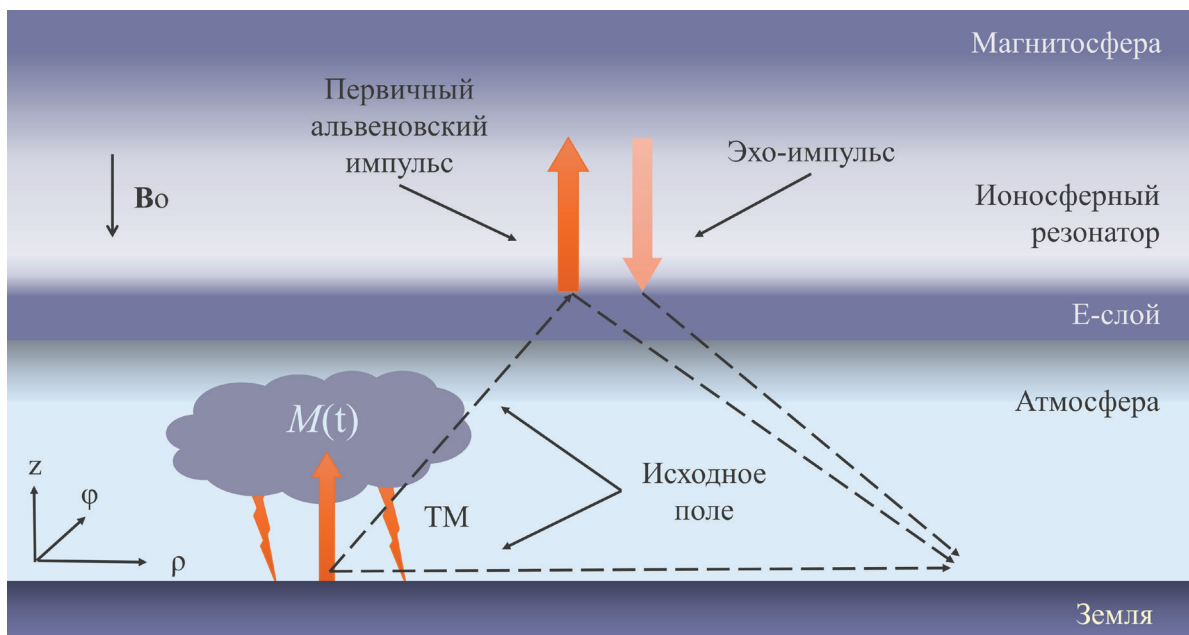


Рис. 6. Схема формирования парной импульсной структуры геомагнитного фона при грозовой активности

временной ряд с короткими модельными импульсами, разнесенными по времени на Δt (рис. 7). Эта серия парных импульсов в анализируемом временном ряду приводит при спектральном анализе к многополосной структуре – появлению спектральных пиков на частоте, соответствующей обратной временной задержке между импульсами, $\Delta f \sim 1/\Delta t$, и ее гармониках. Для однополярных парных импульсов спектральные максимумы должны наблюдаться на частотах $\omega_n = n\omega_A$ ($n = 1, 2, \dots$) целых гармоник. Здесь $\omega_A = 2\pi/T_A$ – фундаментальная частота, определяемая полным временем пробега T_A импульса между двумя отражающими границами. Для разнополярных парных импульсов спектральные максимумы должны наблюдаться на полуцелых гармониках $\omega_n = (n + 1/2)\omega_A$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). В обоих случаях частотный сдвиг между гармониками $\Delta\omega = \omega_A$.

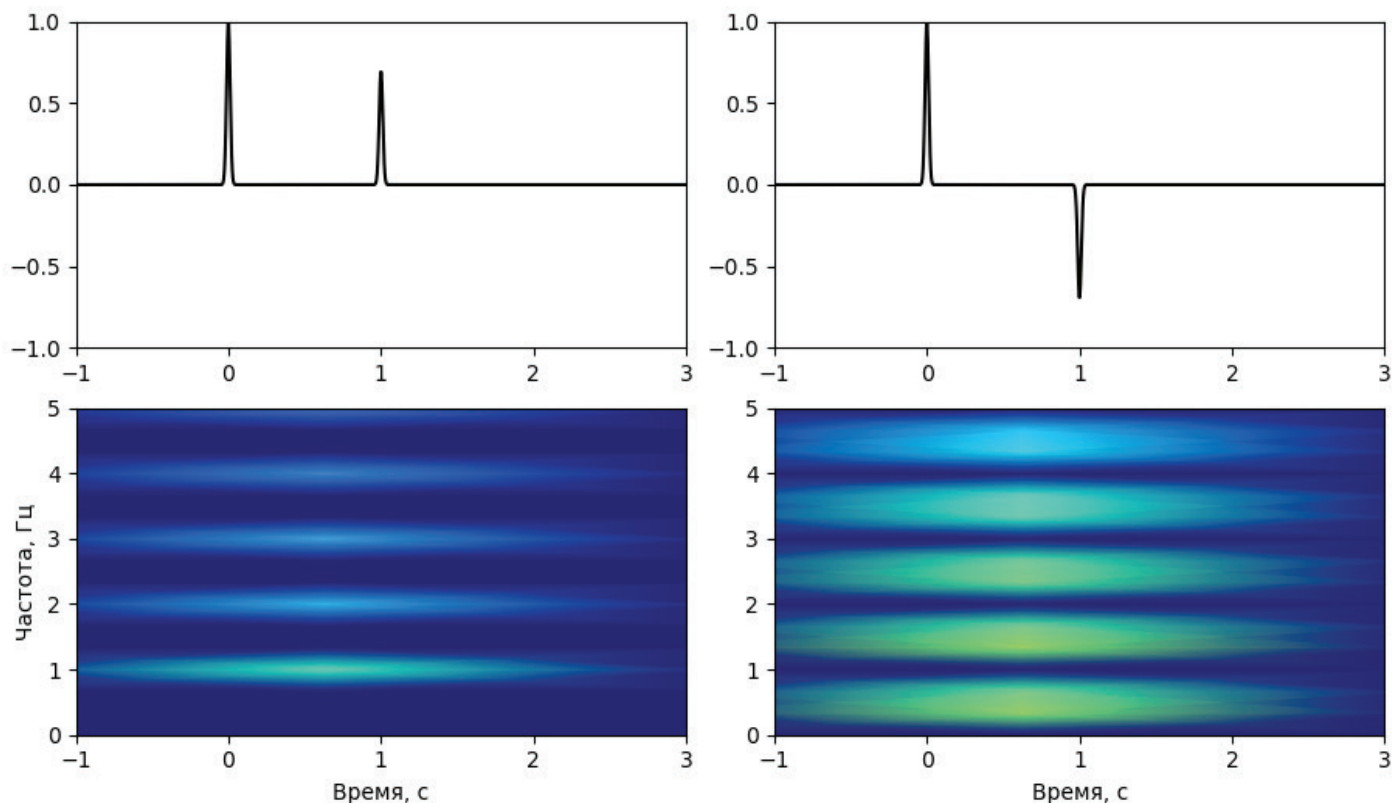


Рис. 7. Модельные импульсы и их спектры: первичный импульс и эхо-импульс той же (слева) и обратной (справа) полярности

Выделение парной импульсной структуры в наземных данных

Для многих событий с РСС действительно наблюдалась специфическая реакция на молниевый разряд – за основным импульсом следовал вторичный импульс в D-компоненте (рис. 8). Чтобы выделить парные импульсы во временном ряду, применялся метод наложенных эпох (МНЭ), где за реперную точку брались моменты сильных первичных импульсов. Усредненный по времени импульсный фон демонстрирует закономерную картину: за основным импульсом следует вторичный более слабый импульс с противоположной полярностью. Спектральный анализ приводит к многополосной структуре соответствующих спектров, в которой сдвиг частоты между спектральными линиями соответствует обратной временной задержке между импульсами, $\Delta f \sim 1/\Delta t$. Для изучения временной эволюции импульсного фона для последовательных часовых интервалов строились усредненные вейвлет-спектры и формы сигналов по МНЭ. Графики на рис. 9 демонстрируют тесное соответствие между временной эволюцией импульсивного фона и РСС: временная задержка Δt между основным и эхо-импульсами, спектральный разрыв между гармониками Δf изменяется согласованным образом.

Сравнение временной структуры магнитного фона в диапазонах ИАР (0.3–3 Гц) и ШР (6–15 Гц), используя один и тот же МНЭ показало, что эхо-импульс в диапазоне ШР отсутствует, тогда как в диапазоне ИАР он очевиден [Schekotov et al., 2011].

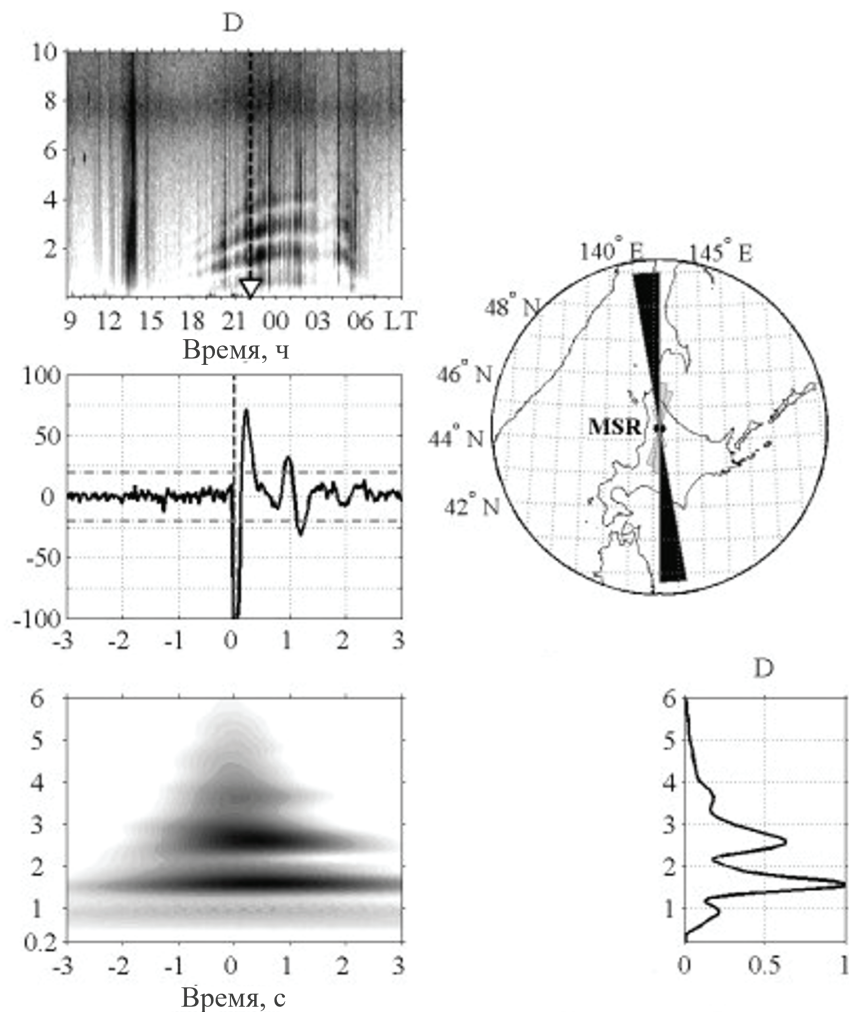


Рис. 8. Пример выделения импульсной структуры в данных индукционного магнитометра на станции Moshiri [Schekotov et al., 2011]. На левых панелях сверху вниз показаны: спектрограмма D-компоненты, МНЭ для сильных импульсов, вейвлет-спектр для интервала, указанного на спектрограмме треугольником. Справа показаны годограф направления на источник возмущения и интегральный вейвлет-спектр

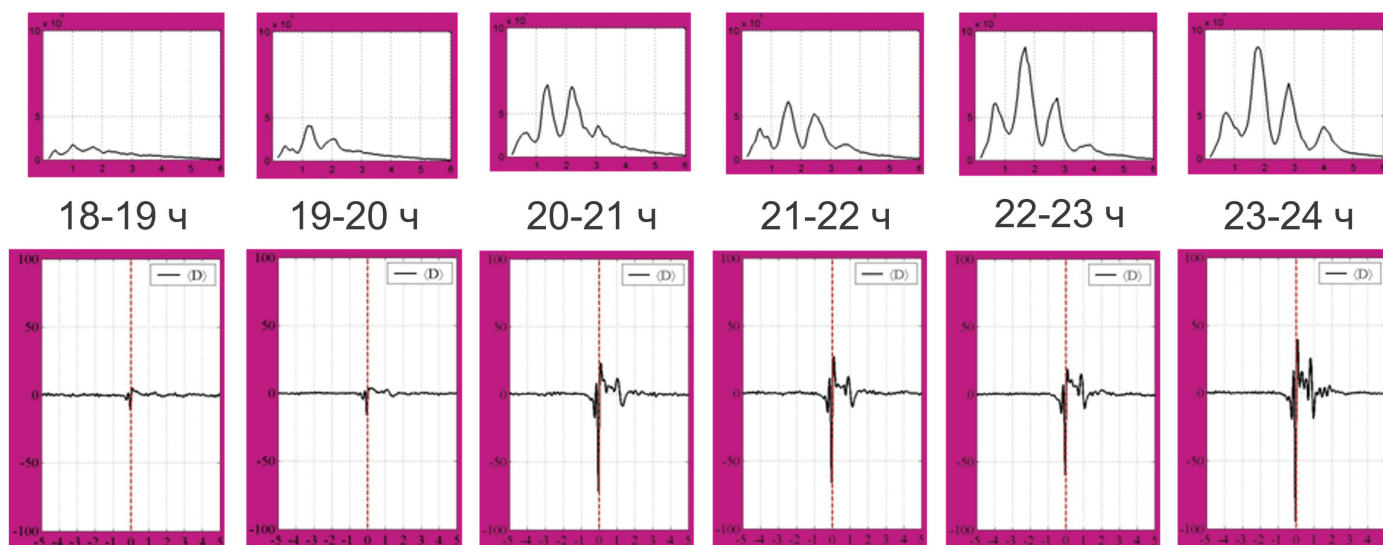


Рис. 9. Последовательность вейвлет-спектров мощности (верхний ряд) и МНЭ-кривых (нижний ряд) во время наблюдения РСС на станции Moshiri

Поиск ИАР в спутниковых данных

Удивительно, что в то время, как РСС регулярно наблюдается в ночные часы на наземных станциях, практически не было сообщений об обнаружении признаков ИАР непосредственно в ионосфере. Возможное объяснение крайней редкости обнаружения ИАР структур в данных низкоорбитальных спутников может быть понято на основе концепции импульсного возбуждения резонатора [Surkov, Pilipenko, 2016]. Согласно этой парадигме, космический аппарат, находящийся внутри ИАР (то есть высота орбиты < 1000 км) сначала обнаружит распространяющийся вверх альвеновский импульс на высоте h_s . Импульс отразится от верхней границы ИАР на высоте h_A как от изолятора, и нисходящий импульс обнаружится снова через интервал времени $\tau_s \sim 2(h_A - h_s)/V_A$. Затем импульс отразится от Е-слоя, снова распространяется вверх и т.д. В результате формируется цуг импульсов, но интервал τ_s между двумя последовательно обнаруженными спутником импульсами внутри ИАР оказывается меньше времени прохождения альвеновского импульса вверх и вниз по всей ионосфере T_A , то есть $\tau_s < T_A$.

Таким образом, спектры отклика ИАР при импульсном возбуждении должны быть разными на высотах выше и ниже отражающей границы. Эту особенность хорошо видно по результатам моделирования с верхней границей ИАР в виде «жесткой стенки» (рис. 10). При положении спутника выше верхней границы отклик ИАР выглядит как последовательность импульсов, выходящих из резонатора через равные промежутки времени $\Delta t = 2\tau_A$. Таким образом, за счет отражений от Е-слоя и полупрозрачной верхней границы ИАР разряд молнии производит регулярную серию импульсов и соответствующую РСС только на земле и над ИАР. Внутри же резонатора виртуальный спутник либо зарегистрирует более высокочастотную структуру с частотами $\sim 1/\tau_s$, подобную [Simoes et al., 2012b], либо вообще не сможет наблюдать какую-либо регулярную РСС из-за сложной суперпозиции импульсов, идущих в разных направлениях. Описанная картина подтверждается более строгим численным расчетом в неоднородной ионосфере [Pilipenko et al., 2017].

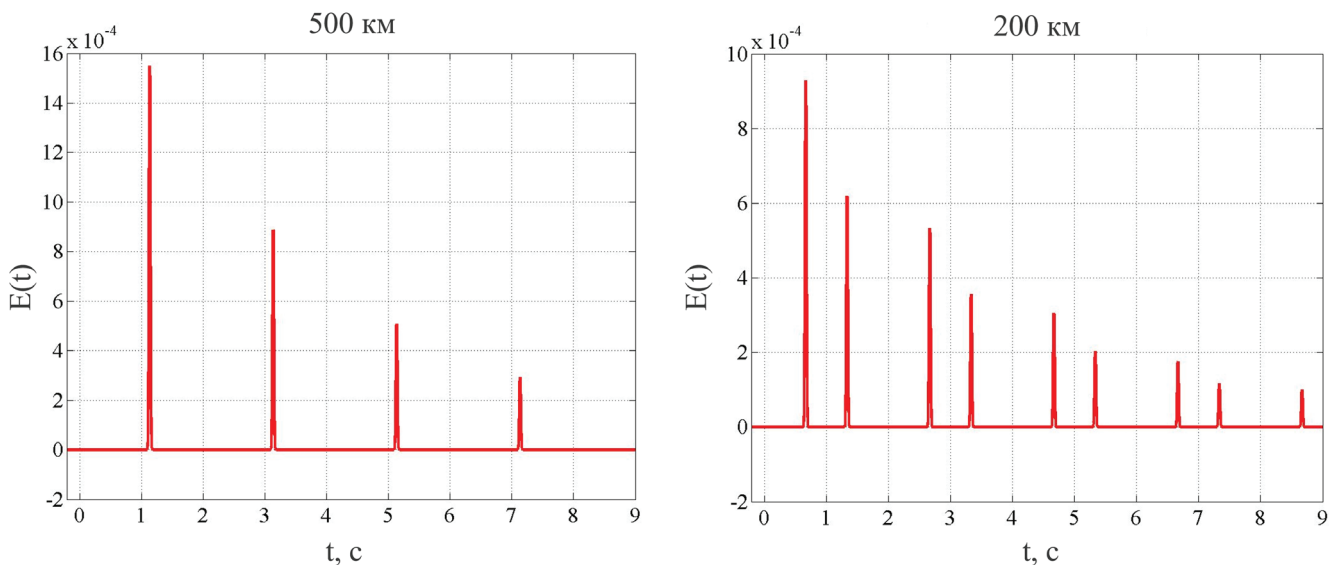


Рис. 10. Возбужденный и отраженный импульсы, смоделированные для высот выше верхней границы ИАР (слева) и ниже ее внутри ИАР (справа)

Pro and con механизма парных импульсов

Итак, представления о наличии эхо-импульсов грозовых разрядов, обусловленных отражением от верхней границы ИАР, подкрепляются:

- (а) Выделением эхо-импульса в фоновых электромагнитных шумах при появлении РСС;
- (б) Размыванием РСС внутри ИАР при интерференции начального и отраженного импульсов, приводящей к невозможности наблюдения РСС на спутниках.

Однако зачастую при анализе магнитного шума в периоды появления РСС на спектрограммах отмечается отсутствие регулярного эхо-импульса в магнитограммах. Пример, приведенный на рис. 11, демонстрирует, что во время появления РСС на Среднеширотном комплексе геофизических наблюдений «Михнево» функция автокорреляции и МНЭ показывают наличие лишь очень слабого размытого вторичного импульса, который не сможет обеспечить появление РСС.

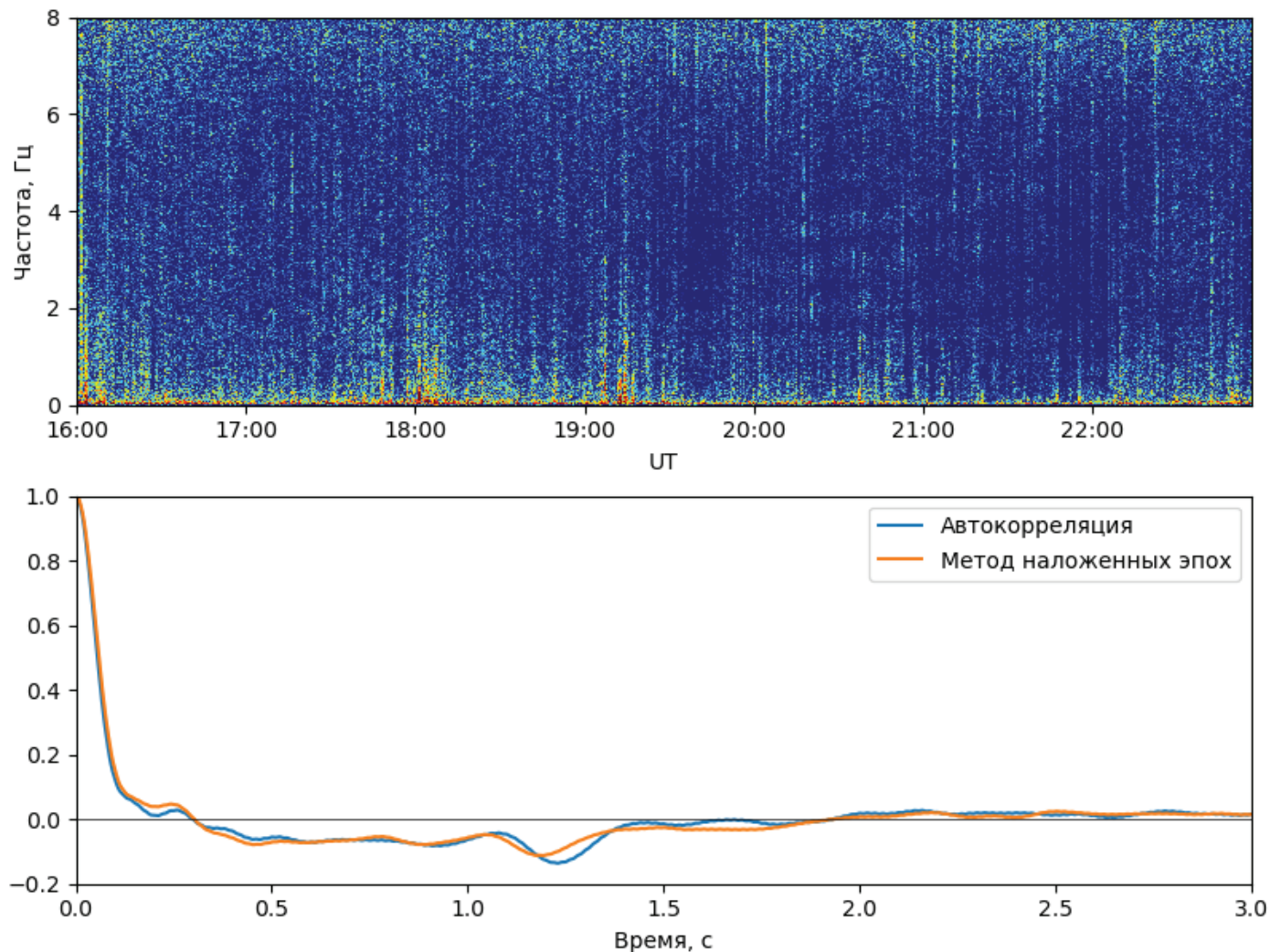


Рис. 11. Пример РСС без парных импульсов, зарегистрированных на Среднеширотном комплексе геофизических наблюдений «Михнево» 07.09.2017 г.

(3) Формирование РСС при импульсах фиксированной длительности

Рассмотрим еще одну возможность формирования РСС. Предположим, что в магнитной записи присутствуют уединенные импульсы, случайным образом распределенные во времени, но длительность каждого импульса одна и та же $\Delta t = 1$ с (рис. 12). Тогда спектральное оценивание во временном окне, много больше Δt и содержащем более десятка таких импульсов, дает структуру с выраженными спектральными пиками на частотах 0.5, 1.5, 2.5,... Гц, разнесенными на $\Delta f = 1$ Гц.

Таким образом, численное моделирование показывает принципиальную возможность формирования РСС при наличии импульсной составляющей с характерной длительностью. Такие импульсы конечной длины могут формироваться при отражении начального короткого импульса грозового разряда от градиента профиля альвеновской скорости. Поскольку область нарушения ВКБ приближения для каждой частоты, слагающей первичный импульс, слегка разная, это приведет к расплыванию

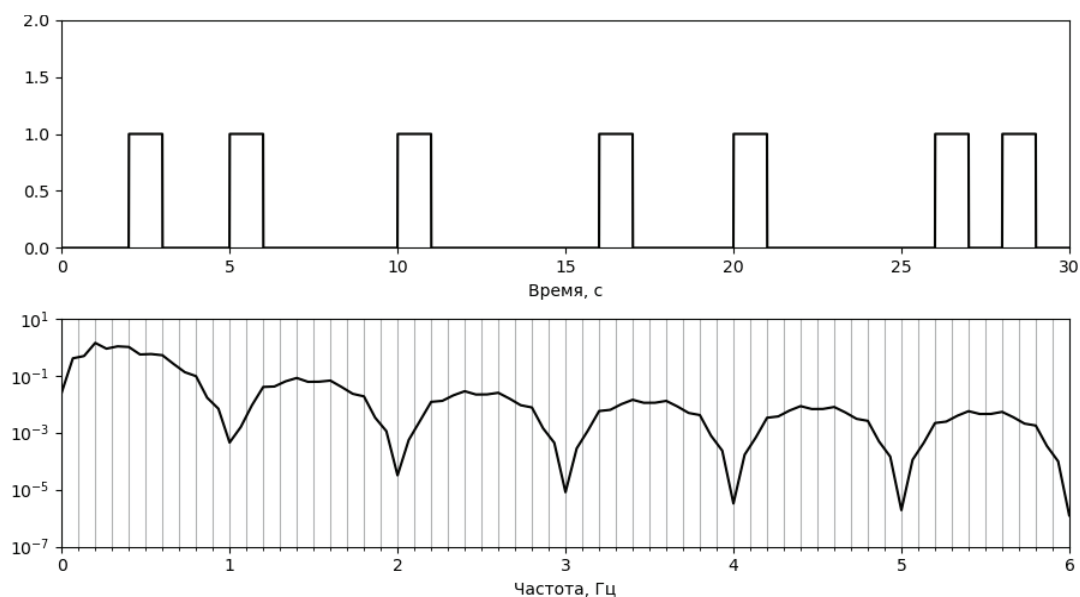


Рис. 12. Модельные импульсы с характерной длительностью 1 с и их спектр

отраженного от верхней границы ИАР импульса. Однако пока такую возможность нельзя считать обоснованной из-за отсутствия целенаправленных экспериментальных исследований и моделирования для реальной структуры ионосферы.

РСС на приэкваториальных широтах

Удивительные результаты о структуре магнитных УНЧ шумов были получены на приэкваториальных станциях. На этих широтах РСС не только уверенно наблюдалась, но даже отмечалось ее расщепление на две спектральные структуры с разными значениями частотного разделения между гармониками: малое и большое значение Δf [Bösinger et al., 2004]. Эта особенность объяснялась тем, что на низких

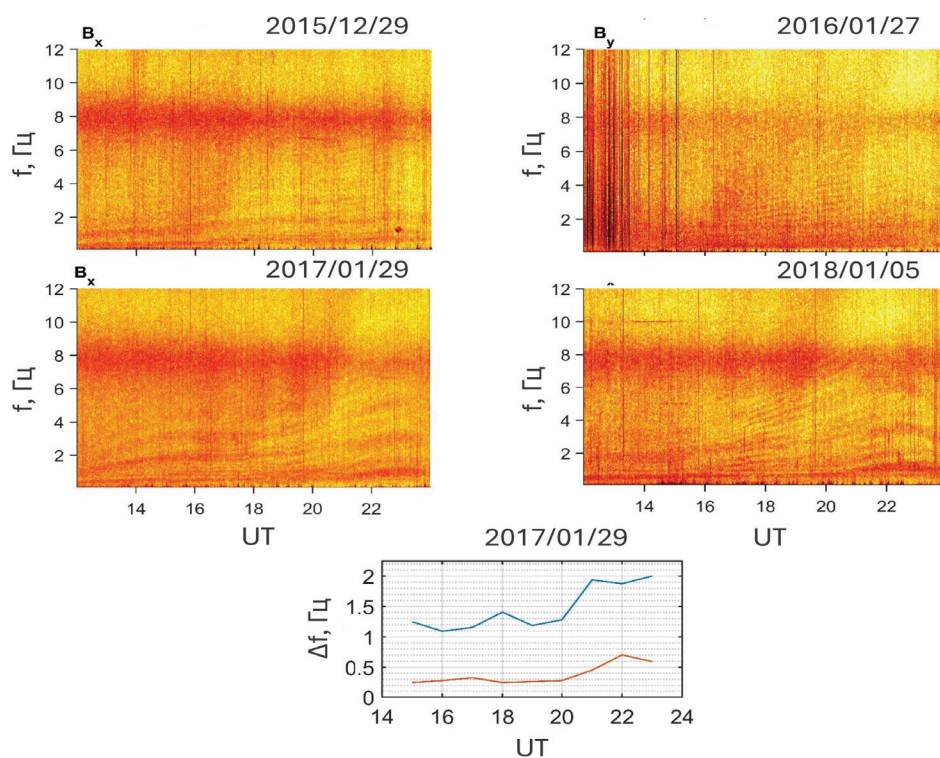


Рис. 13. Спектрограммы с низкоширотной магнитной станции Shillong (Индия), на которых видны полоса ШР на ~ 8 Гц, и РСС с разными спектральными масштабами [Adhitya et al., 2022]. Нижняя панель показывает вариации двух спектральных масштабов Δf , предположительно связанных с ИАР и магнитосферным резонатором

широтах, где частота альвеновских волн в магнитосферном резонаторе между сопряженными точками ионосферы в северном и южном полушариях попадает в тот же частотный диапазон, что и ИАР, колебания низкоширотного магнитосферного резонатора дают вклад в наблюдаемую спектральную структуру. В результате образуются двойные РСС с одновременным вкладом ИАР и магнитосферного резонатора (см. рис. 13 из [Adhitya et al., 2022]). При этом более широкие структуры РСС обусловлены ИАР, тогда как тонкие спектральные структуры связаны с магнитосферным резонатором.

Однако такое объяснение нельзя принять безоговорочно. На широтах $L < 1.3$ значительная часть силовых линий погружена в ионосферу. Для таких силовых линий начинает проявляться эффект нагружения колеблющихся силовых линий тяжелыми ионосферными ионами [Pilipenko et al., 1998]. В результате ход зависимости частоты от широты приобретает аномальный характер – частота колебаний падает по мере приближения к экватору, а затухание – возрастает. Поэтому наличие РСС на приэкваториальных широтах остается неразгаданной загадкой.

Возбуждение ионосферного волновода электрическим разрядом

Ионосферная полость с минимумом $V_A(z)$ работает не только как резонатор для альвеновских волн, но и как волновод для БМЗ моды. Волноводные моды, возбуждаемые магнитосферными или атмосферными источниками, могут распространяться на большие расстояния вдоль ионосферы. Возбуждение магнитозвукового волновода в верхней ионосфере проявилось во время извержения вулкана Тонга 15 января 2022 г. Извержения вулканов часто сопровождаются необычайно мощной молниевой активностью [McNutt et al., 2010; Behnke, McNutt, 2014; Gavrilov et al., 2022]. В период такой наибольшей вулканической молниевой активности по данным индукционных магнитометров на Дальнем Востоке, удаленных от области извержения на ~ 8 тыс км (рис. 14, верхние панели), отмечено не только ожидаемое усиление интенсивности ШПР [Nickolaenko et al., 2022; Poklad et al., 2022], но и появление широкополосных излучений диапазона Pc1 (2–5 Гц) (рис. 14, нижняя панель) [Стуков, Пилипенко, 2024]. На более далеких от извержения высокоширотных станциях в Восточной Сибири и на Аляске эти излучения уже не проявились. Pc1 шумы начались после извержения и закончились, когда активность вулканических молний начала спадать.

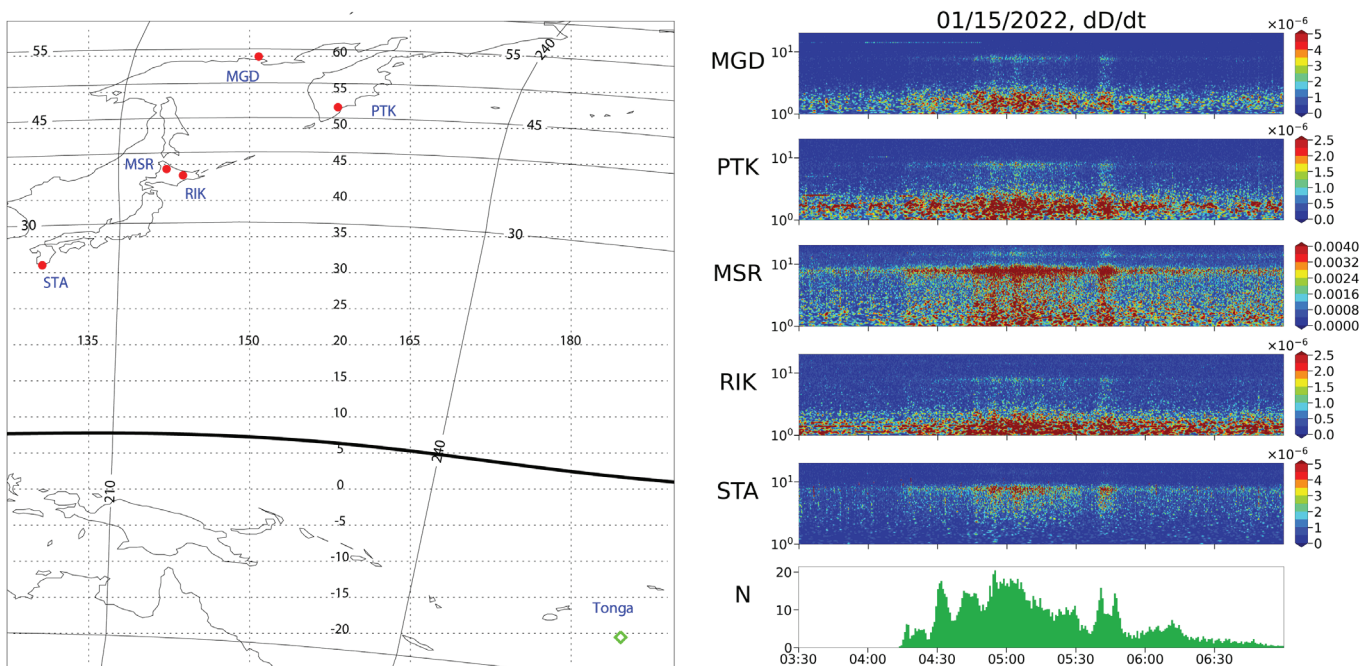


Рис. 14. Карта с положением индукционных магнитометров и место извержения вулкана Тонга (слева). Спектрограммы излучения (D компонента) (справа). Гистограмма (зеленым) показывает число молниевых разрядов в 1 мин, зарегистрированных системой WWLLN

Эти наблюдения подкрепляются и численным моделированием [Mazur et al., 2018] электромагнитных полей в полости земля-ионосфера от вертикального токового диполя. Форма грозового УНЧ спектра практически не зависит от формы одиночного грозового разряда, поскольку низкочастотная часть спектра молнии практически постоянна. В использованной модели предполагается, что ионосфера горизонтально стратифицирована, а вертикальные профили параметров ионосферы и атмосферы рассчитываются с помощью моделей IRI и MSIS, из которых выводится вертикальное распределение альвеновской скорости и проводимости. Согласно модельным расчетам, представленным на рис. 15, спектральный состав излучений УНЧ диапазона меняется с расстоянием r от молниевых разряда. Во время грозового разряда возбуждается связанная волновая система, состоящая из мод ИАР и БМЗ волновода. Вблизи молнии (до нескольких сотен км) в спектрах проявляются только низшие гармоники ИАР (независящие от расстояния). На больших же расстояниях ($> 10^3$ км) спектральная структура формируется преимущественно модами ионосферного волновода (их частоты не совпадают с локальными частотами ИАР). Амплитуды волноводных мод медленно спадают с расстоянием. По-видимому, именно суперпозиция волноводных мод обусловила широкополосный всплеск Pc1 излучения на станциях Японии и Камчатки во время вулканической молниевой активности вулкана Тонга.

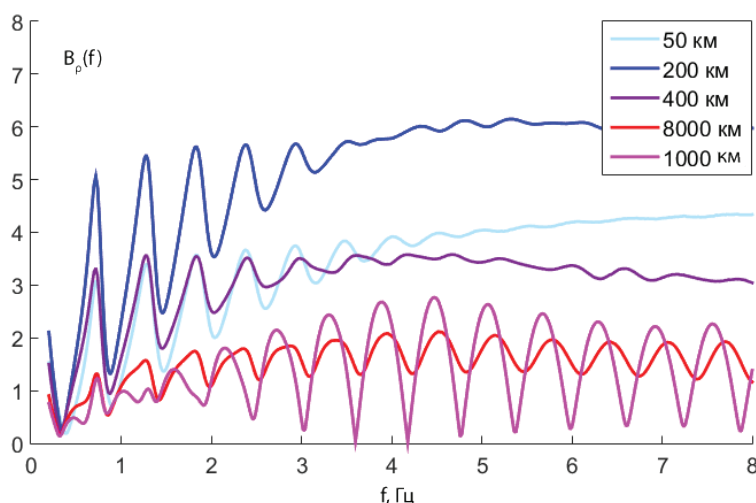


Рис. 15. Рассчитанные спектры магнитной компоненты возмущений на различных расстояниях от вертикального молниевых разряда [Стуков, Пилипенко, 2024]

Тайфуны

Имеется немного свидетельств геомагнитного отклика на сильные метеорологические возмущения – тайфуны и ураганы [Mikhailova et al., 2000; Chen et al., 2014]. Дополнительные свидетельства метеорологического воздействия на ионосферу и геомагнитное поле были получены по данным электромагнитных измерений на спутниках SWARM во время пролетов над тайфуном VongFong 2014 г. [Мартинес-Беденко и др., 2019]. Спутниковый проект SWARM состоит из трех идентичных аппаратов (*A*, *B* и *C*), работающих на двух разных полярных орбитах: *C* и *A*, разнесенных на расстояние $\sim 1.4^\circ$ по долготе на высоте ~ 470 км, в то время как орбита *B* проходит на высоте ~ 510 км. Данные по регистрации вектора магнитного поля с частотой 50 Гц были пересчитаны в локальную систему координат, ориентированную вдоль текущего магнитного поля $\mathbf{B}_0$. Также на аппаратах SWARM велась регистрация плотности плазмы n (с частотой опроса 2 Гц) ленгмюровскими зондами.

Тайфун VongFong развился в приэкваториальной части Тихого океана с 02 до 14 октября 2014 г. и двигался от экватора к Японии. Геомагнитная обстановка во время жизни тайфуна была спокойной. Поскольку на приэкваториальных широтах существуют такие характерные явления как экваториальная аномалия (возрастание плотности ионосферной плазмы симметрично по обе стороны от геомагнитного экватора) и плазменные пузыри [Park et al., 2009], которые зачастую сопровождаются усилением магнитных флуктуаций [Stolle et al., 2006], то измерения непосредственно вблизи геомагнитного экватора не рассматривались.

В период 01:18–01:23 UT 08 октября 2014 г. оба спутника SWARM-A и -C проходили непосредственно над тайфуном в дневное время (LT ~ 10). Вертикальная проекция орбит спутников относительно общей метеорологической картины тайфуна показана на рис. 16. В центре тайфуна образуется цилиндрическая область с диаметром ~ 30 км – «глаз» тайфуна, где скорость ветра и давление минимальны. Над «глазом» тайфуна спутники проходили в 01:20:30 UT. Вокруг расположена стена «глаза» – цилиндр с радиусом ~ 75 км, в которой скорость ветра достигает максимальных значений (до ~ 80 м/с). При нахождении над тайфуном оба спутника зарегистрировали магнитные флуктуации с размахом $X \sim 1.5$ нТ, $Y \sim 0.5$ нТ и периодами 5–10 с (рис. 17). Флуктуации были чисто поперечные, что указывает на то, что они вызваны продольными токами. Также на SWARM-A и -C зарегистрирован «пузырь» плазмы с амплитудой $n \sim 8 \cdot 10^4$ м⁻³ на фоне ионосферной плотности $\langle N_e \rangle = (1.0\text{--}2.5) \cdot 10^6$ м⁻³ (рис. 17, нижняя панель). Относительная величина возмущения плазмы $\sim (3\text{--}8)\%$, а временная протяженность пузыря ~ 80 с, что соответствует масштабу пространственной структуры ~ 560 км. Магнитные флуктуации не приурочены к градиентам пузыря, а расплзлись на значительно большее расстояние.

Рассмотренное явление является одним из частных случаев многоэтапного обмена энергией между волнами и турбулентностью нейтральной атмосферы и возмущениями плазмы ионосферы и магнитного поля. На первом этапе АГВ, генерируемые интенсивными ветрами тайфуна, распространяются до ионосферных высот. При этом благодаря стратификации атмосферы амплитуда АГВ увеличивается с высотой. Область воздействия на ионосферу за счет расхождения волнового фронта оказывается шире, чем характерный размер тайфуна. Низкочастотная часть АГВ ($T > 10$ мин) –

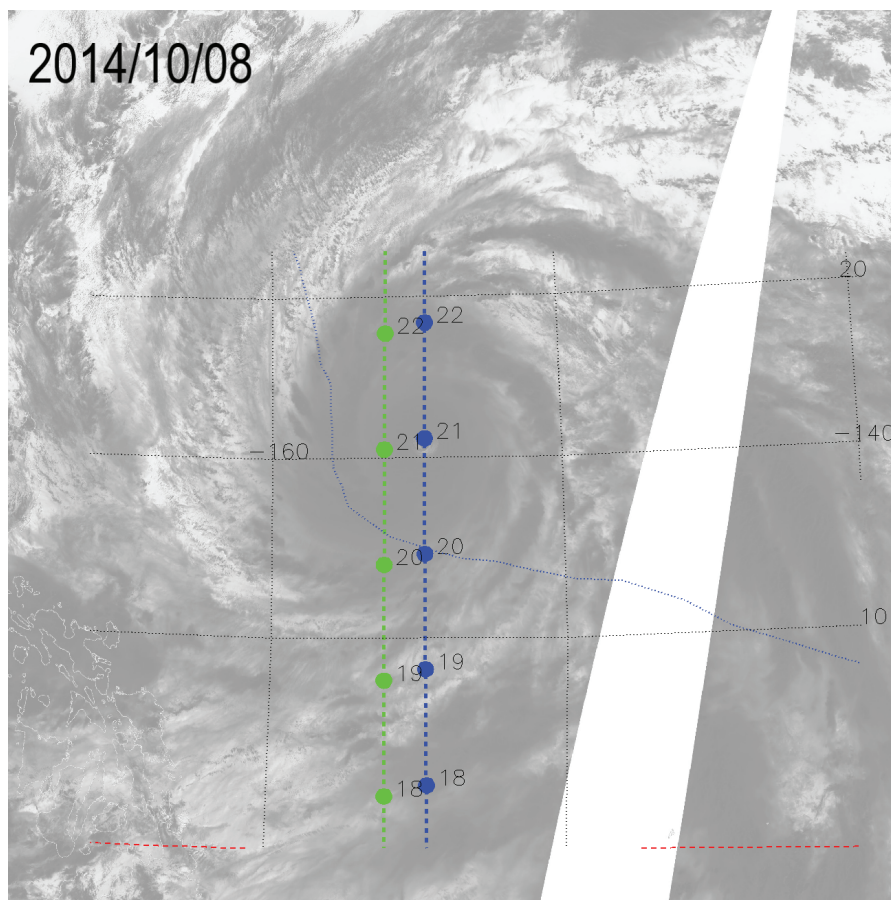


Рис. 16. Пролет спутников SWARM-A (зеленая линия) и -C (синяя линия) над тайфуном 08.10.2014 г., 01:15–01:25 UT. Штриховая красная линия обозначает геомагнитный (*dip*) экватор. Точечная линия показывает траекторию тайфуна по данным портала Unisys. Использованы космические снимки в видимом канале камерой MODIS

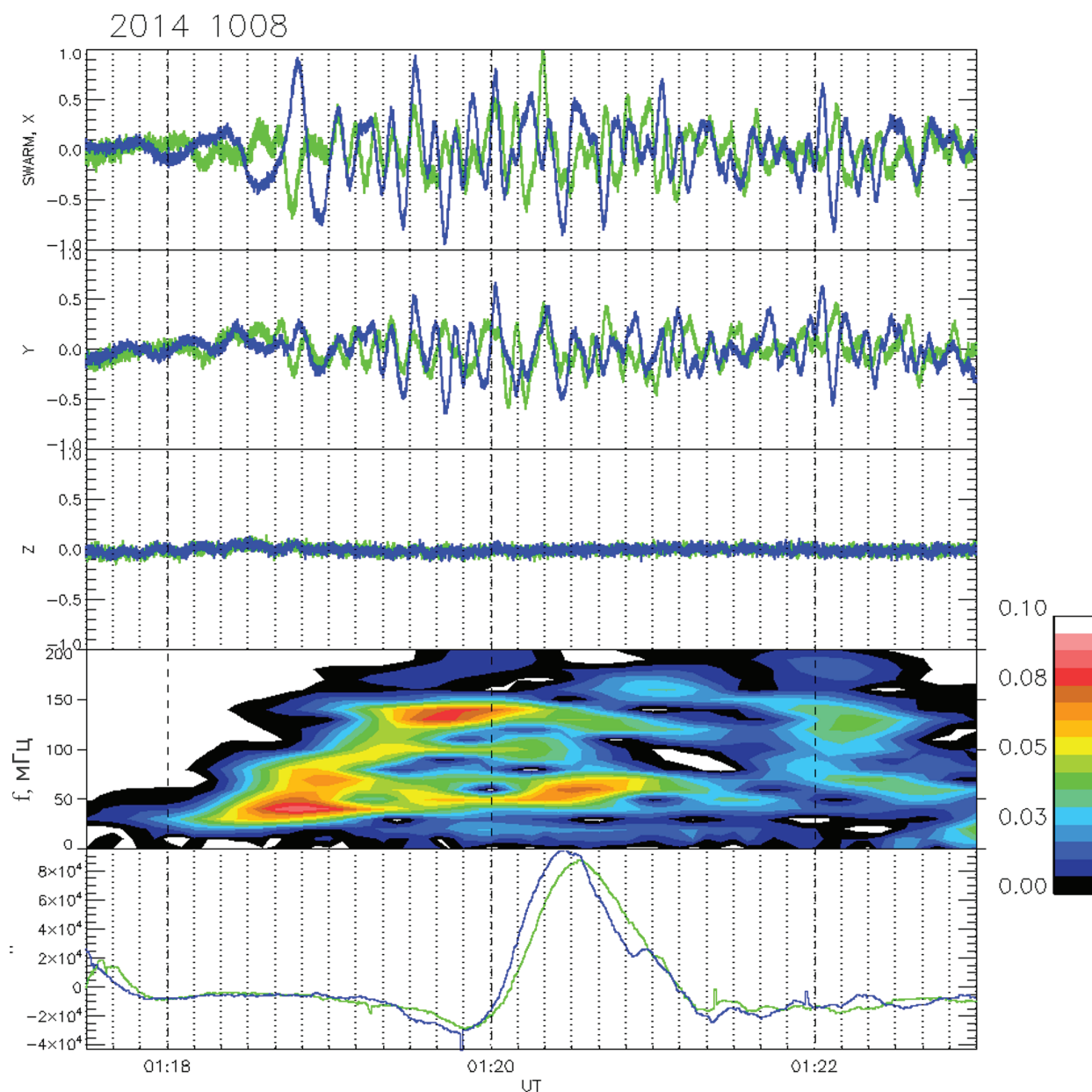


Рис. 17. Вариации геомагнитного поля (компоненты X, Y, Z в системе координат, ориентированной по текущему $\mathbf{B}_0$, и отклонения плотности плазмы n от среднего значения (нижняя панель), зарегистрированные спутниками SWARM-A (зеленая линия) и -C (синяя линия) 08.10.2014 г., 01:15–01:25 UT. Временные метки – каждые 10 с. В данных по магнитному полю удалялся тренд с критическим периодом 30 с [Мартинес-Беденко и др., 2019]

внутренние гравитационные волны, распространяются вплоть до верхней ионосферы (F-слой), где они вызывают модуляцию плотности ионосферной плазмы. Высокочастотная часть АГВ – инфразвуковые акустические волны, достигают проводящего слоя ионосферы (E-слой), где генерируют электрические поля и токи [Zettergren, Snively, 2013; 2015]. Система генерируемых токов – дивергентная и струи продольного тока вытекают из E-слоя в верхнюю ионосферу, где и могут быть зарегистрированы пролетающим спутником как флуктуации геомагнитного поля.

Зарегистрированная над тайфуном магнитная «рябь» является результатом генерации продольных токов в E-слое ионосферы под воздействием инфразвуковых колебаний, излучаемых тайфуном [Iyemori et al., 2015]. Преобладающий период ~ 10 с соответствует поперечному масштабу колебаний

порядка ~ 70 км. Пространственный масштаб акустической волны $\lambda_s = V_s/f \sim 50$ км, при скорости звука $V_s \sim 0.2$ км/с и частоте $f \sim 4$ МГц. Пролет спутника с $V_s \sim 7.5$ км/с через такую пространственную структуру даст флуктуации с периодом ~ 7 с, попадающим в диапазон наблюдаемых периодов. Эти флуктуации отличаются от регистрируемых на низкоорбитальных спутниках Рс2-3 пульсаций тем, что наблюдаются в любое местное время, но их амплитуды днем в ~ 3 раза больше, чем ночью. Плазменный пузырь является, предположительно, результатом воздействия внутренней гравитационной волны на ионосферу. Для спутника это возмущение является квазистатическим, время его наблюдения (~ 1 мин) соответствует длине волны порядка нескольких сотен км.

Возможные направления дальнейших исследований

Открытие транзитных световых явлений (*Transient Light Events* – TLE), таких как эльфы, красные спрайты и синие струи, вызванные электрическим пробоем в верхней атмосфере (на высотах 60–90 км), указывают на возможность гораздо более сильной связи молнии с ионосферой, чем считалось возможным ранее. Эти процессы, связанные с интенсивными токами на большой высоте, могут значительно увеличить вес УНЧ спектра в отклике на молнии и усиливать возбуждение ИАР разрядом молнии [Sukhorukov, Stubbe, 1997]. Более того, TLE являются лишь малой частью гораздо более сложного явления, которое включает не только интенсивные электромагнитные излучения в большом частотном диапазоне (от долей Гц до нескольких десятков МГц), но также всплески рентгеновского и γ -излучения (*Terrestrial Gamma Flashes* – TGF), и ускорение электронов до релятивистских энергий. Молнии, связанные с TGF, являются самыми мощными естественными ускорителями частиц на Земле, сообщая группе электронов энергию > 20 МэВ (на 4 порядка больше, чем энергия электронов, вызывающих полярные сияния). Могут ли наблюдения в УНЧ диапазоне помочь дискриминировать молниевые разряды, связанные с TLE и TGF, – остается нерешенной проблемой.

В качестве возможного источника возбуждения ИАР предложен механизм генерации атмосферной турбулентностью в нижней ионосфере, при котором часть кинетической энергии нейтрального газа передается в энергию электрического тока в проводящей ионосфере, которая затем преобразуется в энергию альвеновских мод [Surkov et al., 2004]. Однако наблюдения РСС над областями с высокой атмосферной турбулентностью (тайфуны и ураганы) пока отсутствуют, и эта гипотеза экспериментально не апробирована.

Загадкой остаются эффекты появления РСС на приэкваториальных широтах, где добротность ИАР должна быть крайне мала, и на авроральных широтах, удаленных от всех возможных грозových центров. В целом, роль ИАР в авроральных явлениях не выяснена, хотя высказывалось предположение, что особенности в спектральной структуре Pi1C шумов могут быть обусловлены наличием ИАР [Woodroffe, Lysak, 2012]. Предполагалось, что свойства ИАР на этих широтах могут сильно модифицироваться под действием области аврорального ускорения в верхней ионосфере [Pilipenko et al., 2002].

Наблюдения на низкоорбитальных спутниках указывают на возможность сильной связи (во многом неожиданную) между атмосферным электричеством и электромагнитными шумами и волнами в верхней ионосфере [Simoes et al., 2012a]. Получены отдельные сообщения об обнаружении неожиданно интенсивного УНЧ отклика на грозovou активность [Burke et al., 1992]. Высказывалась гипотеза, что такой отклик связан с модификацией проводимости верхней атмосферы, в результате чего столб ионизированной плазмы сам становится вторичным источником МГД возмущения [Шалимов, 2012]. Пока эта гипотеза надежного подтверждения не получила.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-77-10012) и в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6) с использованием данных, полученных на УНУ СКГН «Михнево» ИДГ РАН.

Благодарности

Авторы признательны Е. Н. Федорову, Н. Г. Мазуру за полезные обсуждения и рецензенту – за внимательное изучение работы.

Список литературы

- Адушкин В.В., Романовский Я.О., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А. Спивак А.А, Харламов В.А. Геофизические эффекты, вызванные эксплозивным извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. // Доклады РАН, Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 2. С. 156–162. <https://doi.org/10.31857/S2686739722060032>
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Теория формирования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1989. Т. 32. С. 802–810.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Открытие резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Доклады АН СССР. 1987. Т. 297. С. 840–843.
- Блиох П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земли – ионосфера. Киев : Наукова думка. 1977. – 200 с.
- Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Поляков С.В. Исследование особенностей резонансной структуры спектра фоновых шумов в диапазоне частот 1–10 Гц с учетом наклона магнитного поля Земли // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. С. 519–527.
- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / Гинзбург В.Л. 2-е изд. Москва : Наука, 1967. – 684 с. ISBN 978-5-4458-5400-5.
- Исаев Н.В., Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Возмущения верхней ионосферы, вызванные тайфунами // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 253–264. <https://elibrary.ru/loizav>
- Мартинес-Беденко В.А., Пилипенко В.А., Захаров В.И. Грушин В.А. Влияние тайфуна Vongfong 2014 г. на ионосферу и геомагнитное поле по данным спутников SWARM: 2. Геомагнитные возмущения // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 4. С. 90–98. <https://doi.org/10.12737/szf-54201910>
- Перевалова Н.П., Ишин А.Б. Эффекты тропических циклонов в ионосфере по данным зондирования сигналами спутниковой радионавигационной системы GPS // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С. 49–61. <https://www.elibrary.ru/msqssr>
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21. С. 816–822.
- Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Цзэмэд Б. Морфология и диагностический потенциал ионосферного альвеновского резонатора // Солнечно-земная физика. 2021. № 3. С. 39–56. <https://doi.org/10.12737/szf-73202104>
- Стуков Д., Пилипенко В. Электромагнитные УНЧ шумы, вызванные вулканическими молниями вулкана Тонга // Геофизические Исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 81–90. <https://doi.org/10.21455/gr2024.4-4>
- Шалимов С.Л. Об амплитуде низкочастотных сигналов в ночной ионосфере над грозовыми разрядами // Космические Исследования. 2012. Т. 50. № 3. С. 219–223. <https://www.elibrary.ru/oxxith>
- Adhitya P., Nosé M., Bulusu J., Vichare G., Sinha A.K. Observation of ionospheric Alfvén resonator with double spectral resonance structures at low latitude station Shillong (dipole L = 1.08) // Earth, Planets and Space. 2022. Vol. 74 (1). P. 169. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01730-2>
- Aoyama T., Iyemori T., Nakanishi K. Magnetic ripples observed by Swarm satellites and their enhancement during typhoon activity // Earth Planets and Space. 2017. Vol. 69 (1). P. 89. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0679-2>
- Behnke S.A., McNutt, S.R. Using lightning observations as a volcanic eruption monitoring tool // Bulletin of Volcanology. 2014. Vol. 76. P. 847. <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0847-1>
- Beggs C.D., Musur M. Observation of Ionospheric Alfvén Resonances at 1–30 Hz and their superposition with the Schumann Resonances // J. Geophysical Research. 2018. Vol. 123 (5). P. 4202–4214. <https://doi.org/10.1029/2018JA025264>
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Y. The ionospheric Alfvén resonator // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1990. Vol. 52. P. 781–787. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(90\)90010-k](https://doi.org/10.1016/0021-9169(90)90010-k)
- Belyaev P.P., Börsinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophysical Research. 1999. Vol. 104. P. 4305–4317. <https://doi.org/10.1029/1998JA900062>
- Börsinger T., Haldoupis C., Belyaev P.P., Yakunin M.N., Semenova N.V., Demekhov A.G., Angelopoulos V. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station (L = 1.3) // J. Geophysical Research. 2002. Vol. 107. P. 1281. <https://doi.org/10.1029/2001JA005076>

- Bösinger T., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. Fine structure in ionospheric Alfvén resonator spectra observed at low latitude ($L = 1.3$) // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. P. L18802. <https://doi.org/10.1029/2004GL020777>
- Burke W.J., Aggson T.L., Maynard N.C., Hoegy W.R., Hoffman R.A., Candy R.M., Liebrecht C., Rodgers E. Effects of a lightning discharge detected by the DE 2 satellite over hurricane Debbie // *J. Geophysical Research*. 1992. Vol. 97. P. 6359–6367. <https://doi.org/10.1029/92ja01974>
- Chaston C.C., Bonnell J.W., Carlson C.W., Berthomier M., Peticolas L.M., Roth I., McFadden J.P., Ergun R.E., Strangeway R.J. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator // *J. Geophysical Research*. 2002. Vol. 107 (A11). P. 1413. <https://doi.org/10.1029/2002JA009272>
- Chen C.H., Wang C.H., Lin L.C., Hsieh H.H., Yen H.Y., Shih M.H. Typhoon-induced magnetic disturbances: Cases in the Western Pacific // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 2014. Vol. 25. P. 647–653. [https://doi.org/10.3319/TAO.2014.05.08.01\(AA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2014.05.08.01(AA))
- Demekhov A.G., Belyaev P.P., Isaev S.V., Manninen J., Turunen T., Kangas J. Modeling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc 1 frequency range // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2000. Vol. 62. P. 257–265. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00119-4)
- Demekhov A.G. Coupling at the atmosphere - ionosphere - magnetosphere interface and resonant phenomena in the ULF range // *Space Science Reviews*. 2012. Vol. 168. P. 595–609. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9832-6>
- Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., Klimov S., Holzworth R. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. Vol. 117. P. 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.05.013>
- Fedorov E.N., Schekotov A.J., Molchanov O.A., Hayakawa M., Surkov V.V., Gladyshev V.A. An energy source for the mid-middle latitudes IAR: World thunderstorm centers, nearby discharges or neutral wind fluctuations? // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. Vol. 31. P. 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.001>
- Fedorov E., Schekotov A., Hobara Y., Nakamura R., Yagova N., Hayakawa M. The origin of spectral resonance structures of the ionospheric Alfvén resonator: Single high-altitude reflection or resonant cavity excitation? // *J. Geophysical Research*. 2014. Vol. 119 (4). <https://doi.org/10.1002/2013JA019428>
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Baddeley L. Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge // *Journal of Geophysical Research*. 2016a. Vol. 121. P. 11282–11301. <https://doi.org/10.1002/2016JA023354>
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Ermakova E. Modeling diurnal variations of the IAR parameters // *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2016b. Vol. 51 (4). P. 597–617. <https://doi.org/10.1007/s40328-015-0158-9>
- Fraser-Smith A.C. ULF magnetic fields generated by electrical storms and their significance to geomagnetic pulsation generation // *Geophysical Research Letters*. 1993. Vol. 20. P. 467–470. <https://doi.org/10.1029/93GL00087>
- Fujita S., Tamao T. Duct propagation of hydromagnetic waves in the upper ionosphere. 1. Electromagnetic field disturbances in high latitudes associated with localized incidence of a shear Alfvén wave // *J. Geophysical Research*. 1988. Vol. 93. P. 14665–14673. <https://doi.org/10.1029/JA093iA12p14665>
- Gavrilov B.G., Poklad Y.V., Ryakhovsky I.A., Ermak V.M., Achkasov N.S., Kozakova E.N. Global electromagnetic disturbances caused by the eruption of the Tonga volcano on 15 January 2022 // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127. P. e2022JD037411. <https://doi.org/10.1029/2022JD037411>
- Greifinger C., Greifinger P. Transient ULF electric and magnetic fields following a lightning discharge // *J. Geophysical Research*. 1976. Vol. 81. P. 2237–2247. <https://doi.org/10.1029/JA081i013p02237>
- Greifinger C., Greifinger P. Theory of hydromagnetic propagation in the ionosphere wave guide // *J. Geophysical Research*. 1968. Vol. 73. P. 7473–7490. <https://doi.org/10.1029/JA073i023p07473>
- Hebden S.R., Robinson T.R., Wright D.M., Yeoman T., Raita T., Bösinger T. A quantitative analysis of the diurnal evolution of Ionospheric Alfvén Resonator magnetic resonance features and calculation of changing IAR parameters // *Annales Geophysicae*. 2005. Vol. 23. P. 1711–1721. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-1711-2005>
- Hodnett R.M., Yeoman T.K., Beggan C.D., Wright D.M. Climatology of the Harmonic Frequency Separation of Ionospheric Alfvén Resonances at Eskdalemuir Observatory, UK // *J. Geophysical Research*. 2023. Vol. 128 (6). <https://doi.org/10.1029/2023JA031541>
- Iyemori T., Nakanishi K., Aoyama T., Yokoyama Y., Koyama Y., Lühr H. Confirmation of existence of the small-scale field-aligned currents in middle and low latitudes and an estimate of time scale of their temporal variation // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 22–28. <https://doi.org/10.1002/2014GL062555>
- Lysak R.L. Feedback instability of the ionospheric resonator cavity // *J. Geophysical Research*. 1991. Vol. 96. P. 1553–1568. <https://doi.org/10.1029/90ja02154>

- Lysak R.L. Generalized Model of the Ionospheric Alfvén Resonator. In: Lysak R.L. (Eds), Auroral Plasma Dynamics // Geophysical Monograph Series. 1993. Vol. 80. P. 121–128. <https://doi.org/10.1029/GM080p0121>
- Lysak R.L., Waters C.L., Sciffer M.D. Modeling of the ionospheric Alfvén resonator in dipolar geometry // J. Geophysical Research. 2013. Vol. 118. P. 1514–1528. <https://doi.org/10.1002/jgra.50090>
- Mazur N.G., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning // J. Geophysical Research. 2018. Vol. 123. P. 6692–6702. <https://doi.org/10.1029/2018JA025622>
- McNutt S.R., Williams E. Volcanic lightning: Global observations and constraints on source mechanisms // Bulletin of Volcanology. 2010. Vol. 72 (10). P. 1153–1167. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0393-4>
- Mikhailova G., Mikhailov Ya., Kapustina O. ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. 2000. Vol. 2 (2). P. 153–158.
- Molchanov O.A., Schekotov A.Yu., Fedorov E.N., Hayakawa M. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka // Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C. 2004. Vol. 29 (4). P. 649–655. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.09.022>
- Nakanishi K., Iyemori T., Taira K., Lühr H. Global and frequent appearance of small spatial scale field-aligned currents possibly driven by the lower atmospheric phenomena as observed by the CHAMP satellite in middle and low latitudes // Earth Planets Space. 2014. Vol. 66. P. 40. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-40>
- Nakariakov V.M., Pilipenko V.A., Heilig B. et al. Magnetohydrodynamic oscillations in the solar corona and Earth's magnetosphere: Towards consolidated understanding // Space Sci. Rev. 2016. Vol. 200. P. 75–203. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0233-0>
- Nickolaenko A.P., Schekotov A.Y., Hayakawa M., Romero R., Izutsu J. Electromagnetic manifestations of Tonga eruption in Schumann resonance band // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2022. Vol. 237. P. 105897. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105897>
- Park J., Lühr H., Kervalishvili G. et al. Nighttime magnetic field fluctuations in the topside ionosphere at midlatitudes and their relation to medium-scale traveling ionospheric disturbances: the spatial structure and scale sizes // J. Geophys. Res. 2015. Vol. 120. P. 6818–6830. <https://doi.org/10.1002/2015JA021315>
- Park J., Lühr H., Stolle C., Rother M., Min K.W., Michaelis I. The characteristics of field-aligned currents associated with equatorial plasma bubbles as observed by the CHAMP satellite // Annales Geophysicae. 2009. Vol. 27. P. 2685–2697. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2685-2009>
- Parent A., Mann I.R., Rae I.J. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophysical Research. 2010. Vol. 115. P. A02312. <https://doi.org/10.1029/2009JA014673>
- Pilipenko V., Fedorov E., Engebretson M.J. Alfvén resonator in the topside ionosphere beneath the auroral acceleration region // J. Geophysical Research. 2002. Vol. 107 (A9). P. SMP 21-1-SMP 21-10. <https://doi.org/10.1029/2002JA009282>
- Pilipenko V., Fedorov E., Mursula K., Pikkarainen T. Generation of magnetic noise bursts during distant rocket launches // Geophysica. 2005. Vol. 41 (1–2). P. 57–72.
- Pilipenko V., Heilig B. ULF waves and transients in the topside ionosphere. In: Low-frequency Waves in Space Plasmas, Keiling A., Lee D.H., Nakariakov V. (Eds) // Geophysical Monograph Series. 2016. Vol. 216. P. 15–29. <https://doi.org/10.1002/9781119055006>
- Pilipenko V.A., Yumoto K., Fedorov E., Kurneva N., Menk K. Field line Alfvén oscillations at low latitudes // Memoirs of the Faculty of Science Kyushu University Series D Earth and planetary sciences. 1998. Vol. 30 (1). P. 23–43. <https://doi.org/10.5109/1546079>
- Pilipenko V.A., Chugunova O.M., Engebretson M.J., Lessard M. Trans-polar propagation of Pi1 wave burst as observed by an Antarctic array during the Themis 2007/03/23 substorm // Physics of Auroral Phenomena: Proc. 34 Annual Seminar. Apatity. 2011. P. 86–89.
- Pilipenko V.A. Impulsive coupling between the atmosphere and ionosphere/magnetosphere // Space Science Reviews. 2012. Vol. 168. P. 533–550. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9859-8>
- Pilipenko V., Dudkin D., Fedorov E., Korepanov V., Klimov S. IAR signatures in the ionosphere: modeling and observations at microsatellite Chibis-M // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2017. Vol. 154. P. 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.12.012>
- Pokhotelov O.A., Khrushev V., Parrot M., Senchenkov S., Pavlenko V.P. Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feedback instability // J. Geophysical Research. 2001. Vol. 106. P. 2156–2202. <https://doi.org/10.1029/2000JA000450>
- Poklad Y.V., Ryakhovsky I.A., Gavrilov B.G., Ermak V.M., Kozakova E.N., Achkasov N.S. Investigation of the reaction of Schumann resonances to short transient geophysical events under the influence of atmospheric electromagnetic noise // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2022. Vol. 127. P. e2022JD036820. <https://doi.org/10.1029/2022JD036820>

- Plyasov A.A., Surkov V.V., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Ignatov V.N.* Spatial structure of the electromagnetic field inside the ionospheric Alfvén resonator excited by atmospheric lightning activity // *J. Geophysical Research*. 2012. Vol. 117. P. A09306. <https://doi.org/10.1029/2012JA017577>
- Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A.* Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. Vol. 119. P. 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.07.001>
- Prikner K., Mursula K., Feygin F.Z., Kangas J., Kerttula R., Pikkarainen T., Pokhotelov O.A., Vagner V.* Non-stationary Alfvén resonator: vertical profiles of wave characteristics conditions // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2000. Vol. 62. P. 311–322. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(99\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00126-1)
- Polyakova A.S., Perevalova N.P.* Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean // *Advances in Space Research*. 2013. Vol. 52 (8). P. 1416–1426. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029>
- Schekotov A., Pilipenko V., Shiokawa K., Fedorov E.* ULF impulsive magnetic response at mid-latitudes to lightning activity // *Earth Planets and Space*. 2011. Vol. 63. P. 119–128. <https://doi.org/10.5047/eps.2010.12.009>
- Semenova N.V., Yahnin A.G.* Diurnal behavior of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg (L = 15) // *Annales Geophysicae*. 2008. Vol. 26. P. 2245–2251. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2245-2008>
- Shalimov S., Bösinger T.* On distant excitation of the ionospheric Alfvén resonator by positive cloud-to-ground lightning discharges // *J. Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. P. A02303. <https://doi.org/10.1029/2007JA012614>
- Simões F., Pfaff R., Berthelier J.-J., Klenzing J.* A review of low frequency electromagnetic wave phenomena related to tropospheric-ionospheric coupling mechanisms // *Space Science Reviews*. 2012a. Vol. 168. P. 551–593. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9854-0>
- Simões F., Klenzing J., Ivanov S., Pfaff R., Freudenreich H., Bilitza D., Rowland D., Bromund K., Liebrecht M.C., Martin S., Schuck P., Uribe P., Yokoyama T.* Detection of Ionospheric Alfvén Resonator signatures in the equatorial ionosphere // *J. Geophysical Research*. 2012b. Vol. 117. P. A11305. <https://doi.org/10.1029/2012JA017709>
- Stolle C., Lühr H., Rother M., Balasis G.* Magnetic signatures of equatorial spread F as observed by the CHAMP satellite // *J. Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. P. A02304. <https://doi.org/10.1029/2005JA011184>
- Sukhorukov A.I., Stubbe P.* Excitation of the ionospheric Alfvén resonator by strong lightning discharges // *Geophysical Research Letters*. 1997. Vol. 24. P. 829–832. <https://doi.org/10.1029/97GL00807>
- Surkov V.V., Pokhotelov O.A., Parrot M., Fedorov E.N., Hayakawa M.* Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes // *Annales Geophysicae*. 2004. Vol. 22 (8). P. 2877–2889. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-2877-2004>
- Surkov V.V., Hayakawa M., Schekotov A.Y., Fedorov E.N., Molchanov O.A.* Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms // *J. Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. P. A01303. <https://doi.org/10.1029/2005JA011320>
- Surkov V.V., Pilipenko V.A.* Spectral signatures of the ionospheric Alfvén resonator to be observed by low-Earth orbit satellite // *J. Geophysical Research*. 2016. Vol. 121. P. 2783–2794. <https://doi.org/10.1002/2015JA021912>
- Trakhtengertz V.Y., Feldstein A.Y.* Turbulent Alfvén boundary layer in the polar ionosphere: 1. Excitation conditions and energetics // *J. Geophysical Research*. 1991. Vol. 96. P. 19363–19372. <https://doi.org/10.1029/91JA00376>
- Woodroffe J.R., Lysak R.L.* Ultra-low frequency wave coupling in the ionospheric Alfvén resonator: Characteristics and implications for the interpretation of ground magnetic fields // *J. Geophysical Research*. 2012. Vol. 117. P. A03223. <https://doi.org/10.1029/91JA0037610.1029/2011JA017057>
- Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T.* Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L = 5.2 // *Annales Geophysicae*. 2003. Vol. 21. P. 779–786. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-779-2003>
- Zettergren M.D., Snively J.B.* Ionospheric signatures of acoustic waves generated by transient tropospheric forcing // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. P. 5345–5349. <https://doi.org/10.1002/2013GL058018>
- Zettergren M.D., Snively J.B.* Ionospheric response to infrasonic-acoustic waves generated by natural hazard events // *J. Geophysical Research*. 2015. Vol. 120. P. 8002–8024. <https://doi.org/10.1002/2015JA021116>

ELECTROMAGNETIC UHF RESPONSE OF THE IONOSPHERE TO THUNDERSTORMS AND TYPHOONS

© 2025 V. A. Pilipenko^{1, 2, *}, D. D. Pozdnyakova^{1, 3, **}, Yu. V. Poklad^{4, ***}

¹*Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

⁴*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: pilipenko_va@mail.ru

**E-mail: d_pozdnyakova@live.ru

***E-mail: poklad@mail.ru

The appearance of a resonant spectral structure (RSS) – multiband spectra of electromagnetic noise in the range of the first *Hz*, observed on the Earth's surface at night, is usually associated with the excitation of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) in the upper ionosphere. The proposed review discusses various ideas about the specific mechanisms of excitation of IAR by lightning discharges: (1) the generation of a set of eigenmodes of the IAR, (2) the formation of an echo pulse by the primary pulse reflected from the upper boundary of the IAR, (3) the presence of isolated pulses with a certain duration. The arguments for and against each proposed mechanism are considered. Qualitative representations of how the pulse structure of the response to a thunderstorm discharge should be visible in the data of low-orbit satellites are formulated. The response of an ionospheric magnetosonic waveguide to volcanic thunderstorm activity is considered. The detection of «magnetic ripples» over typhoons in the upper ionosphere – fluctuations of small amplitude with a period of 5–10 seconds caused by small-scale longitudinal currents, which are apparently generated by acoustic waves in the lower ionosphere, is discussed. The unsolved problems of electromagnetic coupling between the atmosphere and the ionosphere in the IAR range have been formulated.

Keywords: lightning, typhoons, Pc1 waves, ionosphere, ionospheric Alfvén resonator, resonant spectral structure, ionospheric waveguide.