

ПРОЯВЛЕНИЕ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА В НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Д.Д. Позднякова

Институт физики Земли Российской академии наук, Москва, Россия,
d_pozdnyakova@live.ru

MANIFESTATION OF THE IONOSPHERIC ALFVEN RESONATOR IN GROUND-BASED AND SATELLITE OBSERVATIONS

D.D. Pozdnyakova

Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Аннотация. Многополосные спектры ночных электромагнитных шумов в диапазоне первых Гц принято ассоциировать с откликом ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) на излучения от молниевых разрядов. Можно, однако, показать, что для получения такой резонансной спектральной структуры (РСС) не нужен набор резонансных мод, а достаточно отражающей границы. При отражении альвеновского импульса от верхней ионосферы наземная станция регистрирует два последовательных импульса, разделенных на время прохождения через ионосферу до точки отражения и обратно. При спектральном анализе наличие пар связанных импульсов проявится как возникновение спектральных гармоник, разнесенных на обратное время пробега. Эта концепция подтвердилась при анализе как тестовых сигналов, так и данных индукционных магнитометров. Хотя на наземных станциях РСС наблюдается почти каждую ночь, сообщений о регистрации таких структур на низкоорбитальных спутниках практически нет. Сформулированы качественные представления, как импульсная структура отклика на грозовой разряд должна быть видна в данных спутника. Моделирование распространения импульсов в кусочно-слоистой ионосфере показало, что спектральные характеристики ИАР должны быть заметны только на земле, а внутри ИАР возникает более сложная спектральная картина. Апробация этих представлений ведется по данным спутника CSES.

Ключевые слова: молния, пульсации Pc1, ионосфера, альвеновский резонатор, резонансная спектральная структура.

Abstract. The spectra of electromagnetic noise observed at night in the range of the first Hz with a characteristic periodic spectral structure are usually associated with the response of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) to radiation from lightning discharges. However, it can be shown that to obtain such a resonant spectral structure, a set of resonant modes is not needed, while a reflecting boundary is sufficient. When an Alfvén pulse is reflected from the upper ionosphere, the ground station registers two consecutive pulses divided by the time that the pulse passes through the ionosphere to the reflection point and back. In spectral analysis, the presence of pairs of coupled pulses will manifest itself as the occurrence of spectral harmonics spaced by the reverse travel time. To test this concept, we analyzed both test signals and data from ground-based induction magnetometers. Surprisingly, although the RSS is observed at ground stations for many hours every night, there are practically no reports of signs of IAR from space missions. Qualitative representations of how such a structure should be visible in the data of a low-orbit satellite are formulated. Modeling of the propagation of Alfvén pulses in a piecewise layered ionosphere showed that the spectral characteristics of the IAR should be noticeable only on Earth, and inside the IAR, the superposition of pulses propagating up and down creates a more complex spectral picture. The proposed concept makes it possible to understand why IAR structures should be less noticeable in the ionosphere than on Earth.

Keywords: lightning, Pc1 pulsations, ionosphere, Alfvén resonator, resonant spectral structure.

ВВЕДЕНИЕ: РЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Природные резонаторы для естественных э/м волн играют важную роль в космической геофизике — магнитосферный альвеновский резонатор, Шумановский резонанс (ШР), ионосферный альвеновский резонатор (ИАР). Они приводят к формированию квазипериодических излучений, способствуют накоплению волновой энергии в некоторых областях пространства, а формируемые ими гармонические излучения используются для дистанционной диагностики параметров магнитосферы и ионосферы. Особенностью вариаций геомагнитного поля в диапазоне ниже основного тона ШР (~8 Гц) является возникновение резонансной спектральной структуры (РСС), которую принято связывать с ИАР. Нижняя границей ИАР является E-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. Механизм возбуждения ИАР связывается с грозowymi разрядами.

Обычно неявно предполагается, что РСС обусловлена тем, что ИАР заполнен запертыми стоячими колебаниями между точками отражения. Однако кажется удивительным, что короткий импульс грозового разряда способен раскачать ионосферную резонансную систему. Возможно механизм формирования РСС не связан с возбуждением набора колебаний в ИАР, а обусловлен импульсной структурой э/м возмущений во время грозовой активности. Для проверки этой концепции мы провели анализ как тестовых сигналов, так и данных регистрации э/м шумов на станциях сети PWING.

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУКТУРЫ

Возможная схема возбуждения ИАР грозовым разрядом следующая (рис. 1). Разряд молнии возбуждает начальный импульс, который

распространяется в атмосфере и практически мгновенно достигает места наблюдения. При этом первоначальный импульс частично проникает в ионосферу, распространяется вверх как альвеновский импульс, отражается от верхней границы ИАР, и возвращается обратно на землю в виде эхо-импульса. Задержка между эхом и первичным импульсом равна времени его распространения вверх и вниз в ионосфере, т.е. основному периоду ИАР.

Для апробации описанных представлений использованы данные индукционного магнитометра сети RWING с частотой дискретизации 64 Гц. Чтобы выделить парные импульсы во временном ряду, алгоритм метода наложенных эпох (МНЭ) отбирает на часовом интервале сильные импульсы, момент которых принимается за реперную точку, и усредняет все участки магнитограммы вблизи реперной точки. МНЭ анализ показывает усредненную форму импульсного фона: за основным импульсом следует вторичный импульс другой полярности. Последовательность спектров мощности и МНЭ-кривых (рис. 2) показывает, что за основным импульсом следует вторичный задержкой ≈ 1 с. Серия парных импульсов приводит к многополосной структуре со спектральными пиками при $f \sim 1.5, 2.5, \dots$ Гц. Сдвиг частоты между спектральными линиями ≈ 1 Гц соответствует обратной задержке между импульсами $\approx 1/\approx 1$.

МОДЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ

Для тестирования возможных механизмов образования РСС рассмотрены 2 импульса, разнесенные по времени на $\approx t$. Набор получаемых спектральных максимумов можно использовать для диагностики граничных условий мод резонатора. Решение задачи о колебаниях однородной струны длиной L с закрепленным и свободным концами при $z=0$ и $z=L$ показывает, что в случае симметричных граничных условий $E(z=0)=E(z=L)=0$ для закрепленной струны, получается набор частот $\omega_n = \omega_A n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), где $\omega_A = V_A/L$ - собственная частота ИАР. Отношение частот гармоник и основной моды будет $\omega_n/\omega_1 = 2, 3, 4, \dots$. При асимметричных граничных условиях: $E(z=0) = 0$ и $\partial_z E(z=L) = 0$ (колебания струны с закрепленным и свободным концами) получается $\omega_n = \omega_A(n + 1/2)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). В этом случае отношение частот гармоник и основной моды составит $\omega_n/\omega_1 = 3, 5, 7, \dots$. Для однополярных импульсов спектральные максимумы должны наблюдаться на частотах $\omega_n = n\omega_A$ целых гармоник, а для разнополярных импульсов - на полудельных (четверть-волновых) гармониках $\omega_n = (n + 1/2)\omega_A$. В обоих случаях частотный сдвиг между гармониками $\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n = \omega_A$. Анализ наблюдаемых отношений спектральных гармоник РСС показал преобладание значений 3, 5, 7.

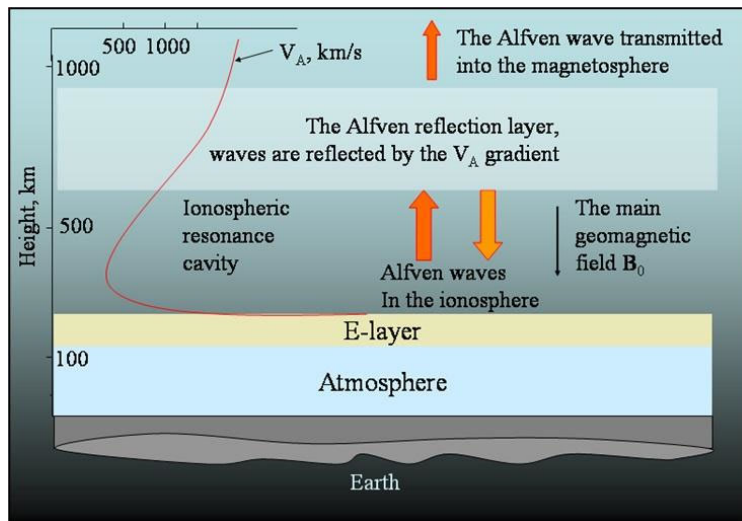


Рис. 1. Возможная схема возбуждения ИАР грозвым разрядом

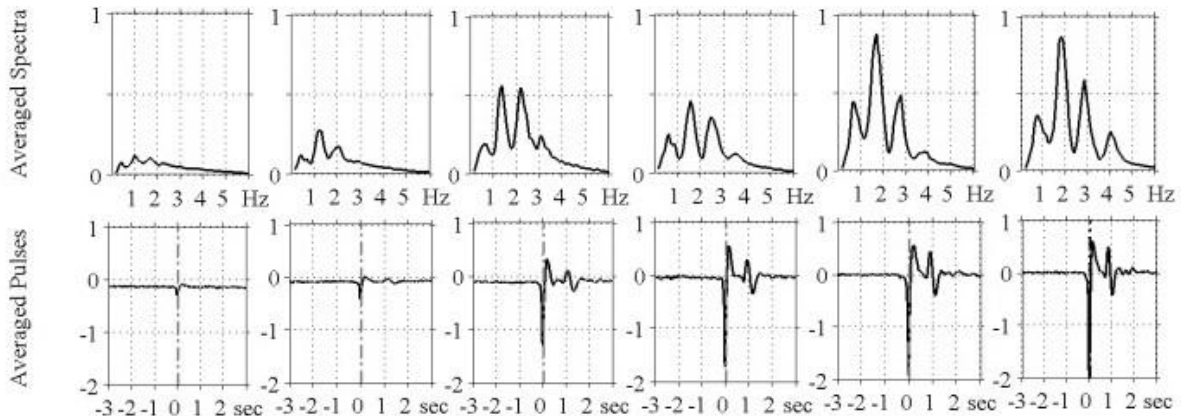


Рис. 2. Последовательность спектров мощности и МНЭ-кривых

ИАР В ИОНОСФЕРЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ НА СПУТНИКЕ

Удивительно, что при обширных наземных наблюдениях РСС, практически не проводилось поиска этой структуры по спутниковым данным. Датчик электрического поля микроспутника «Чибис-М» (450 км) выявил лишь несколько событий с признаками ИАР (рис. 3а).

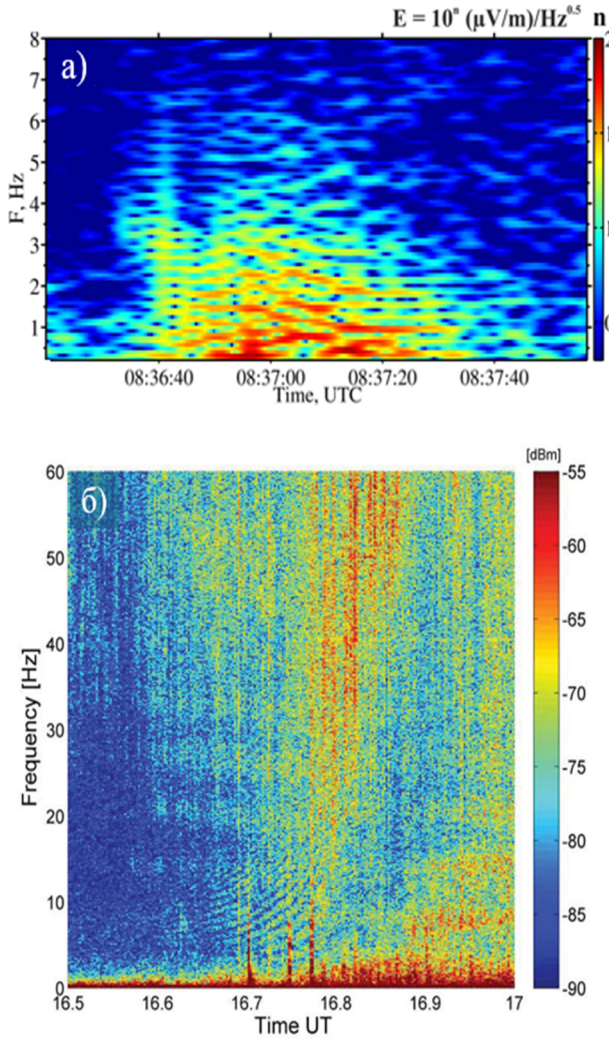


Рис. 3. События с признаками ИАР, зарегистрированные датчиком микроспутника «Чибис-М» (а) и антеннами спутника C/NOFS (б)

Высокочувствительные измерения электрического поля с помощью 12-метровых антенн спутника C/NOFS (400-850 км) выявили редкие кратковременные структуры, напоминающие отпечаток пальца (рис. 3б). Однако частоты этих структур оказались в несколько раз больше, чем предсказания модели ИАР, что потребовало бы предположения о необычно низкой плотности плазмы в верхней ионосфере. Ни C/NOFS, ни Chibis-M, не обнаружили никаких свидетельств непрерывной волновой активности в диапазоне ИАР.

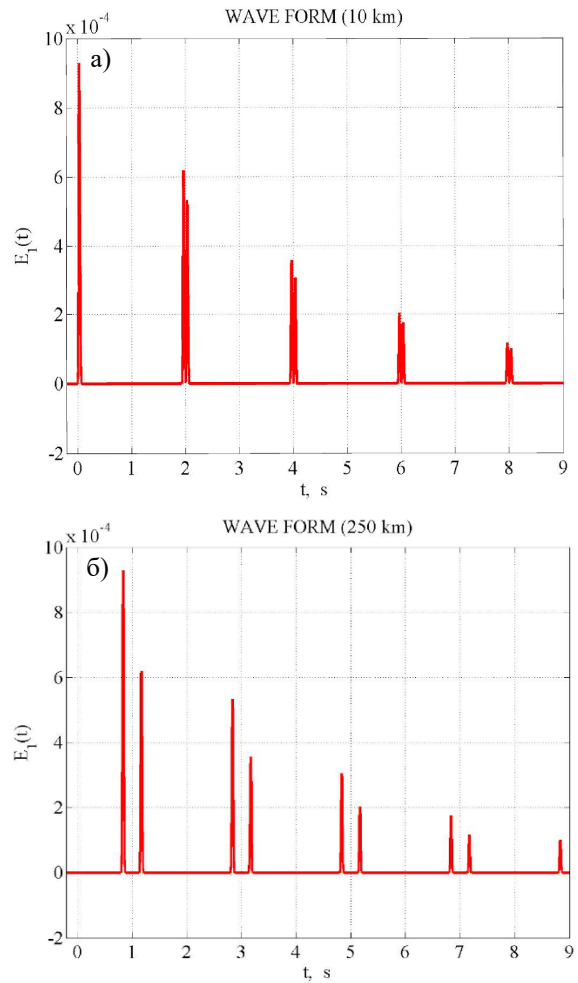


Рис. 4. Возбужденный и отраженный импульсы, смоделированные для высот космического аппарата 10 км (а) и 250 км (б)

Мы смоделировали ожидаемые формы сигналов и спектров на разных высотах на основе концепции импульсного возбуждения ИАР. Импульс, возбужденный на нижней границе, распространяется вверх и в момент $t = |_{\Lambda}$ достигает полупрозрачной верхней границы на высоте $z = h_{\Lambda}$, частично просачивается в магнитосферу и частично отражается назад как от изолятора (рис. 4). Космический аппарат, находящийся внутри ИАР на высоте h_S , сначала обнаружит распространяющийся вверх импульс, а нисходящий импульс — через время $|_{S} \sim 2(h_{\Lambda} - h_S)/V_{\Lambda}$. Затем импульс отражается от E-слоя (при этом он частично поглощается), снова распространяется вверх, отражается от верхней границы ИАР и т.д. Интервал между последовательно обнаруженными импульсами внутри ИАР меньше времени прохождения альвеновского импульса вверх и вниз по всей ионосфере τ_{Λ} , т.е. $|_{S} < \tau_{\Lambda}$. Спектры отклика ИАР при импульсном возбуждении оказываются разными на высотах выше и ниже верхней границы. Мы ищем эти спектральные особенности в данных электрического поля с низкоорбитального спутника CSES.