

УДК 550.385.37+550.383

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН

© 2013 г. Б.В. Довбня¹, А.В. Гульельми², А.С. Потапов³, Р.А. Рахматулин³

¹ Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, п. Борок Ярославской обл., Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

По данным наблюдения ультранизкочастотных электромагнитных излучений на двух среднеширотных обсерваториях описываются резонансные структуры, аналогичные спектральным полосам, образуемым ионосферным альвеновским резонатором (ИАР), но отличающиеся от них по частоте и временной эволюции спектра. Проанализированы свойства наблюдаемых резонансных сигналов, их отличия от излучения, характерного для ИАР.

Выдвинуто предположение о возбуждении излучений в надионосферном альвеновском резонаторе (НИАР). Сделаны оценки собственных частот НИАР на основе сравнения его конфигурации с магнитосферным альвеновским резонатором. Полученные результаты сопоставлены с измерениями. Обсуждается альтернативный вариант объяснения природы найденных резонансных структур.

Ключевые слова: магнитные наблюдения, ультранизкочастотные излучения, ионосферные и магнитосферные альвеновские резонаторы.

Введение

Открытие в 80-е годы прошлого столетия ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) – одно из замечательных достижений физики ультранизкочастотных электромагнитных волн [Поляков, Рапопорт, 1981; Беляев и др., 1987]. Область формирования ИАР расположена в полости, образующейся вдоль магнитной силовой трубки между двумя изгибами профиля плотности плазмы, первый из которых находится в нижней части *F*-слоя ионосферы, второй – в зоне быстрого спада плотности на высотах около 2000–4000 км. В этой области альвеновские колебания захватываются, и образуется структура стоячих волн [Поляков, Рапопорт, 1981]. Добротность резонатора *Q* может достигать 5–10. К настоящему времени волновая структура ИАР неплохо изучена как теоретически [Беляев и др., 1989], так и экспериментально [Беляев и др., 1997]. Более того, исследовано влияние внешних воздействий, в частности, сейсмических сигналов, на режим захваченных в резонатор волн [Потапов, Довбня, Цэгмед, 2008].

Из других резонансных структур в околоземной плазме наиболее известны, пожалуй, резонансы геомагнитных силовых линий, образующие в совокупности общий магнитосферный резонатор альвеновских волн, стенками которого являются сопряженные области ионосферы. Этот резонатор удерживает стоячие альвеновские волны, отражающиеся от его стенок – высокопроводящей ионосферы в северном и южном полушариях. Фундаментальная частота такого резонатора на средних широтах не превышает 0.1 Гц.

В той же области магнитосферы имеется и другой, более высокочастотный, резонатор, который странным образом до сих пор ускользал от внимания теоретиков и интерпретаторов. Речь идет о резонаторе для альвеновских волн, расположенном в надионосферной области магнитосферы над парой сопряженных ИАР. Его нижними торцами служат перегибы плотности плазмы на высоте 2000–4000 км в северном и южном полушариях, являющиеся одновременно верхними стенками сопряженных ИАР.

Цель работы – представление экспериментальных данных, свидетельствующих о наличии в магнитосферно-ионосферной системе специфического резонатора ультранизкочастотных электромагнитных волн, и обсуждение его возможной природы.

Наблюдения

Для анализа резонансных структур ультранизкочастотных (УНЧ) излучений были использованы данные магнитных измерений на двух среднеширотных обсерваториях, одна из которых – Геофизическая обсерватория Борок Института физики Земли РАН (координаты 58.1° с.ш., 38.2° в.д., $L=2.9$), другая – Саянская солнечная обсерватория Монды Института солнечно-земной физики СО РАН (координаты 51.6° с.ш., 100.9° в.д., $L=2.1$). На первой обсерватории для измерений использовался индукционный магнитометр с регистрацией на аналоговый магнитофон; на второй – цифровой индукционный магнитометр *LEMI-30*. На обеих обсерваториях регистрировалось по две горизонтальные компоненты магнитных осцилляций – север–юг и восток–запад. Амплитудно-частотная характеристика приборов позволяла анализировать колебания с частотой до 10 Гц на обсерватории Борок и до 30 Гц на обсерватории Монды. Аналоговые записи, полученные на обсерватории Борок, оцифровывались, а затем подвергались спектрально-временному анализу с помощью компьютерных программ так же, как и цифровые записи обсерватории Монды. Строились динамические спектры колебаний, т.е. трехмерные спектрограммы изменения интенсивности в зависимости от частоты и времени, которые затем анализировались визуально. На динамических спектрах хорошо видна периодическая структура спектральных полос, частота которых меняется во времени.

Результаты наблюдений

Структуру динамических спектров электромагнитных колебаний, возбуждаемых в ИАР, иллюстрирует рис. 1.

Как правило, на спектрограммах, отображающих частотно-временное развитие явления, резонансные полосы ИАР появляются в послеполуденное или вечернее время; они, плавно поднимаясь вверх, достигают максимума в послеполуночные часы, после чего плавно опускаются. Основной причиной вариаций частоты полос является изменение в течение суток электронной концентрации в F -слое ионосферы [Hebden *et al.*, 2005]. Число полос иногда достигает 7–10, но чаще не превышает 5. Ширина каждой полосы – около 0.3–0.5 Гц в ее начале и более 1 Гц в момент достижения максимума. Описанная картина является типичной для рассматриваемого явления.

Такое наземное проявление ионосферных альвеновских резонансов хорошо известно и многократно описано в литературе (см., например, [Belyaev *et al.*, 1990; Böisinger *et al.*, 2002]). Однако существуют публикации, в которых содержатся сведения об отклонениях от этой классической картины, таких, как расщепление (тонкая структура) отдельных спектральных линий [Böisinger, Demekhov, Trakhtengerts, 2004; Бару, Колосков, Рахматулин, 2012], неэквидистантность спектра, различие частоты спектральных полос в разных компонентах излучения [Ermakova, Kotik, Polyakov, 2008].

В своих наблюдениях мы обратили внимание на появление совершенно иной структуры – необычной системы дополнительных резонансных полос электромагнитного излучения (рис. 2). Эта резонансная структура располагается под нижней ветвью спектральных полос стандартного излучения ИАР, появляясь примерно через четыре часа после минимума их частоты.

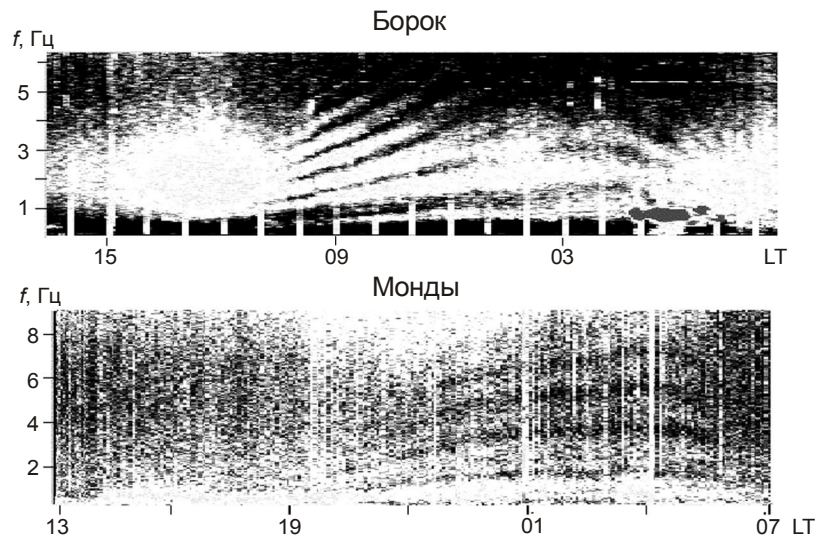


Рис. 1. Типичная структура ионосферных альвеновских резонансов. Колебания зарегистрированы на обсерватории Борок 18–19.09.1985 г., на обсерватории Монды 02.04.2010 г.

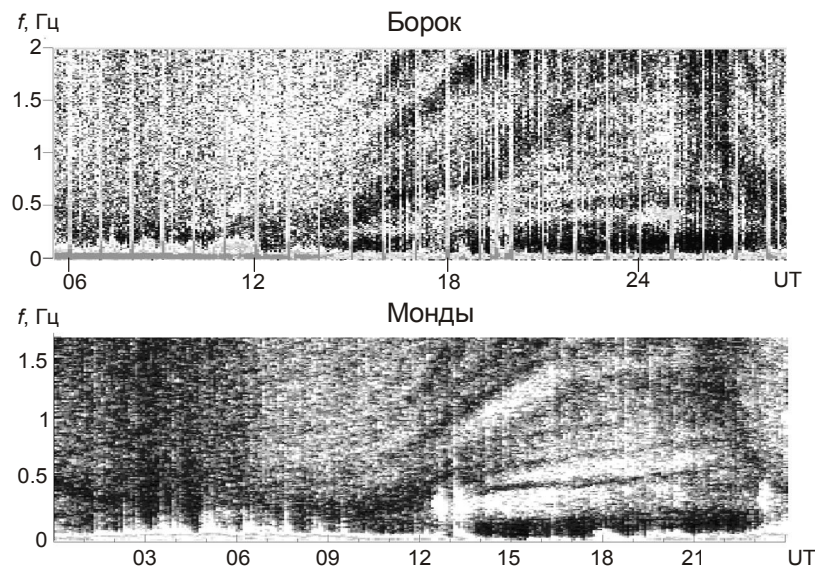


Рис. 2. Примеры появления необычной резонансной структуры. Колебания зарегистрированы на обсерватории Борок 21–22.09.1986 г.; на обсерватории Монды – 06.09.2010 г.

Динамические характеристики резонансной структуры на двух удаленных друг от друга обсерваториях оказались подобными. Частоты новых резонансных полос эквидистантны, наблюдается от 3 до 10 гармоник. В каждый момент времени частоты всех дополнительных полос лежат ниже текущего значения частоты основной гармоники ИАР, хотя в целом частотный диапазон всей резонансной системы перекрывается с диапазоном ИАР. Ширина каждой полосы составляет 0.15–0.2 Гц и остается неизменной в течение всего времени наблюдения от 19 до 9 ч LT. Частота первой гармоники меняется в пределах 0.15–0.3 Гц. Изменение частоты дополнительных полос со временем выражено не так заметно, как у ИАР. Важной особенностью обнаруженных структур является то, что они всегда наблюдаются одновременно с резонансными полосами ИАР.

В литературе нами был найден только один пример описания подобных структур (см. [Ермакова, Поляков, Семенова, 2011, с.148, рис. 1, левая верхняя панель]). Однако авторы названной работы сосредоточились на анализе расщепления полос (“тонкой структуре”) зарегистрированного излучения, не обратив внимания на то, что это рас-

щепление происходило в резонансной структуре, которая не является частью стандартного ИАР. Расщепление полос на низких широтах впервые было описано в работе [Böisinger, Demekhov, Trakhtengerts, 2004], авторы которой рассматривали это явление в обычном излучении ИАР. Мы же имеем дело с отдельной, отличной от излучения ИАР, резонансной структурой.

Интерпретация

Сначала выясним, может ли наблюдаемое излучение формироваться в ИАР. Ответ на этот вопрос может быть только отрицательным, поскольку появление в резонаторе частот ниже фундаментальной противоречит законам теории колебаний. Наблюдаемые полосы могли бы возникнуть в том же резонаторе только в случае кардинального изменения его свойств; при этом его фундаментальная частота должна была бы снизиться до частоты нижней из полос. Этого явно не происходит. Мы видим, что прежняя резонансная структура сохраняется, ее спектральные полосы плавно продолжают свой обычный ход под действием суточной вариации параметров ИАР, которая формируется регулярным понижением критической частоты F_2 -слоя ионосферы в ночное время и, соответственно, уменьшением в нем электронной концентрации.

Следовательно, обсуждаемые структуры, обнаруживаемые на спектрограммах под нижней ветвью резонансных полос ИАР, не могут быть интерпретированы в рамках имеющейся на сегодня стандартной теории ИАР. На наш взгляд, объяснение наблюдаемой картины невозможно без привлечения информации о дополнительных резонаторах, не относящихся непосредственно к ИАР. Обсудим, какими могут быть эти резонаторы.

Прежде всего, обратим особое внимание на обнаруженное нами важное свойство новых необычных спектральных структур, а именно на то, что они всегда наблюдаются одновременно с хорошо известными структурами ИАР. Отсюда напрашивается вывод о существовании некоего резонатора, отличного от ИАР (см. выше), но тесно с ним связанного. Далее учтем, что собственные частоты нового резонатора лежат несколько ниже частот ИАР. Один из резонаторов такого рода хорошо известен – это магнитосферный альвеновский резонатор, сокращенно называемый МАР [Пилипенко, 2003]. МАР удерживает стоячие волны Альвена, отражающиеся от стенок резонатора, которыми служат высокопроводящие нижние слои ионосферы в северном и южном полушариях. Но фундаментальная частота МАР слишком мала, чтобы отождествить с ним резонатор, который мы ищем. Так, для магнитных оболочек, сопряженных с обсерваториями Борок и Монды, частоты фундаментальных колебаний не превышают 0.03 и 0.1 Гц соответственно.

Однако в интересующей нас области околоземного пространства возможен и другой, более высокочастотный, резонатор, который также до настоящего времени почему-то ускользал от внимания исследователей. Дело в том, что альвеновские волны, распространяющиеся вдоль геомагнитных силовых линий, могут отражаться не только от ионосферы, но и от перегиба плотности плазмы на высоте 2000–4000 км, который является верхней стенкой ионосферного альвеновского резонатора; при этом волны отражаются от этой стенки сверху, а не снизу.

Представим себе пару ИАР с осями, лежащими на одной и той же силовой линии геомагнитного поля; один ИАР находится в северном полушарии, другой – в южном. Описанная конфигурация подсказала нам идею о существовании резонатора, расположенного над парой магнитосопряженных ИАР, который будем условно называть надionoсферным альвеновским резонатором (НИАР). Торцами этого резонатора служат

верхние стенки двух сопряженных ИАР. Гипотеза о существовании НИАР высказана в недавней работе [Довбня и др., 2013].

Фундаментальная частота нового резонансного образования будет определяться пробегом волн по более короткому, нежели для магнитосферного альвеновского резонатора, отрезку силовой линии. Попытаемся оценить частоту первой гармоники НИАР, используя расчеты, выполненные для оценки периода собственных альвеновских колебаний магнитосферы в работе [Гульельми, Троицкая, 1973]. Заметим вначале, что из рассмотренных в названной работе трех мод альвеновских колебаний дипольной магнитосферы – тороидальной, гофрированной, твистовой – к нашему случаю наиболее близка последняя. Период первой гармоники альвеновских колебаний T_1 можно вычислить по формуле [Гульельми, Троицкая, 1973]:

$$T_1 = \frac{4\pi^{3/2} R_E^4 m_p^{1/2}}{M} L^4 \sqrt{N_0} / \Lambda_1(L), \quad (1)$$

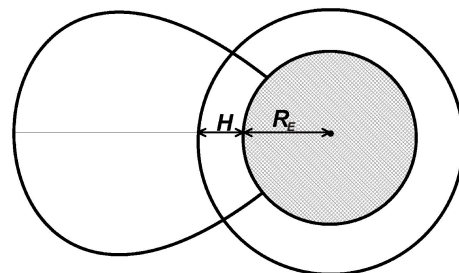
где R_E и M – радиус и магнитный момент Земли; m_p – масса протона; L – параметр Мак-Илвейна (расстояние от центра Земли до вершины силовой линии, измеренное в земных радиусах); N_0 – число частиц (протонов) в 1 см^3 в вершине силовой линии; $\Lambda_1(L)$ – определяющий собственные значения резонатора параметр, зависящий от L , номера гармоники и моды колебаний. В случае первой гармоники твистовых колебаний силовых линий для обсерватории Борок ($L=2.9$) этот параметр равен примерно 1.8, для обсерватории Монды ($L=2.1$) – 2.0.

Подставляя в (1) значения физических постоянных магнитных оболочек, сопряженных с обсерваториями Борок и Монды, получаем фундаментальный период альвеновских колебаний для них: $2.3 \sqrt{N_0}$ с для обсерватории Борок и $0.57 \sqrt{N_0}$ с для обсерватории Монды.

Для оценки периода собственных колебаний НИАР, силовые линии которого на $2H$ короче линий, образуемых ИАР (H – высота точки отражения НИАР или, что одно и то же, верхней стенки ИАР), воспользуемся соображением, которое становится очевидным при обращении к рис. 3.

Введем вместо параметра Мак-Илвейна L его аналог L^* , отличающийся тем, что он определяется не на основе радиуса Земли R_E , а на основе большего радиуса $R_E^* = R_E + H$, т.е. $L^* = L / (1 + H/R_E)$. Длина силовой линии, вдоль которой заперты альвеновские колебания в верхнем альвеновском резонаторе, в этом случае будет зависеть от L так же, как и длина силовой линии классического МАР, если вместо параметра L взять его аналог L^* . Следовательно, для оценки собственной частоты НИАР можно воспользоваться формулой (1), заменив в ней L на L^* . Положив $H = 3000$ км, получаем $L^* = 0.68L$; фундаментальная частота колебаний верхнемагнитосферного альвеновского резонатора составит $f_{1В} = 2.04 / \sqrt{N_0}$ для обсерватории Борок и $f_{2В} = 8.26 / \sqrt{N_0}$ для обсерватории Монды.

Рис. 3. Схема, поясняющая метод перехода от L к L^* для оценки собственной частоты НИАР. Изображена одна из силовых линий геомагнитного поля; внутренний круг – меридиональное сечение Земли; внешняя окружность – поверхность верхней стенки ИАР; R_E – радиус Земли; H – высота точки отражения НИАР



Следует заметить, что предложенный метод оценки собственных частот НИАР дает оценку сверху, поскольку по умолчанию предполагается, что альвеновская скорость вдоль силовой линии остается постоянной. Это возможно лишь в том случае, когда корень квадратный из плотности плазмы меняется вдоль силовой линии пропорционально напряженности магнитного поля. На самом деле в большинстве моделей плотность плазмы спадает при удалении от поверхности Земли, по крайней мере, не быстрее, чем магнитное поле. При этом альвеновская скорость в верхней точке силовой линии будет минимальна, т.е. основная часть времени пробега волны между точками отражения будет накапливаться в ее верхней части.

Соответственно, изменение собственной частоты при переносе точек отражения вверх на высоту H от поверхности Земли будет меньше ее изменения, вызванного укорочением силовой линии; собственные частоты НИАР при этом будут ниже сделанных оценок. Чтобы определить конкретные значения частот в Герцах, воспользуемся простой моделью распределения плотности плазмы в экваториальной плоскости в пределах плазмосферы из монографии [Кринберг, Таццилин, 1984]:

$$N_0 = N_0^* (3/L)^4, \quad (2)$$

где $N_0^* = 10^3 \text{ см}^{-3}$. Формула (2) справедлива для крайне спокойных геомагнитных условий, когда индекс $K_p=0$. При увеличении возмущенности до умеренного уровня ($K_p=2-3$) плотность может уменьшиться примерно в два раза.

На рис. 4 показана зависимость частоты первой гармоники надионосферного резонатора от плотности плазмы в вершине силовой линии для магнитных оболочек обсерваторий Борок (график 1) и Монды (график 2). Утолщенные участки линий соответствуют типичному интервалу изменения экваториальной плотности плазмы при изменении магнитной возмущенности от минимальной (модель (2)) до умеренной.

Мы не рассматриваем здесь более высокие уровни возмущенности, потому что и для ИАР, и для необычных спектральных полос, которые мы пытаемся интерпретировать, характерна низкая магнитная возмущенность.

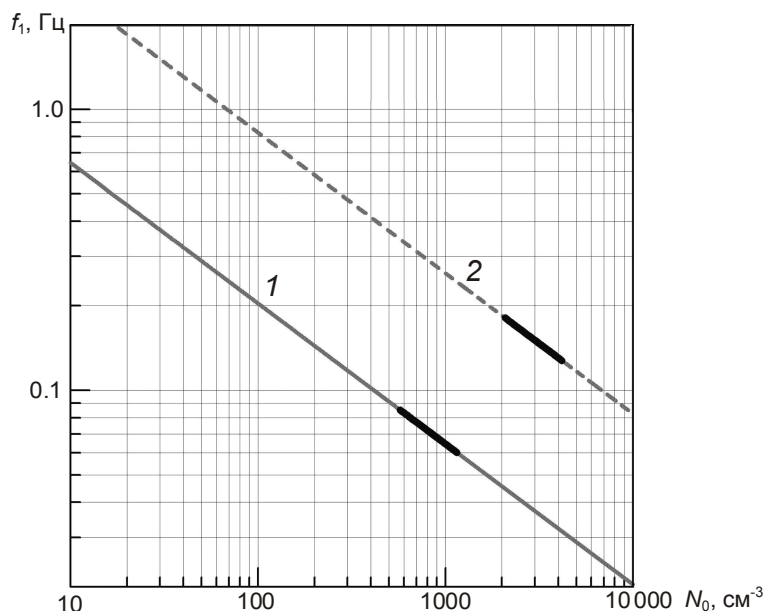


Рис. 4. Зависимость частоты первой гармоники надионосферного резонатора (НИАР) от плотности плазмы в вершине силовой линии в экваториальной плоскости для магнитных оболочек обсерваторий Борок ($L=2.9$, $L^*=1.97$, график 1) и Монды ($L=2.1$, $L^*=1.43$, график 2). f_1 – частота первой гармоники; N_0 – плотность плазмы в вершине силовой линии

Можно видеть, что при грубой оценке собственные частоты НИАР для обсерватории Борок лежат в интервале приблизительно от 0.06 до 0.09 Гц, а для обсерватории Монды – от 0.1 до 0.2 Гц. Сопоставим эти величины со спектрограммами, приведенными на рис. 2.

В период с 12 до 24 ч UT 06.09.2010 г. индекс K_p монотонно возрастал от 1₊ до 2₊. При этом частота первой гармоники дополнительных спектральных полос в обсерватории Монды составляла примерно 0.3 Гц, что лишь немного выше оценки фундаментальной частоты НИАР. Магнитная возмущенность с 12 до 03 UT 21–22.09.1986 г. колебалась в пределах от 0₊ до 2₀. В обсерватории Борок в это время наблюдались спектральные полосы, минимальная частота нижней из которых составляла примерно 0.2 Гц, примерно вдвое превышая оценочную частоту. Однако приведенные выше оценки не учитывают многих факторов. Получение конкретных значений собственных частот НИАР возможно лишь при детальном сопоставлении прямых спутниковых измерений плотности плазмы с наземными наблюдениями резонансных структур.

Альтернативой НИАР, на наш взгляд, может быть система двух связанных волноводов – ИАР и БМЗ-волновода в F -слое ионосферы (здесь БМЗ – “быстрый магнитный звук”). Обычно эти плазменные образования, способные удерживать и направлять ультранизкочастотные волны, рассматриваются отдельно друг от друга (см., например, [Овчинников, Островский, 1992]).

Волны отражаются от положительного градиента скорости по обе стороны от минимума – оси волновода. Частота отсечки БМЗ-волн обычно составляет около 0.2 Гц и определяется поперечными размерами волновода и значением альвеновской скорости в нем – $f_{\min} = c_A/2d$, где c_A – альвеновская скорость, d – толщина волновода. Альвеновские волны не могут распространяться в волноводе, поскольку они гидрируются силовыми линиями магнитного поля, которые почти перпендикулярны оси. Однако области, занимаемые резонатором ИАР и волноводом БМЗ-волн, перекрываются, в связи с чем резонатор и волновод не могут не влиять друг на друга. Для альвеновских волн, колеблющихся в ИАР между нижней границей F -слоя ионосферы и перегибом профиля плотности плазмы над ней, провал альвеновской скорости в слое F_2 является ловушкой, в которую они будут частично захватываться. Фундаментальная частота такой ловушки будет практически совпадать с частотой отсечки БМЗ-волн, распространяющихся в ионосферном волноводе. Детальная картина поведения альвеновских волн в ИАР с учетом ловушки в слое F_2 может быть выяснена лишь при решении проблемы двух связанных резонаторов, что представляет собой отдельную, достаточно сложную задачу.

Тем не менее, из качественных соображений ясно, что в определенных условиях мы должны видеть на спектрограмме спектральные полосы, соответствующие гармоникам волн с частотой выше 0.2 Гц, захваченных в ловушке, сформированной минимумом альвеновской скорости слоя F_2 , поскольку часть энергии этих волн будет просачиваться к земной поверхности.

Обсуждение

Рассмотрим, как особенности и характеристики необычной резонансной структуры, наблюдаемой на спектрограммах УНЧ волн (см. рис. 2), могут быть объяснены двумя предложенными выше гипотезами происхождения этих эффектов.

На рис. 2 видно, что наклон к оси времени новых спектральных полос намного меньше наклона полос ИАР. В рамках гипотезы о надионосферном альвеновском резонаторе меньший наклон полос может быть обусловлен менее выраженными суточными вариациями плотности плазмы в плазмосфере на $L < 3$, чем в ионосфере на высотах менее 3000 км. Действительно, хорошо известно, что электронная концентрация в слое F_2

ионосферы благодаря вариациям потока ультрафиолета меняется от дня к ночи в несколько раз. Плотность плазмы во внутренних областях плазмосферы ($L \leq 3$) меняется в течение суток гораздо слабее – не более чем на десятки процентов [Кринберг, Таццилин, 1984], поскольку в этой области вариации электронного содержания регулируются более медленными диффузионно-конвективными процессами. Так, зимой при минимуме солнечной активности, т.е. в наиболее благоприятных условиях для появления излучения ИАР, типичные значения электронной плотности в среднеширотном слое F_2 днем достигают $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а ночью составляют около 10^5 см^{-3} , что в 6 раз меньше [Иванов-Холодный, Михайлов, 1980]. В то же время, в плазмосфере на магнитных оболочках $L \sim 2-3$ разница между дневными и ночными значениями электронной плотности не превышает 35–40% [Мартынченко, Ботова, 2010].

В рамках гипотезы об альвеновском резонаторе в слое F_2 можно лишь предположить, что суточная вариация плотности плазмы в области ионосферного МГД-волновода оказывается менее значительной, чем суточные изменения средней плотности плазмы между нижней границей ионосферы и высотой 3000 км.

Отсутствие значительной разницы между частотами новых спектральных полос на двух обсерваториях, L -оболочки которых отличаются на $0.8R_E$, легко объясняется в рамках гипотезы об альвеновском резонаторе в слое F_2 , поскольку свойства БМЗ-волновода, а следовательно, и альвеновского резонатора в этом слое на средних широтах, слабо зависят от местоположения. Если же предположить, что колебания формируются в надионосферном волноводе, то, на первый взгляд, фундаментальная частота колебаний на обсерватории Монды ($L=2.1$) должна быть существенно выше частоты на обсерватории Борок ($L=2.9$) из-за различия в длине магнитных силовых трубок, сопряженных с обсерваториями, и разности в напряженности магнитного поля в вершинах трубок. Однако, во-первых, известно, что плазма, заполняющая низкие силовые трубки, содержит большую долю тяжелых ионов He^+ и O^+ , что повышает эффективную плотность плазмы и может, в принципе, компенсировать влияние изменения напряженности магнитного поля на частоту колебаний. Во-вторых, о реальных различиях наблюдаемых частот можно говорить только при одновременных измерениях на двух обсерваториях. К сожалению, такие измерения маловероятны, поскольку резонансы ИАР, так же, видимо, как и обнаруженные новые полосы, локальны.

Заключение

Представлены спектрограммы резонансных структур, которые аналогичны спектральным полосам, образуемым ионосферным альвеновским резонатором, но отличаются от них как по частоте, так и по форме и поведению спектральных полос во времени. В попытке объяснить природу нового многополосного излучения сделано предположение о существовании надионосферного альвеновского резонатора НИАР, стенками которого служат верхние стенки двух магнитно сопряженных резонаторов ИАР. Оценки собственных частот НИАР показали их близость к наблюдаемым частотам, по крайней мере, для станций с $L \sim 2$. Предложено альтернативное объяснение наблюдавшихся структур, заключающееся в их возможной генерации в виде альвеновских волн, захваченных в F -слое ионосферы в области локализации ионосферного БМЗ-волновода.

Благодарности

Авторы благодарят Б.И. Клайна за полезные дискуссии.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-05-00066 и 13-05-00529).

Литература

- Бару Н.А., Колосков А.В., Рахматулин Р.А. Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альфвеновского резонанса // Сб. тез. докл. Первой украинской конференции “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства” (Харьков, 25–27 сент. 2012 г.). Харьков, 2012. С.150–152.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297, № 3. С.840–843.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Теория формирования резонансной структуры атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 7. С.802–810.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н., Исаев С.В. Экспериментальные исследования ионосферного альфвеновского резонатора по наблюдениям электромагнитного шумового фона в солнечном цикле 1985–1995 гг. // Радиофизика. 1997. Т. 40, № 10. С.1305–1319.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Довбня Б.В., Гульельми А.В., Потапов А.С., Клайн Б.И. О существовании надионосферного резонатора Альвена // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 22. С.12–15.
- Ермакова Е.Н., Поляков С.В., Семенова Н.В. Исследование тонкой структуры в спектре фонового низкочастотного шума на средних широтах // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXIV Annual Seminar, Apatity. Kola Science Centre, RAS, 2011. P.147–150.
- Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 190 с.
- Кринберг И.А., Таццилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 188 с.
- Мартыненко О.В., Ботова М.Г. Особенности диффузионного формирования пространственной структуры плазмосферы: полностью симметричная постановка задачи // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13, № 4/2. С.1060–1067.
- Овчинников А.О., Островский В.Н. Теория ионосферного МГД-волновода. СПб.: СПбГУ, 1992. 120 с.
- Пилипенко В.А. Ультранизкочастотные волны в космосе и на Земле // Очерки геофизических исследований: К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. С.216–228. М.: ОИФЗ РАН, 2003. 474 с.
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэронавигация. 1981. Т. 21. С.610–614.
- Потапов А.С., Довбня Б.В., Цэгмед Б. О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена // Физика Земли. 2008. № 4. С.93–96.
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. The ionospheric Alfvén resonator // J. Atmos. Terr. Phys. 1990. V. 52. P.781–788.
- Bösinger 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. Geophys. Res. 2002. V. 107. 1281, doi: 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) // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L18802, doi: 10.1029/2004GL020777.
- Ermakova E.N., Kotik D.S., Polyakov S.V. Studying specific features of the resonance structure of the background noise spectrum in the frequency range 1–10 Hz with allowance for the slope of the Earth’s magnetic field // Radiophysics and Quantum Electronics. 2008. V. 51(7). P.519–527.
- 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 // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P.1711–1721.
- Tepley L.R., Landshoff R.K. Waveguide theory for ionospheric propagation of hydromagnetic emissions // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P.1499–1504.

Сведения об авторах

ДОВБНЯ Борис Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Геофизическая обсерватория Борок Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 152742, Ярославская область, Некоузский район, п. Борок. Тел.: +7 (48547) 24 763. E-mail: dovbnya@inbox.ru

ГУЛЬЕЛЬМИ Анатолий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-88-05. E-mail: uglielmi@mail.ru

ПОТАПОВ Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126А. Тел.: +7 (3952) 51-16-73. E-mail: potapov@iszf.irk.ru

РАХМАТУЛИН Равиль Анатольевич – доктор физико-математических наук, зав. обсерваторией, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126А. Тел.: +7 (3952) 56-45-09. E-mail: rav@iszf.irk.ru

AN ADDITIONAL RESONATOR FOR ULTRALOW FREQUENCY WAVES

B.V. Dovbnya¹, A.V. Guglielmi, A.S. Potapov³, R.A. Rakhmatulin³

¹ *Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Borok, Yaroslavl region, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

Abstract. Using observations of ultralow frequency emissions at two mid-latitude stations we describe resonance structures similar to spectral bounds formed by ionospheric Alfvén resonator (IAR), but differing from them in frequency and spectrum evolution. Properties of the observed resonance signals and their distinctions from emissions typical for IAR were analyzed. We suggested that the detected emission was generated in the over-ionospheric Alfvén resonator (OAR) was made. Estimates of the OAR eigen frequencies made basing on similarity of this resonator to the magnetospheric Alfvén resonator were compared with measurements. An alternative explanation of detected resonance structure nature is discussed.

Keywords: magnetic observations, ultralow frequency emissions, ionospheric and magnetospheric Alfvén resonators.