

УДК 550.385.37+550.383

ЧАСТОТНАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОЛОС ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА И ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ

© 2015 г. Т.Н. Полюшкина¹, Б.В. Довбня², А.С. Потапов¹,
Б. Цэгмэд^{1,3}, Р.А. Рахматулин¹

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

² Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, пос. Борок Ярославской обл., Россия

³ Исследовательский центр астрономии и геофизики МАН, г. Улан-Батор, Монголия

Анализируются непрерывные магнитные наблюдения излучения ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) на среднеширотной обсерватории Монды, проводившиеся с помощью индукционного магнитометра LEMI-30 в период с марта 2010 г. по май 2011 г. Результаты сопоставляются с данными одновременных зондирований ионосферы. Исследована морфология излучения ИАР, проанализированы его связи с другими явлениями и ионосферными параметрами. Большой объем наблюдательного материала позволил проследить суточные и сезонные вариации этих связей, недостаточно исследованные ранее. Выявлен основной фактор, влияющий на продолжительность излучения – длительность затенения нижней ионосферы. Демонстрируется тесная корреляция суточных и сезонных вариаций частоты излучения ИАР с изменениями критической частоты f_0F_2 ионосферы. Предпринята попытка моделирования суточных вариаций частоты ИАР путем вычисления ожидаемых частот излучения с помощью международной модели ионосферы IRI-2012. Результаты показывают хорошее согласие с измерениями, но содержат случайные и систематические погрешности; обсуждаются источники этих погрешностей.

Ключевые слова: ионосферный альвеновский резонатор, критическая частота f_0F_2 ионосферы, морфологические характеристики, модель IRI-2012.

Введение

Неоднородная структура магнитосферно-ионосферной системы создает условия для захвата как частиц, так и волн. Классическим примером захваченных частиц являются радиационные пояса. Примеры волн, захваченных в резонаторы и волноводы, гораздо разнообразнее. Из недавних работ можно отметить следующие: ионно-циклотронные волны в магнитосферных резонаторах [Klimushkin, Mager, Marilovtseva, 2010; Гульельми, Потапов, 2012], стоячие альвеновские волны в дипольном поле [Leonovich, Kozlov, Cao, 2008], быстрые магнитозвуковые волны, распространяющиеся в волноводе геомагнитного хвоста [Dmitrienko, 2013] и захваченные в резонаторе ближней части хвоста [Mazur, Leonovich, 2006], стоячие медленные магнитозвуковые волны в магнитосфере и ионосфере [Leonovich, Kozlov, Edemskiy, 2010]. В ионосфере давно известен волновод быстрых магнитозвуковых волн в слое F_2 [Tepley, Landshoff, 1966]. Намного позже там была обнаружена еще одна резонансная структура – ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) [Беляев и др., 1987; Belyaev et al., 1990], а еще позднее высказано предположение о существовании надионосферного альвеновского резонатора (НИАР) [Довбня и др., 2013а,б].

ИАР является интересным объектом исследований. Его многополосное электромагнитное излучение в частотном диапазоне от десятых долей герца до десяти герц впервые было зарегистрировано в середине 80-х годов прошлого столетия [Беляев и

др., 1987]. Считается, что дискретные спектральные полосы (ДСП), типичный пример которых показан на рис. 1, формируются альвеновскими волнами, захваченными между нижней частью ионосферы и перегибом плотности плазмы в области перехода от ионосферы к магнитосфере на высоте около 3000 км [Поляков, Рапопорт, 1981; Беляев и др., 1989].

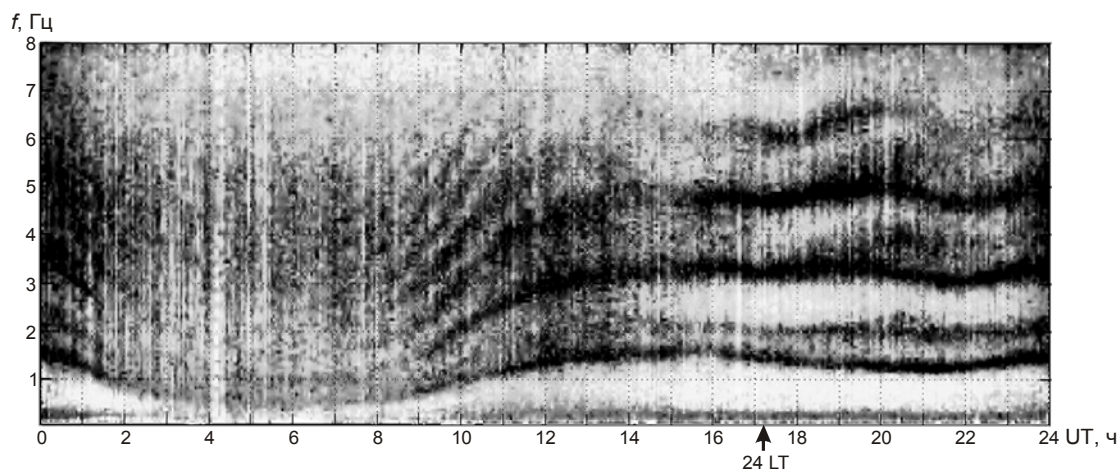


Рис. 1. Обсерватория Монды, 11.12.2010 г. Суточная спектрограмма, построенная по данным измерений X -компоненты магнитного поля с помощью индукционного магнитометра LEMI-30. Стрелкой отмечена полночь по местному времени

В качестве механизма возбуждения волн рассматривались грозовые разряды [Беляев и др., 1989; Shalimov, Böisinger, 2008], альвеновские волны, падающие сверху на ионосферу [Chaston et al., 2002; Lysak, Yoshikawa, 2006; Streltsov, Karlsson, 2008], плазменные неустойчивости [Lysak, 1991; Pokhotelov et al., 2001]. В любом случае частота спектральных полос и зазор между ними определяются геометрией резонатора и альвеновской скоростью в его полости. Изменение частоты полос в течение суток с минимумом около полудня и максимумом в послеполуночные или ранние утренние часы объяснено суточной вариацией таких параметров ионосферы, как критическая частота слоя F_2 , профиль электронной плотности выше этого слоя, а также граничным условиям на стенках резонатора в нижней ионосфере и на границе с магнитосферой [Belyaev et al., 1999; Demekhov et al., 2000; Yahnin et al., 2003; Hebden et al., 2005; Parent, Mann, Rae, 2010].

В ряде работ исследовались морфологические особенности излучения ИАР. Так, было показано, что появление ДСП наиболее вероятно во время минимума солнечной активности [Беляев и др., 1997; Yahnin et al., 2003]. Максимум сезонного хода появляемости ДСП падает на зимние месяцы [Yahnin et al., 2003]. Наиболее благоприятные условия наблюдения соответствуют низкой геомагнитной активности. ДСП можно видеть как в средних, так и в высоких и низких широтах [Belyaev et al., 1999; Böisinger et al., 2002]. На режим излучения ИАР влияют различные импульсные процессы – суббури, всплески иррегулярных пульсаций, сейсмические процессы [Guglielmi et al., 2006; Потапов, Довбня, Цэгмэд, 2008; Dovbnya, Potapov, Rakhmatulin, 2010; Довбня, Потапов, Рахматулин, 2012]. В последние годы исследователи обратили внимание на разного рода тонкие эффекты в поведении ДСП – их расщепление [Böisinger, Demekhov, Trakhtengerts, 2004; Бару, Колосков, Рахматулин, 2012], неэквидистантность спектра [Ermakova, Kotik, Polyakov, 2008] и даже наличие дополнительных резонансных структур, не связанных напрямую с ИАР [Довбня и др., 2013а,б].

Достаточно тесная связь режима и характеристик ДСП с состоянием ионосферы побуждает многих авторов изучать детали этой связи и выдвигать предложения об использовании наблюдений спектральной структуры электромагнитного фона в диапазоне 0.5–10 Гц для зондирования ионосферных параметров и уточнения ионосферных моделей [Yahnin *et al.*, 2003; Demekhov *et al.*, 2000; Parent, Mann, Rae, 2010]. Применяемые при этом обоснования сводятся в основном к тому, что главное влияние на частоту спектральных полос и расстояние между ними оказывает альвеновская скорость в максимуме ионосферного слоя F_2 . Эффективные размеры резонатора – расстояние между его нижней и верхней стенками (с учетом изменений альвеновской скорости на этом пути) – имеют меньшее значение [Hebden *et al.*, 2005; Parent, Mann, Rae, 2010]. Определенную роль, однако, играют граничные условия на стенках резонатора; в основном это касается проводимости ионосферы [Yahnin *et al.*, 2003; Hebden *et al.*, 2005].

В данной работе использовались данные непрерывных магнитных наблюдений, выполненных на среднеширотной обсерватории Монды в период с марта 2010 г. по май 2011 г. с использованием индукционного магнитометра LEMI-30. Низкий уровень помех на обсерватории, высокая чувствительность аппаратуры и близость периода наблюдений к минимуму солнечной активности позволили собрать представительную выборку случаев появления ярко выраженных ДСП, включающую 350 событий. В отдельные зимние дни продолжительность ДСП достигала 24 ч, т.е. излучение было круглосуточным. Для наиболее отчетливых событий привлекались данные одновременных ионосферных зондирований.

Аппаратура и метод анализа

Как уже было отмечено, для анализа ДСП ионосферного альвеновского резонатора были использованы данные непрерывных магнитных наблюдений на среднеширотной обсерватории Монды, расположенной на территории Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН. Исправленные геомагнитные координаты обсерватории составляют по широте 47° и по долготе 174° ; параметр МакИлвейна – $L=2.1$. На станции установлен индукционный магнитометр LEMI-30 с частотным диапазоном измеряемых сигналов 0.001–30 Гц. В диапазоне 1–30 Гц прибор имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику с коэффициентом преобразования 20 мВ/нТл. Уровень магнитных шумов на частоте 1 Гц не превышает 0.2 пТл/Гц^{1/2}, на частоте 10 Гц – 0.04 пТл/Гц^{1/2}. Аналого-цифровой преобразователь имеет 24 разряда; выбранная частота опроса – 64 Гц. Анализировались выходные сигналы двух горизонтальных датчиков, ориентированных в направлениях север–юг (далее X -составляющая поля) и восток–запад (Y -составляющая поля). Временная привязка осуществляется с помощью приемника GPS.

В связи с тем, что в Саянской солнечной обсерватории нет средств зондирования ионосферы, для мониторинга ионосферных условий использовались данные цифрового ионозонда (дигизонда) DPS-4, установленного в Иркутске на расстоянии около 260 км к востоку от обсерватории Монды. Разница по широте между обсерваторией Монды и расположенным севернее Иркутском не превышает 0.6° . В качестве основных ионосферных данных рассматривались полученные стандартными методами ряды 15-минутных значений критической частоты слоя F_2 (f_0F_2) и высоты максимума этого слоя (h_m); для всего анализируемого периода вычислялись также их медианные значения – среднечасовые и суточные. Помимо ионосферных параметров к анализу привлекались данные о геомагнитной активности в виде индекса A_p и местного K -индекса.

Цифровые записи в диапазоне 1–10 Гц обрабатывались с помощью компьютерной программы¹; вычислялись динамические спектры сигнала по двум компонентам и строились суточные спектрограммы в координатах “частота–время”. Использовалось окно Габора шириной 200 с при перекрытии 4096 точек. Графически интенсивность сигнала на данной частоте в данный момент времени отображалась цветом.

Построенные спектрограммы анализировались визуально. Сначала отбирались суточные диаграммы (события), на которых видны характерные для излучения ИАР дискретные спектральные полосы, и по ним фиксировалась длительность излучения за каждые сутки. Собранные таким образом данные использовались для анализа сезонного хода появляемости излучения и его связи с ионосферными и геомагнитными условиями. Затем для каждого из четырех сезонов отбиралось по несколько суточных спектрограмм (событий) с наибольшим числом четких спектральных полос и наибольшей длительностью излучения. Эти спектрограммы анализировались более детально: на экране компьютера с помощью курсора измерялся с часовым разрешением суточный ход частоты полос. Для разных событий удавалось измерить разное число гармоник (полос), но чаще всего их было три–четыре.

Полученные данные использовались для детального сопоставления с изменениями ионосферных параметров и вычисления коэффициентов корреляции и регрессии между вариациями частоты гармоник и критической частоты ионосферного слоя F_2 .

На заключительном этапе для обработанных таким образом событий с привлечением модели ионосферы IRI-2012 определялись ожидаемые значения частоты излучения путем вычисления времени пробега волны между стенками резонатора.

Результаты морфологического анализа

Характеристика обработанных событий. Особенности режима ДСП

Излучение ИАР имеет довольно слабую интенсивность, в связи с чем в обычных условиях его бывает трудно выделить на фоне помех и разного рода шумовых эмиссий в исследуемом диапазоне частот. Однако в нашем случае совокупность благоприятных условий измерения излучения – низкий уровень помех на обсерватории, высокая чувствительность аппаратуры, близость периода наблюдений к минимуму солнечной активности, низкий уровень магнитной активности – обусловили высокое качество экспериментальных материалов.

За 15 месяцев непрерывных наблюдений удалось получить большое количество качественных спектрограмм с отчетливыми ДСП излучения ИАР. Опыт их визуальной обработки показал, что для оцифровки частоты наиболее пригодны вторая и третья гармоники сигнала. Первая гармоника часто бывает зашумлена другими, более низкочастотными, излучениями, а более высокие гармоники не всегда отчетливы из-за естественного спада амплитуды сигнала ИАР.

К другим особенностям режима ДСП относится довольно частое их разветвление, особенно заметное для низких гармоник в вечерние и ранние утренние часы местного времени (см. рис. 1; LT=UT+6.7 ч). Ранее этот эффект был описан в [Bösinger, Demekhov, Trakhtengerts, 2004; Ермакова, Поляков, Семенова, 2011; Бару, Колосков, Рахматулин, 2012]. На приведённой в качестве примера суточной сейсмограмме можно проследить ещё одну особенность поведения ДСП – волнообразные изменения частоты полос в ночные часы по местному времени.

¹ Программа на языке MATLAB была разработана одним из авторов, сотрудником Института солнечной и земной физики СО РАН Б. Цэгмэдом специально для представляемого в статье исследования.

Общая характеристика периода наблюдений.

Сезонные вариации длительности наблюдения ДСП. Связь продолжительности ДСП с освещенностью ионосферы и её зависимость от магнитной и солнечной активности

Выбранный для анализа период наблюдений (март 2010 – май 2011 гг.) совпадает по времени с началом восходящей ветви 24-го солнечного цикла и характеризуется невысокой солнечной и магнитной активностью. Некоторые характеристики периода приведены на рис. 2.

Можно видеть, что магнитная активность (рис. 2, а) была несколько выше средней в весенние месяцы как 2010 г., так и 2011 гг. Число Вольфа (рис. 2, б) лишь в последние три месяца рассматриваемого периода превысило значение 30, оставаясь при этом менее 60, что говорит о низкой солнечной активности. На этом фоне средняя появляемость ДСП излучения ИАР составила почти 90 % (рис. 2, в), значительно превышая частоту наблюдения этих структур, отмечаемую в разные годы другими авторами (см., например, [Беляев и др., 1997; Bössinger et al., 2002; Yahnin et al., 2003; Molchanov et al., 2004]). При этом вероятность наблюдения ДСП не обнаруживает сезонной зависимости (см. рис. 2, в), в то время как средняя в течение суток длительность излучения $\tau_{сут}$ имеет ярко выраженный сезонный ход с максимумом в зимние месяцы и минимумом в летние (рис. 2, г).

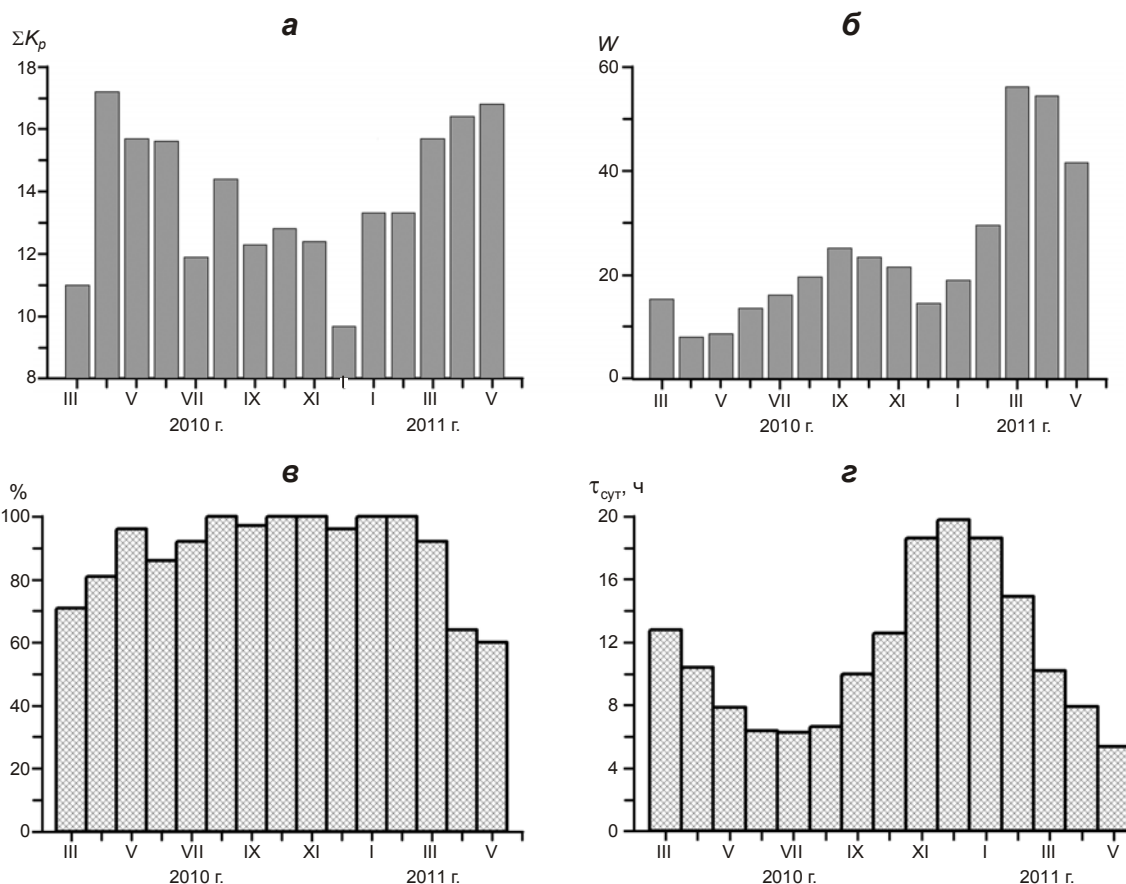


Рис. 2. Некоторые характеристики выбранного для анализа периода наблюдений: вариации среднемесячных значений ΣK_p – суммарного за сутки индекса геомагнитной активности K_p (а); вариации среднемесячного числа Вольфа W (б); средняя появляемость ДСП ионосферного альвеновского резонатора – доля дней появления ДСП от числа дней в месяце, % (в); вариации среднемесячных значений $\tau_{сут}$, ч (г)

Сезонные вариации продолжительности ДСП были проанализированы более детально. Изменение времени начала излучения в зависимости от сезона показано на рис. 3, *а* крестиками, его окончания – кружками. Верхняя штриховая линия отображает ход времени восхода Солнца внутри анализируемого периода на высоте ионосферного слоя *D* над обсерваторией, нижняя – ход времени заката на той же высоте.

Видно, что излучение ИАР – явление в основном ночное; ДСП наблюдаются по большей части во время затенения нижней ионосферы, хотя зачастую, особенно в зимние месяцы, начинаются и заканчиваются соответственно до заката и после восхода, захватывая по 5–6 ч светлого времени.

На рис. 3, *б* сезонные вариации среднемесячной длительности ДСП за сутки сопоставлены с продолжительностью затенения ионосферных слоев *D* ($H=70$ км), *E* ($H=110$ км),

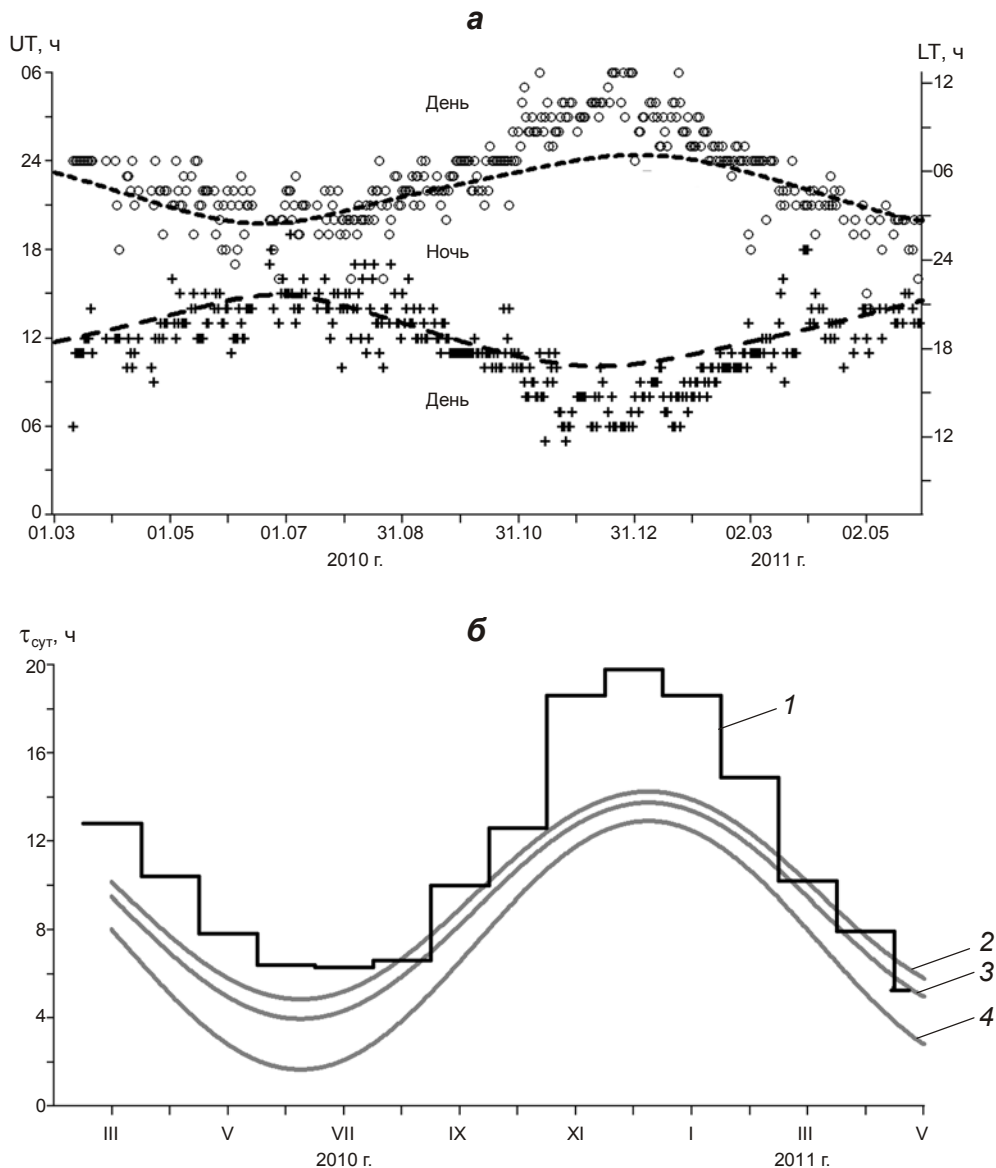


Рис. 3. Анализ сезонных вариаций продолжительности ДСП: изменение времени начала (крестики) и конца (кружки) излучения в зависимости от сезона (*а*); сопоставление сезонной вариации среднемесячной длительности ДСП с продолжительностью затенения ионосферных слоев над обсерваторией Монды (*б*): кривая 1 – среднемесячная длительность ДСП; 2–4 – длительность ночных условий в слоях *D* (2), *E* (3) и F_2 (4)

F_2 (H принято равным 200 км) над обсерваторией Монды. Сравнение вариаций показывает, что длительность ДСП оказывается ближе всего к длительности ночных условий в слое D . В весенние месяцы 2011 г. и осенние 2010 г. продолжительность ДСП в среднем совпадает с длительностью ночи на высоте этого слоя. Однако зимой и весной 2010 г. ИАР “работает” на несколько часов дольше.

Таким образом, приводимое на рис. 2, 3 дает основания считать длительность затенения ионосферы основным фактором, влияющим на продолжительность излучения ИАР. Это подтверждает и рис. 4, где показана зависимость длительности ДСП в течение суток ($\tau_{сут}$) от продолжительности ночных условий в слое D (Δt_n).

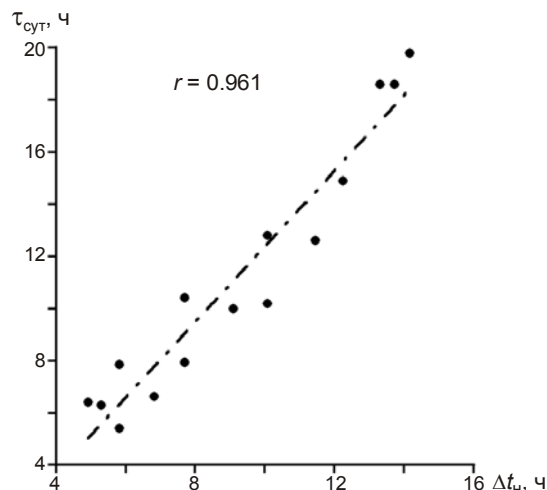


Рис. 4. Зависимость длительности ДСП от продолжительности ночных условий в ионосферном слое D .

Здесь и далее r – коэффициент корреляции

Ранее в литературе отмечались и другие факторы, влияющие на вероятность наблюдения излучения ИАР. Это, в первую очередь, магнитная и солнечная активность (см., например, [Беляев и др., 1997; Yahnin et al., 2003; Molchanov et al., 2004]). В нашем случае, как это следует из сравнения рис. 2, *а*, *б* с рис. 2, *в*, *г*, влияние этих факторов незаметно, что однако может быть результатом сильной сезонной вариации $\tau_{сут}$. Для проверки этого предположения было рассчитано среднеемесячное отклонение длительности ДСП за сутки от продолжительности ночи в слое D , сопоставленное со среднеемесячными характеристиками магнитной (рис. 5, *а*) и солнечной (рис. 5, *б*) активности.

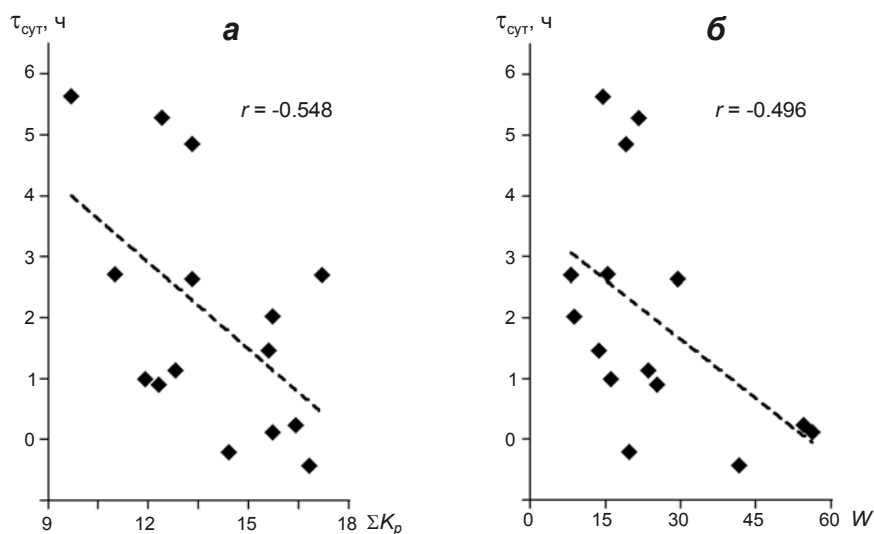


Рис. 5. Среднеемесячное отклонение длительности ДСП за сутки от продолжительности ночи в слое D в зависимости от среднеемесячных характеристик магнитной (*а*) и солнечной (*б*) активности

Обе зависимости оказались очень слабыми (коэффициент корреляции $r \approx -0.5$), хотя знак зависимости совпадает с ожидаемым – чем выше магнитная и солнечная активность, тем меньше длительность ДСП. При высокой активности отклонение длительности уходит в отрицательную область, т.е. продолжительность излучения становится меньше длительности ночи в слое D .

Сопоставление измеренных характеристик ДСП с ионосферными параметрами

Поскольку наблюдаемые ДСП образуются вследствие захвата низкочастотного излучения в ионосферном альвеновском резонаторе, являющемся ионосферной структурой, то поведение основных характеристик этих полос должно быть тесно коррелированным с вариациями ионосферных параметров, в первую очередь, с изменением концентрации электронов (N_e). В свою очередь, концентрация электронов в слое F_2 однозначно связана с критической частотой f_0F_2 , измеряемой ионозондами:

$$f_0F_2 = 8.98 \cdot 10^{-3} \sqrt{N_e}, \quad (1)$$

где N_e – концентрация электронов, см^{-3} ; f_0F_2 – критическая частота, МГц. Не вдаваясь пока в детали ожидаемого механизма связи характеристик ДСП с ионосферными параметрами, сравним их поведение в зависимости от местного времени и сезона.

Сопоставление суточных и сезонных вариаций частоты ДСП с вариациями f_0F_2 . Определение параметров корреляционной связи и коэффициентов регрессии для разных сезонов

То, как происходят одновременные изменения критической частоты f_0F_2 основного ионосферного слоя (скользящее среднее по 13 пятнадцатиминутным значениям) и частоты излучения ИАР (часовые значения) в разные сезоны, демонстрирует рис. 6. Для каждого из четырёх сезонов отобраны наиболее яркие события, для которых удалось проследить ход частоты хотя бы одной из спектральных полос излучения. Четкая картина ДСП во время декабрьских событий (рис. 6, в) позволила показать вариации частоты трех гармоник излучения ИАР (второй, третьей и четвертой) для зимнего сезона. Видно, что частота каждой из спектральных полос в целом меняется в противофазе с изменениями критической частоты, хотя мелкие детали вариаций могут не совпадать. Наиболее плавные вариации той и другой частоты наблюдались весной 2011 г. (рис. 6, г). Соответственно, для этого сезона связь между критической частотой ионосферы и частотой спектральных линий самая тесная, что можно видеть на рис. 7, где приведены результаты кросскорреляционного и регрессионного анализа вариаций названных частот. Линии регрессии для разных сезонов схожи, тангенс наклона к оси частоты ДСП меняется от 0.35 до 0.5, находясь в пределах ошибки измерений.

Далее сравнивалось поведение частотной структуры излучения ИАР и критической частоты ионосферы в течение всего интервала наблюдений. Для этого вычислялась обратная величина $1/f_0F_2$ для 15 месячных медианных значений критической частоты и средний зазор $\Delta f^{\text{ИАР}}$ между гармониками по соответствующим медианным месячным значениям частоты второй, третьей и четвертой гармоник ДСП. Результат сравнения показан на рис. 8. Видно, что общий ход усредненных месячных характеристик ионосферы и излучения ИАР неплохо совпадает, хотя при переходе от летних к осенним месяцам 2010 г. имеется расхождение.

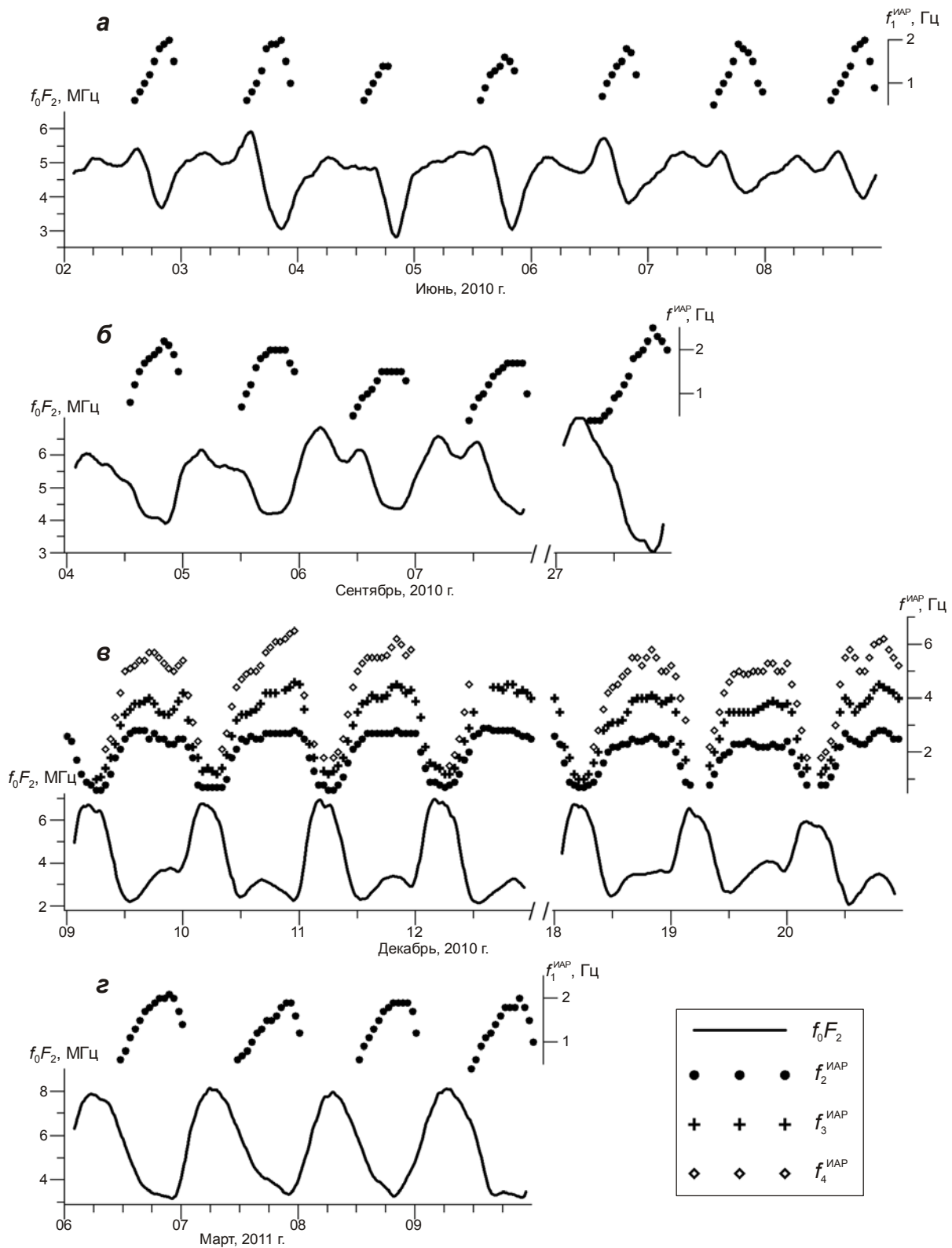


Рис. 6. Одновременные изменения критической частоты f_0F_2 основного ионосферного слоя F_2 (скользящее среднее по 13 пятнадцатиминутным значениям) и частоты излучения ИАР (часовые значения) в разные сезоны: *а* – лето; *б* – осень; *в* – зима; *г* – весна

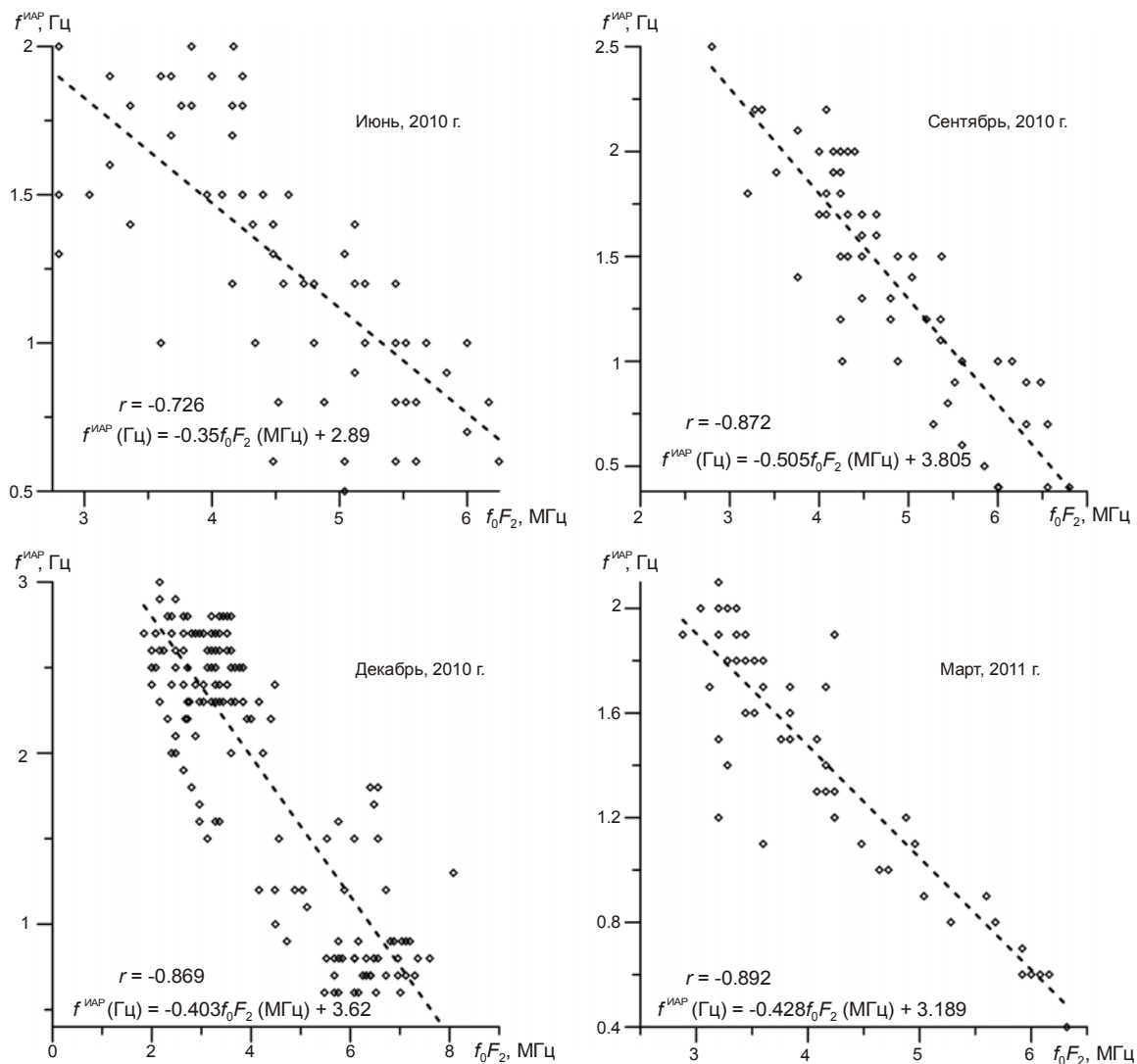


Рис. 7. Результаты кросскорреляционного и регрессионного анализа одновременных вариаций критической частоты f_0F_2 и частоты излучения ИАР. Ромбики – результаты измерений f^{IAP} в зависимости от f_0F_2 . Линейная регрессия показана штриховыми линиями; уравнения регрессии приведены в нижней части каждого рисунка вместе с коэффициентами корреляции r

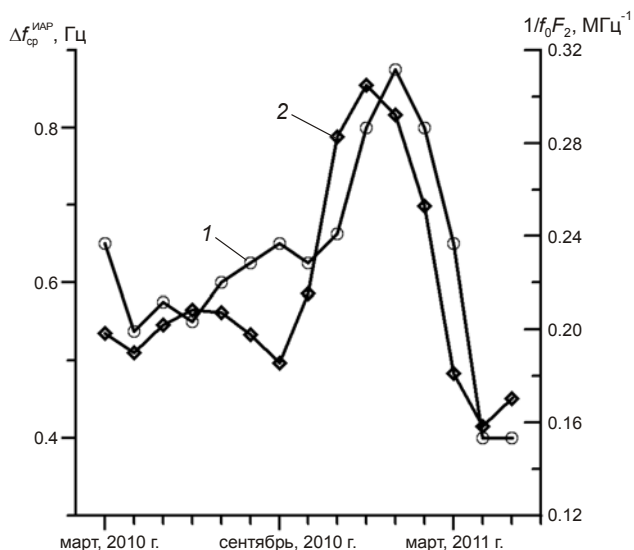


Рис. 8. Сравнение поведения в течение всего интервала наблюдений частотной структуры излучения ИАР (график 1, левая шкала) и обратной величины от критической частоты ионосферы f_0F_2 (график 2, правая шкала)

Сравнение результатов измерений с моделью генерации ДСП
в ионосферном альвеновском резонаторе

В ряде публикаций (см., например, [Поляков и Рапопорт, 1981; Беляев и др., 1989; Lysak, 1991; Demekhov et al., 2000]) предлагаются разные модели ионосферного альвеновского резонатора. Все они основаны на рассмотрении резонансных условий отражения альвеновских волн от нижней и верхней ионосферы и анализе их захвата в резонаторе, который формируется вдоль магнитных силовых линий между локальными максимумами альвеновской скорости (“стенками” резонатора) в слое F_2 и на высоте 2–4 тыс. км. Отвлекаясь от тонких эффектов, не имеющих в нашем случае принципиального значения, можно описать механизм формирования альвеновских резонансов следующей простой моделью.

Предположим низкую проводимость поперек магнитного поля и на нижней, и на верхней стенках резонатора. Тогда на обеих стенках будет иметься пучность электрического поля волны [Hebden et al., 2005]¹. В этом случае в резонатор станут захватываться волны с частотами f_n , удовлетворяющими условию $f_n = n/2T_0$, где $n=1, 2, 3, \dots$;

$$T_0 = \frac{1}{2} \int_{l_{\text{ниж}}}^{l_{\text{верх}}} \frac{dl}{A(l)}. \quad (2)$$

В выражении (2) $l_{\text{ниж}}$ и $l_{\text{верх}}$ – положение нижней и верхней стенок резонатора, соответственно; $A(l)$ – альвеновская скорость, которая определяется как

$$A(l) = \frac{B(l)}{\sqrt{4\pi m_{\text{эфф}}(l) N_e(l)}}. \quad (3)$$

В выражении (3) напряженность магнитного поля B , концентрация электронов N_e и эффективная масса ионов $m_{\text{эфф}}$ меняются вдоль оси резонатора. Эффективная масса ионов на каждом высотном уровне определяется суммированием масс ионов с весом, соответствующим их относительной концентрации на данной высоте. В реальности, однако, проводимость на стенках резонатора произвольна. На верхней границе она близка к нулевой, и поэтому мы имеем там пучность стоячей волны. На нижней же границе ситуация в общем случае промежуточна. Такое отклонение от идеального случая описывается введением в выражение для частоты n -й гармоники f_n дополнительного фазового фактора Φ [Поляков, Рапопорт, 1981]: $f_n = (n+\Phi)/(2T_0)$. Значение Φ зависит от величины и типа проводимости ионосферы [Lysak, 1991] и может лежать в пределах от 0 до 1. Фактор Φ характеризует долю полуволны, которую необходимо добавить к целому числу стоячих полуволн для формирования объемного резонанса. Если коэффициент отражения от стенок резонатора не зависит от частоты, то Φ не входит в выражение для разности частот Δf соседних гармоник (так называемый “частотный масштаб”):

$$\Delta f = \frac{1}{2T_0}. \quad (4)$$

Для сравнения теоретически ожидаемой частотной структуры излучения ИАР с измеряемой при наблюдениях мы вычислили значения времени пробега T_0 для отдельных часов ряда событий, используя формулу (2) и отобрав по одному событию для каждого месяца наблюдений. Во всех расчетах в качестве нижней границы резонатора ($l_{\text{ниж}}$) принималась высота 100 км. Высотный профиль магнитного поля $B(l)$ на всем протяжении рассчитывался по модели DGRF/IGRF². В качестве верхней границы резонатора ($l_{\text{верх}}$) бралась высота максимума альвеновской скорости выше слоя F_2 .

¹ Ситуация будет аналогична, если на обеих стенках значение проводимости одинаково.

² http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html

Высотный профиль альвеновской скорости $A(l)$ до высоты $l^*=2000$ км вычислялся на основе модели IRI-2012¹ по рассчитываемым в её рамках профилям концентрации электронов $N_e(l)$, эффективной массы $m_{эфф}(l)$ и величины магнитного поля $B(l)$; выше предельной для модели IRI-2012 высоты $l^*=2000$ км – на основе интерполяционной формулы, аналогичной используемой в работе [Lysak, 2004]. При этом для высот $l \geq l^*$

$$N_i(l) = N_{O^+} e^{-(l-l^*)/h_1} + N_{He^+} e^{-(l-l^*)/h_2} + N_{N^+} e^{-(l-l^*)/h_3} + N_{H^+} \left(\frac{l^* + R_E}{l + R_E} \right)^p;$$

$$N_e(l) = N_i(l);$$

$$m_{эфф}(l) = \frac{1}{N_e(l)} \left[16N_{O^+} e^{-(l-l^*)/h_1} + 4N_{He^+} e^{-(l-l^*)/h_2} + 14N_{N^+} e^{-(l-l^*)/h_3} + N_{H^+} \left(\frac{l^* + R_E}{l + R_E} \right)^p \right];$$

$$A(l) = 21.8B(l) / \sqrt{N_e(l)m_{эфф}(l)}.$$

Здесь N_{O^+} , N_{He^+} , N_{N^+} , N_{H^+} – концентрация в см⁻³ ионов кислорода, гелия, азота и водорода на высоте $l^* = 2000$ км (по данным IRI-2012); значения h_1 , h_2 и h_3 подбирались так, чтобы профиль скорости $A(l)$ ниже l^* “сшивался” без перелома с профилем выше l^* ; показатель степени p фиксирован на значении $p=1$; R_E – радиус Земли (6371 км); $m_{эфф}$ измеряется в единицах а.е.м.; $A(l)$ – альвеновская скорость, км/с.

По поводу выбора нижней границы для расчетов заметим, что модель IRI-2012 позволяет рассчитывать ионосферные параметры, начиная с высоты 80 км. Как было показано выше, наличие или отсутствие ДСП зависит от затенения или освещения нижней части ионосферы. Однако на частоту ДСП условия в нижней области ионосферы практически не влияют. Так, по нашим оценкам, время пробега волны между высотами 80 и 100 км составляет обычно не более одной тысячной от общего времени пробега вне зависимости от местного времени (но, конечно, лишь для тех часов, когда излучение ИАР наблюдается). Это обусловлено высоким значением альвеновской скорости на высоте слоя D . Поэтому для расчетов частоты излучения в качестве нижней стенки резонатора вполне можно брать высоту 100 км.

На рис. 9 показаны высотные профили N_e , $m_{эфф}$, B и A для одного из расчетов (13:00 UT 15 января 2011 г.). Время $2T_0$ для этого случая оказалось равным 0.57 с, что по формуле соответствует частотному масштабу $\Delta f = 1.75$ Гц. Это на 0.25 Гц больше среднего зазора между гармониками, измеренного на спектрограмме. Всего для 13 отобранных суток наблюдений было выполнено 99 расчетов частотного масштаба $\Delta f_{расч}$; результаты расчетов были сопоставлены с измеренными значениями $\Delta f_{изм}$ (рис. 10). Можно видеть, что корреляция между вычисленными и измеренными значениями довольно высока (коэффициент корреляции $r=0.9$), но линия регрессии не проходит через ноль, хотя ее наклон составляет почти 45°. Среднеквадратичное отклонение $\Delta f_{изм}$ составляет 0.33 Гц, а $\Delta f_{расч}$ – 0.38 Гц. В среднем значение вычисленного частотного масштаба $\Delta f_{расч}$ превышает измеренное значение $\Delta f_{изм}$ на 0.35 Гц. Это означает, что имеется некая систематическая ошибка в определении $\Delta f_{расч}$. В следующем разделе мы обсудим возможную природу такой ошибки.

Сравним теперь показанные на рис. 11 сезонные вариации измеренных ($\Delta f_{изм}$, a) и вычисленных ($\Delta f_{расч}$, b) частотных масштабов излучения ИАР для различных часов местного времени.

¹ http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html

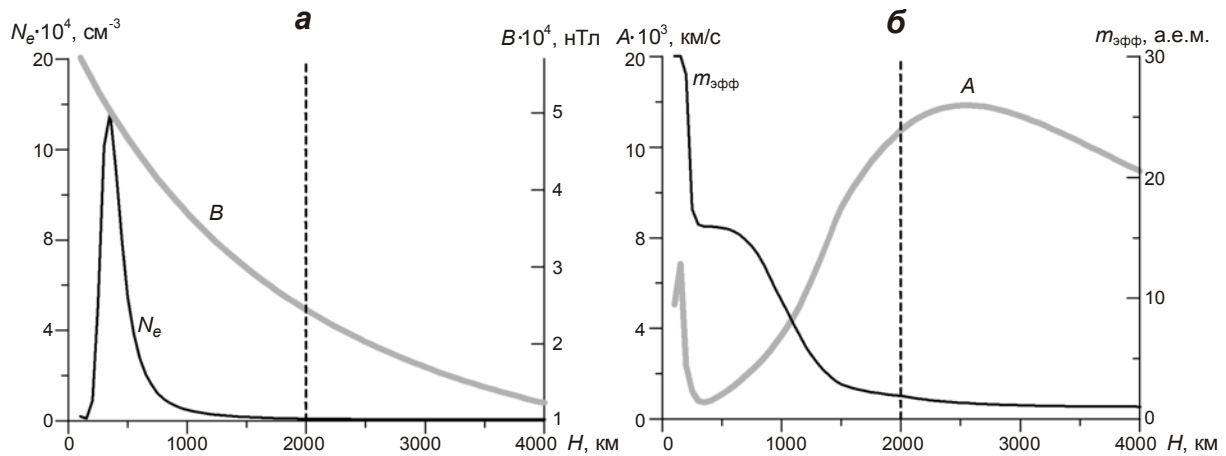


Рис. 9. Высотные профили концентрации электронов N_e и напряженности магнитного поля B (а); эффективной массы ионов $m_{эфф}$, и альвеновской скорости A (б) для одного из расчетов (13:00 UT 15 января 2011 г.) по описанной в тексте модели (2)–(5)

Рис. 10. Вычисленные значения частотного масштаба ДСП $\Delta f_{расч}$ (вертикальная ось) в зависимости от соответствующих измеренных величин $\Delta f_{изм}$ (горизонтальная ось). Штриховая линия – линейная регрессия; штрихпунктирная соответствует ожидаемой ситуации, когда $\Delta f_{расч} = \Delta f_{изм}$

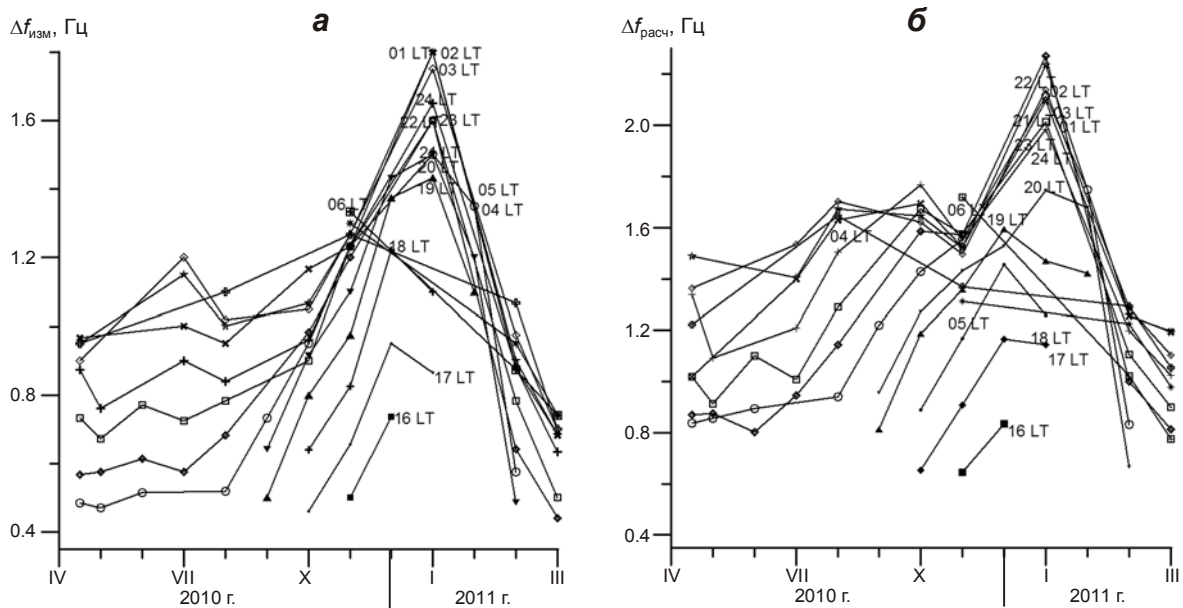
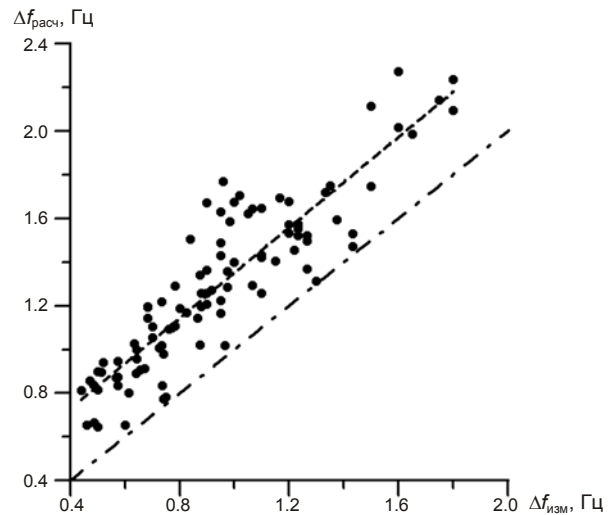


Рис. 11. Сезонные вариации $\Delta f_{изм}$ (а) и $\Delta f_{расч}$ (б) для различных часов местного времени

Как следует из графиков, приводимых на рис. 11, и измеренные, и вычисленные величины частотного промежутка Δf между полосами ДСП достигают максимальных значений в ночные часы зимних месяцев. Дополнительный пик $\Delta f_{\text{изм}}$ отмечен в весенние месяцы; пик $\Delta f_{\text{расч}}$ сильнее размыт и сдвинут на весенне-летний период.

На рис. 12, а в явном виде показаны суточные вариации измеренной (кривая 1) и вычисленной (кривая 2) разности частот гармоник Δf . Приведены часовые значения, усредненные за весь период наблюдений. Вертикальные отрезки показывают среднеквадратичное отклонение. Основной максимум обеих частот приходится на ночные часы (01:00–03:00 LT); в вечерние часы (19:00–20:00 LT) наблюдается дополнительный пик.

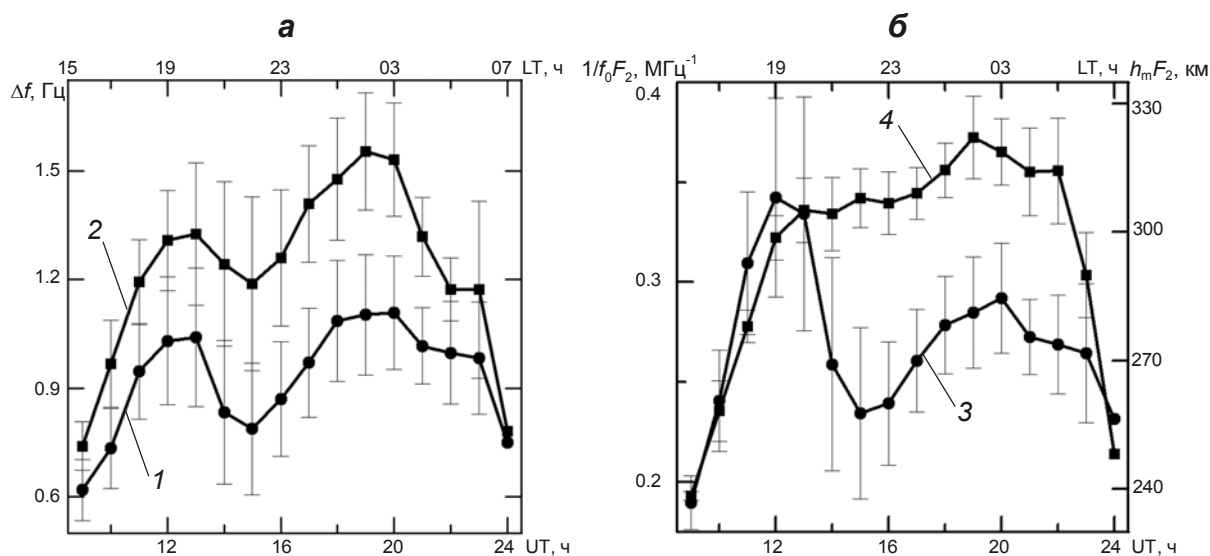


Рис. 12. Суточные вариации измеренной и вычисленной разности частот гармоник Δf (а) и ионосферных параметров – обратной величины от критической частоты f_0F_2 и высоты максимума h_mF_2 слоя F_2 (б)

На рис. 12, б приведены вычисленные для того же временного интервала суточные вариации ионосферных параметров – обратной величины от критической частоты f_0F_2 (кривая 3) и высоты максимума h_mF_2 (кривая 4). Можно видеть, что пики $1/f_0F_2$ совпадают по времени с максимумами Δf . Однако соотношение высоты пиков обратное – основной максимум величины $1/f_0F_2$ приходится на вечерние часы местного времени.

Обсуждение

Результаты проведенного авторами исследования подтвердили главные выводы предшественников [Беляев и др., 1997; Böisinger et al., 2002; Yahnin et al., 2003; Molchanov et al., 2004] относительно морфологии излучения ИАР и его связей с другими явлениями и ионосферными параметрами. Большой объем экспериментального материала позволил проследить недостаточно исследованные ранее суточные и сезонные вариации этих связей. Выявлен основной фактор, влияющий на продолжительность излучения, – длительность затенения нижней ионосферы. Можно предположить, что этот фактор обусловлен в основном суточной вариацией степени поглощения энергии волн в нижней ионосфере. Механизм может быть аналогичен механизму поглощения радиоволн в слое D при облучении его рентгеновским излучением от солнечных вспышек и связан с большой частотой соударений электронов с нейтралами. Но в нашем случае при намного более низкой по сравнению с радиоволнами частоте альвеновских волн

поглощение возрастает при меньших электронных концентрациях в слое, обеспечиваемых излучением даже спокойного Солнца. Высказанное предположение требует, однако, дополнительного обоснования.

Но основная новизна работы заключается в попытке моделирования процесса формирования спектра излучения ИАР с привлечением международной модели ионосферы IRI-2012. Результаты выполненного моделирования показали возможность получения на основе этой модели численных оценок частоты излучения ИАР (по крайней мере, разности частот между соседними гармониками). Однако полученные оценки содержат систематическую ошибку, как это явно видно из результатов, представленных на рис. 10–12, *a*. Так, рис. 10 показывает, что, несмотря на высокую корреляцию ($r=0.90$) между часовыми значениями измеренного и вычисленного частотного масштаба Δf , среднее значение вычисленных величин превышает среднее значение измеренных примерно на 37%. Получается, что вычисленные Δf сдвинуты относительно измеренных в среднем на 0.35 Гц по всему наблюдаемому спектру. То же самое демонстрирует и сравнение рис. 11, *a* и 11, *b*, из которого следует, что указанный сдвиг сохраняется для всего года; примерно такой же сдвиг характерен и для всех часов местного времени, что подтверждает рис. 12.

В чем причины этой систематической ошибки? Случайный разброс точек на рисунках имеет различные источники. Один из них – ошибки измерений, связанные с размытостью линий ДСП на спектрограммах и с отмеченными выше искажениями полос, вызванными неоднородностью ионосферного профиля [Ермакова, Поляков, Семенова, 2011] или взаимодействием излучения ИАР с резонансами магнитных оболочек [Böisinger, Demekhov, Trakhtengerts, 2004]. Другим источником погрешностей является несовпадение места приема электромагнитного ультранизкочастотного излучения ИАР с пунктом радиозондирования ионосферы, что может сказываться в случае перемещающихся ионосферных возмущений и других горизонтальных неоднородностей. Однако имеется более существенное основание для отличия вычисленных значений частотного зазора между гармониками от измеренных, которое и приводит к их систематическому расхождению. Дело в том, что в нашей модели в качестве продольного размера резонатора была принята длина L вдоль вертикали, поскольку модель ионосферы IRI-2012 дает значения плазменных параметров именно вдоль вертикального профиля. Но на самом деле в резонансной полости захватываются альвеновские волны, распространяющиеся вдоль силовой линии геомагнитного поля. Размер резонатора при этом равен $L_1 > L$, поскольку силовая линия наклонена по отношению к вертикали. Над обсерваторией Монды в интервале высот 100–3000 км среднее магнитное наклонение составляет 68.8° , что дает $L_1 \approx 1.073L$; в таком же соотношении должен измениться (уменьшиться, см. соотношения (2) и (4)) частотный масштаб резонатора Δf , если мы будем вычислять частоту резонатора, вытянутого вдоль силовой линии, а не вдоль вертикали. Но уменьшения $\Delta f_{\text{расч}}$ на 7.3% явно недостаточно для объяснения наблюдаемой систематической ошибки. Однако следует учесть и то, что сопряженная с обсерваторией силовая линия пройдет ниже вертикального профиля в той области ионосферы, где альвеновская скорость имеет меньшее значение, приводя к еще большему снижению вычисленных значений Δf . Кроме того, наибольшему сокращению в процентном отношении будут подвержены частоты в событиях с меньшими значениями Δf , поскольку для них волновая траектория вдоль резонансной полости длиннее, соответственно больше различие между условиями вертикального и наклонного профилей. Это должно привести к тому, что линия регрессии $\Delta f_{\text{расч}}$ ($\Delta f_{\text{изм}}$), изображенная пунктиром на рис. 10, опустится параллельно вниз до совпадения с прямой $\Delta f_{\text{расч}} = \Delta f_{\text{изм}}$, показанной там же штрихпунктирной линией.

Безусловно, это лишь качественные рассуждения. В настоящее время мы готовим программу расчета Δf для вытянутого вдоль силовой линии резонатора, что позволит проверить высказанные предположения.

В любом случае, полученные результаты, которые показывают тесную корреляцию между измеренным на спектрограмме частотным масштабом $\Delta f_{\text{изм}}$ и вычисленными с помощью модели IRI-2012 значениями $\Delta f_{\text{расч}}$, имеют большое значение, так как открывают возможность получения дополнительной информации об ионосфере, которая не содержится в ионограммах, получаемых с помощью ионозондов. Действительно, если вертикальное зондирование ионосферы радиоволнами дает сведения об электронной концентрации в максимуме слоя F_2 и его высоте, то ультранизкочастотная эмиссия ионосферного резонатора содержит информацию об усредненных параметрах ионосферной плазмы во всей толще ионосферы – от ее нижней границы до высоты 2–4 тыс. км. Конечно, извлечь такую информацию непросто, но задача эта заманчивая, поскольку на сегодняшний день наземное измерение плазменных параметров выше максимума слоя F_2 возможно лишь с использованием дорогостоящих радаров некогерентного рассеяния, которых на Земле чуть больше десятка.

Заключение

Авторами проанализировано около ста часовых интервалов записей с выхода индукционного магнитометра LEMI-30, которые содержат дискретные спектральные полосы (ДСП) излучения ионосферного альвеновского резонатора.

Исследованы морфологические особенности эмиссий, проанализированы их связи с другими явлениями. Результаты сопоставлены с данными одновременно проведенных зондирований ионосферы с помощью дигизонда DPS-4.

Показано, что продолжительность излучения в пределах суток наиболее тесно связана с длительностью затененности нижней ионосферы. Тем не менее, в зимнее время отмечены случаи непрерывного круглосуточного излучения.

Установлена тесная корреляция суточных и сезонных вариаций частоты излучения ИАР с изменениями критической частоты f_0F_2 ионосферы. Попытка моделирования частоты излучения путем расчета собственной частоты резонатора на основе международной модели ионосферы IRI-2012 дала положительные результаты при высоком значении коэффициента корреляции между вычисленной и измеренной частотами ($r=0.90$). Однако совокупность значений вычисленной разности частот смежных гармоник при сравнении их с измеренными величинами показала систематический сдвиг в среднем на 0.35 Гц. Предполагается, что это объясняется отличием значений ионосферных параметров вдоль используемого в модели IRI-2012 вертикального профиля от значений тех же параметров вдоль силовой линии геомагнитного поля.

В дальнейшем предполагается выполнить моделирование частоты излучения ИАР в модели наклонного профиля, совпадающего с направлением магнитной силовой линии, и сравнить результаты с измеренными частотами. Полученные при этом результаты планируется использовать для поиска методов оценки по данным магнитных измерений в диапазоне частот 0.1–10 Гц таких ионосферных параметров, как электронная концентрация, эффективная масса ионов, альвеновская скорость в интервале высот от 100 до нескольких тысяч километров.

Авторы благодарны разработчикам моделей IRI-2012 и DGRF/IGRF за предоставление открытого доступа к этим моделям в сети Интернет.

Работа частично была поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-05-00529, 13-05-00066 и 14-45-04088-Р_Сибирь_а).

Литература

- Бару Н.А., Колосков А.В., Рахматулин Р.А. Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альвеновского 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. 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 альвеновского резонатора по наблюдениям электромагнитного шумового фона в солнечном цикле 1985–1995 гг. // Радиофизика. 1997. Т. 40, № 10. С.1305–1319.
- Гульельми А.В., Потапов А.С. Влияние тяжелых ионов на спектр колебаний магнитосферы // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 4. С.283–291.
- Довбня Б.В., Потапов А.С., Рахматулин Р.А. Воздействие землетрясений на режим ультранизкочастотных электромагнитных эмиссий // Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 5. С.189–193.
- Довбня Б.В., Гульельми А.В., Потапов А.С., Клайн Б.И. О существовании надионосферного резонатора Альвена // Солнечно-земная физика. 2013а. Вып. 22. С.12–15.
- Довбня Б.В., Гульельми А.В., Потапов А.С., Рахматулин Р.А. Дополнительный резонатор для ультранизкочастотных волн // Геофизические исследования. 2013б. Т. 14, № 2. С.49–58.
- 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. 2011. P.147–150.
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэрономия. 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. Solar-Terr. Phys. 1990. V. 52(9). P.781–788.
- Belyaev P.P., Böisinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P.4305–4317. doi: 10.1029/1998JA900062.
- Böisinger 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(A10). 1281. doi: 10.1029/2001JA005076.
- Böisinger 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.
- Chaston C.C., Bonnell J.W., Carlson C.W., Berthomier M., Peticols L.M., Roth I., McFadden J.P., Ergun R.E., Strangeway R.J. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. 2002. V. 107(A11). P.1413. doi: 10.1029/2002JA009272.
- 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 Pc1 frequency range // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2000. V. 62. P.257–265. doi: 10.1016/S1364-6826(99)00119-4.
- Dmitrienko I.S. Evolution of FMS and Alfvén waves produced by the initial disturbance in the FMS waveguide // J. Plasma Phys. 2013. V. 79, issue 01. P.7–17. doi: 10.1017/S0022377812000608.
- Dovbnya B.V., Potapov A.S., Rakhmatulin R.A. Earthquake effects in the pulsations of geomagnetic field // Proceedings of the 8th Int. Conf. “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Russia, 20–24 Sept. 2010). 2010. С.403–407.

- 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.
- Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., Hayakawa M., Dovbnya B.* On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances // *Phys. Chem. Earth*. 2006. V. 31. P.469–472.
- 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.
- Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Marilovtseva O.S.* Parallel structure of Pc1 ULF oscillations in multi-ion magnetospheric plasma at finite ion gyrofrequency // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2010. V. 72, N 18. P.1327–1332. doi: 10.1016/j.jastp.2010.09.019.
- Leonovich A.S., Kozlov D.A., Cao J.B.* Standing Alfvén waves with $m \gg 1$ in a dipole magnetosphere with moving plasma and aurorae // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P.970–978.
- Leonovich A.S., Kozlov D.A., Edemskiy I.K.* Standing slow magnetosonic waves in a dipole-like plasmasphere // *Planet. Space Sci.* 2010. V. 58, Issue 11. P.1425–1433.
- Lysak R.L.* Feedback instability of the ionospheric resonator cavity // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, N A2. P.1553–1568.
- Lysak R.L.* Magnetosphere-ionosphere coupling by Alfvén waves at midlatitudes // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, A07201. doi: 10.1029/2004JA010454.
- Lysak R.L., Yoshikawa A.* Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere, in *Magnetospheric ULF Waves* // *Geophys. Monogr. Ser.* V. 169 / Ed. K. Takahashi et al. AGU, Washington, D. C., 2006. P.289–306.
- Mazur V.A., Leonovich A.S.* ULF hydromagnetic oscillations with the discrete spectrum as eigenmodels of MHD-resonator in the near-Earth part of the plasma sheet // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24, N 6. P.1639–1648.
- Molchanov O.A., Schekotov A.Yu., Fedorov E., Hayakawa M.* Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka // *Phys. Chem. Earth*. 2004. V. 29. P.649–655.
- Parent A., Mann I.R., Rae I.J.* Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator // *J. Geophys. Res.* 2010. V.115, A02312. doi: 10.1029/2009JA014673.
- Pokhotelov O.A., Khrushev V., Parrot M., Senchenkov S., Pavlenko V.P.* Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feedback instability // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P.813.
- Shalimov S., Bösinger T.* On distant excitation of the ionospheric Alfvén resonator by positive cloud to ground lightning discharges // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, A02303. doi: 10.1029/2007JA012614.
- Streltsov A.V., Karlsson T.* Small scale, localized electromagnetic waves observed by Cluster: Result of magnetosphere-ionosphere interactions // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L22107. doi: 10.1029/2008GL035956.
- Tepley L., Landshoff R.K.* Waveguide theory for ionospheric propagation of hydromagnetic emissions // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71(5). P.1499–1504. doi: 10.1029/JZ071i005p01499.
- 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 // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P.779–786.

Сведения об авторах

ПОЛЮШКИНА Татьяна Николаевна – старший специалист, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126А. Тел.: 8(3952) 51-16-73. E-mail: tnp@iszf.irk.ru

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, пос. Борок. Тел.: 8(48547) 24-763. E-mail: dovbnya@inbox.ru

ПОТАПОВ Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126А. Тел.: 8(3952) 51-16-73. E-mail: potapov@iszf.irk.ru

ЦЭГМЭД Баттуулай – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126А; ведущий научный сотрудник, Исследовательский центр астрономии и геофизики МАН. Монголия, г. Улан-Батор, п/я 152. Тел.: 8(3952) 51-16-73. E-mail: tseg@iszf.irk.ru

РАХМАТУЛИН Равиль Анатольевич – доктор физико-математических наук, заведующий обсерваторией, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126А. Тел.: 8(3952) 56-45-09. E-mail: rav@iszf.irk.ru

FREQUENCY STRUCTURE OF IAR SPECTRAL BANDS AND IONOSPHERE PARAMETERS

T.N. Polyushkina¹, B.V. Dovbnaya², A.S. Potapov¹, B. Tsegmed^{1,3}, R.A. Rakhmatulin¹

¹ *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

² *Borok Geophysical Observatory of Institute of Physics of the Earth RAS, Borok, Yaroslavl region, Russia*

³ *Research Center for Astronomy and Geophysics MAS, Ulaan-Baator, Mongolia*

Abstract. Continuous magnetic observations of IAR emission at the mid-latitude Mondy observatory performed by a search-coil magnetometer LEMI-30 within the period from March 2010 to May 2011 have been analyzed and compared with the results of simultaneous ionosphere sounding. We have studied the morphology of IAR emission and analyzed its relationships with other phenomena and ionospheric parameters. A large amount of observational data allowed us to follow daily and seasonal variations of this relationship which had not been sufficiently studied before. The main factor affecting the duration of the emission is the length of the shading of the lower ionosphere. We have demonstrated a good correlation of diurnal and seasonal IAR frequency variations with the changes in critical frequency f_0F_2 of the ionosphere. An attempt has been made to simulate diurnal variation of IAR frequency by calculating expected frequency scales of emission using the IRI-2012 model. The results show good agreement with the measurements, but contain systematic and random errors. We discuss the sources thereof.

Keywords: ionospheric Alfvén resonator, ionosphere critical frequency f_0F_2 , morphological characteristics, IRI-2012 model.