

Н. А. Бару, А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

ЭФФЕКТ РАСЩЕПЛЕНИЯ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА

Анализируются данные непрерывных наблюдений ионосферного альвеновского резонанса, выполненных с 2010 по 2013 гг. на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» и на Саянской солнечной обсерватории (п. Монды, Россия). Изучено поведение тонкой спектральной структуры резонансов и обнаружен ранее неизвестный эффект расщепления нескольких низших резонансных мод. Исследованы суточные и сезонные закономерности «наблюдаемости» данного эффекта, а также его зависимость от фазы 11-летнего цикла солнечной активности. Проанализированы морфологические особенности поведения частоты расщепления и определены его основные фазы: развитие, стационарный участок и релаксация. Предложены возможные механизмы возникновения эффекта расщепления.

Ключевые слова: ионосферный альвеновский резонатор, эффект расщепления, магнитогидродинамические волны, магнитное поле.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из волноведущих природных структур, формирующих электромагнитный климат геокосмоса в УНЧ-СНЧ-диапазоне, является ионосферный альвеновский резонатор (ИАР). Ионосферный альвеновский резонатор — это резонансная система для альвеновской моды магнитогидродинамических (МГД) волн, локализованная в F-области ионосферы. На нижней границе резонатора (высоты E-области) МГД-волны трансформируются в электромагнитные, которые формируют резонансные структуры спектра (РСС), детектируемые наземными магнитометрами [3, 8]. В последнее время в литературе также появились свидетельства приема МГД-составляющих ИАР “in situ” с борта космического аппарата [6]. Данные наблюдений [1, 3, 5, 7, 8] показывают, что характеристики резонансов испытывают значительные сезонные и

суточные вариации, основные закономерности которых состоят в следующем: 1) РСС фиксируется в основном в ночной период; 2) наибольшая вероятность регистрации приходится на локальную зиму, тогда как локальным летом происходит ее резкий спад; 3) устойчивые резонансы чаще наблюдаются в магнитоспокойных условиях. Поведение ИАР определяется как свойствами его основного источника — мировой грозовой активности, — так и изменениями в околоземной плазме. Это позволяет использовать ИАР для изучения грозовых разрядов и ионосферной диагностики [2]. Кроме того, характеристики резонанса изменяются вследствие регулярных и спорадических гелио- и геофизических факторов: мощных возмущений магнитного поля (бури и суббури), высыпаний высокоэнергичных частиц из радиационных поясов Земли, рентгеновских солнечных вспышек и затмений, суточных и сезонных вариаций освещенности на высотах ионообразования.

Таким образом, мониторинг ИАР может быть эффективным способом слежения за состоянием космической погоды. Поскольку резонансы носят глобальный характер, интерес представляют синхронные измерения, осуществляемые в пунктах с большим разнесением в пространстве. Радиоастрономический институт НАН Украины (РИ НАНУ) впервые инициировал многопозиционный непрерывный мониторинг ИАР на Украинской антарктической станций «Академик Вернадский» (УАС), в Арктике (о. Свалбард, Норвегия), Европе (низкочастотная обсерватория РИ НАНУ, Украина) и Азии (Восточные Саяны, Россия). В данной работе представлены результаты анализа данных многолетних синхронных наблюдений ИАР, проведенных в Антарктике и Азии. Ниже описан новый эффект расщепления низших резонансных мод ИАР, дальнейшее исследование которого может представлять специальный интерес для имеющихся и планируемых ионосферно-магнитосферных космических миссий.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА, МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В работе проанализированы данные непрерывных наблюдений сигналов ИАР, выполненных в 2010–2013 гг. на УАС (65°15' ю. ш., 64°16' з. д.) и магнитной станции Саянской солнечной обсерватории (ССО) ИСЗФ СО РАН (51°16' с. ш., 100°55' в. д.). Отметим, что несмотря на разницу географических координат, структура геомагнитного поля над обеими приемными позициями имеют сходную геометрию в силу близости значений параметра Мак-Илвейна, УАС — 2.6, ССО — 2.1. Регистрация сигналов ИАР осуществлялась с помощью индукционных магнитометров, изготовленных Львовским центром Института космических исследований НАНУ-ГКАУ, которые измеряли горизонтальные компоненты геомагнитного поля в направлениях географических меридиана (x) и параллели (y). На УАС функционирует магнитометр Lemi-112A (диапазон частот 0.001...80 Гц), на ССО — Lemi-30 (частоты 0.001...40 Гц). В РИ НАНУ был разработан пакет прикладных программ унифицированной спектральной, поляризационной и статистической обработки данных многопозиционных из-

мерений. В обоих пунктах для каждого 10-мин интервала рассчитывались средние энергетические $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ и взаимные $S_{xy}(f)$ спектры со спектральным разрешением 0.1 Гц. Эти данные использовались для вычисления частотных зависимостей поляризационных параметров сигналов ($r(f)$ — коэффициент эллиптичности, $\Psi(f)$ — позиционный угол эллипса поляризации, $I_p(f)$ — интенсивность поляризованной компоненты излучения, $P(f)$ — степень поляризации) по методике, изложенной в работе [4]. Далее оператором определялся факт наличия РСС (резонанс считался зарегистрированным, если можно выделить два или более спектральных максимума) и оценивались их собственные частоты. В качестве информационного параметра также рассчитывалась средняя разность частот ΔF между модами ИАР. Оценка ионосферной обстановки выполнялась с помощью станций вертикального зондирования — ионозонда IPS-42, расположенного на УАС, и DPS-4, размещенного в двухстах километрах от ССО в г. Иркутске. Как было показано в работе авторов [2], наиболее важным для ИАР ионосферным параметром являлось текущее локальное значение критической частоты f_0F_2 слоя F_2 .

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА

Наши измерения показали, что в большом количестве случаев низшие моды ИАР расщепляются на величину ΔF_{spl} (рис. 1). Наиболее контрастно

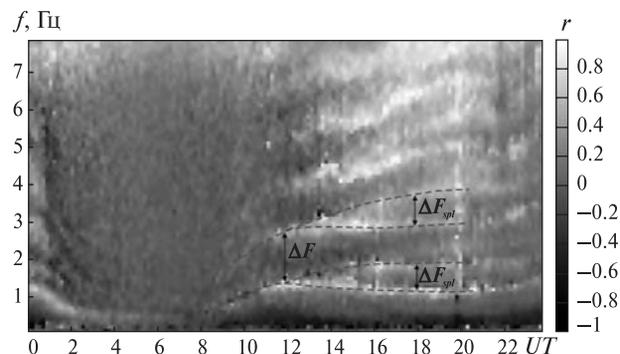


Рис. 1. Расщепление линий ионосферного альвеновского резонатора в коэффициенте эллиптичности r . Данные ССО для 10 декабря 2010 г.

эффект расщепления выделяется в частотно-временных зависимостях для коэффициента эллиптичности $r(f, t)$. В качестве примера на рис. 1 приведена суточная зависимость $r(f, t)$, построенная по данным ССО для 10 декабря 2010 г. Как видно из этой иллюстрации, начиная с 12 UT (19 LT — локального времени) моды ИАР расщепляются на два спутника, расстояние между которыми плавно растет до 0.8—1 Гц в 20 UT (3 LT). К 24 UT (7 LT) величина ΔF_{spl} уменьшается. Эффект четко прослеживается для трех первых мод ИАР, причем с увеличением номера резонансного мода ИАР момент возникновения расщепления незначительно сдвигается в ночные часы. Оба спутника и нерасщепленные участки линий ИАР имеют практически круговую поляризацию с направлением вращения против часовой стрелки (коэффициент эллиптичности близок к -1). Анализ данных показал, что другие поляризационные и спектральные характеристик ИАР на расщепленных участках суточной зависимости, также являются идентичными и не могут быть использованы для селекции спутников. Такое поведение является типичным для всех 104 событий расщепления, зарегистрированных на ССО и УАС за четыре года.

Результаты анализа суточных закономерностей в поведении расщепления на ССО и УАС представлены на рис. 2. Сезонный ход вероятности регистрации расщепления и зависимость от 11-летнего цикла солнечной активности продемонстрированы на рис. 3. Из рис. 2 видно, что расщепление в обоих пунктах регистрируется только локальной ночью. Время наблюдения для большинства событий соответствует интервалу максимальной вероятности регистрации ИАР, который на ССО длится с 18 до 6 LT, а на УАС с 18 до 9 LT. Разные длительности периода наблюдаемости связаны с большей продолжительностью ночи на УАС.

Рис. 3, а демонстрирует, что в обоих пунктах расщепление уверенно регистрируется только во время локальной зимы, а во все остальные сезоны года отсутствует. На рис. 3, б показано распределение числа случаев расщепления в обоих пунктах для четырех лет наблюдений совместно со средним за год числом Вольфа W , которое харак-

теризует солнечную активность в 11-летнем цикле. Отчетливо видно, что число зарегистрированных событий находится в обратной зависимости от солнечной активности. Выполненный анализ показывает, что суточные, сезонные и межгодовые зависимости «наблюдаемости» расщепления полностью соответствуют аналогичным кривым вероятности регистрации ИАР, однако для расщепления они выражены более четко.

Отметим, что вследствие сложности регистрации этого эффекта в освещенное время суток, когда отдельные моды ИАР практически сливаются, нельзя однозначно утверждать, что расщепление днем отсутствует. Отсутствие расщепления в другие сезоны года — весной, летом и осенью — является достоверным наблюдательным фактом, принципиальным для физической интерпретации такого поведения ИАР в глобальном масштабе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Ранее в работе [5] нами была подтверждена обратная зависимость $f_0 F_2$ и частотной разницы между соседними резонансными модами — ΔF , а также разработана методика оценки критической частоты слоя F_2 по измеряемой в эксперименте величине ΔF . В настоящей статье проанализировано, сохраняется ли эта закономерность для величины расщепления ΔF_{spl} и как ведет себя соотношение величин $\Delta F_{spl}/\Delta F$. С этой целью исследовано поведение усредненных зависимостей $\Delta F(t)$, $\Delta F_{spl}(t)$, $f_0 F_2(t)$ (рис. 4, а) и соотношение $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$ (рис. 4, б) для всех случаев, когда расщепление наблюдалось в течение 10 ч и более.

Как видно из рис. 4, а формы кривых для средней разности частот между модами ИАР $\Delta F(t)$ и величины расщепления $\Delta F_{spl}(t)$ различаются. $\Delta F_{spl}(t)$ характеризуется меньшим вечерним возрастанием, наличием практически стационарного ночного участка и значительным уменьшением в утренние часы. Рис. 4, б демонстрирует, что величина расщепления $\Delta F_{spl}(t)$, нормированная на межмодовый частотный сдвиг $\Delta F(t)$, состоит из трех характерных участков, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями. Это участок развития расщепления I (16...20 LT, когда относительная величина расщепления линей-

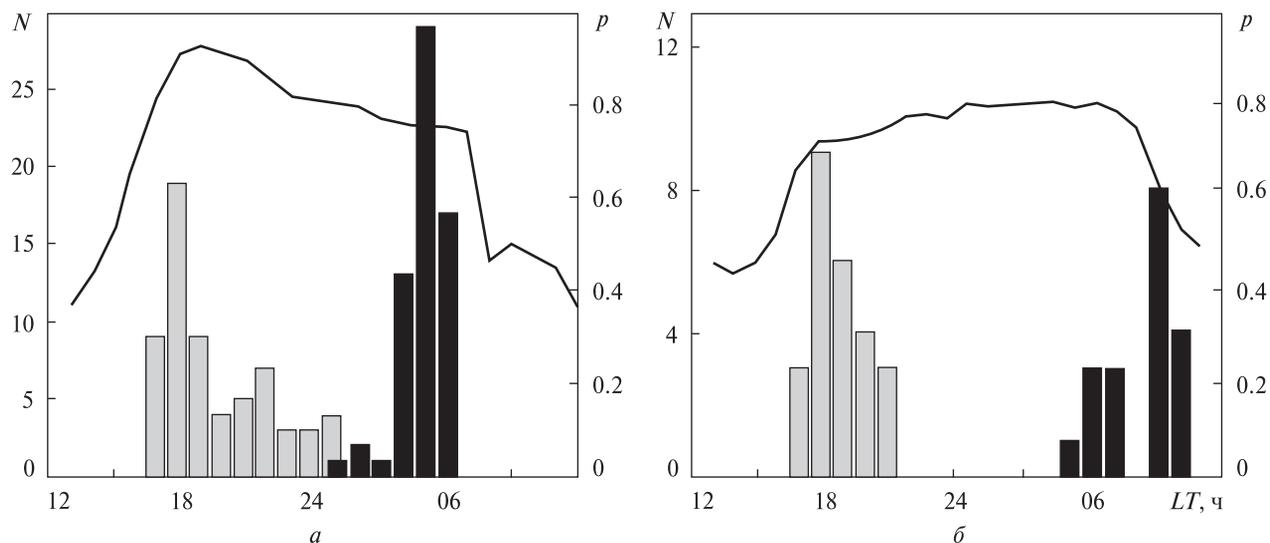


Рис. 2. Распределение числа N случаев появления (серые столбики) и исчезновения (черные столбики) расщепления (шкала слева) и кривая вероятности регистрации ионосферного альвеновского резонатора (шкала справа) в зависимости от местного времени на ССО (а) и УАС (б)

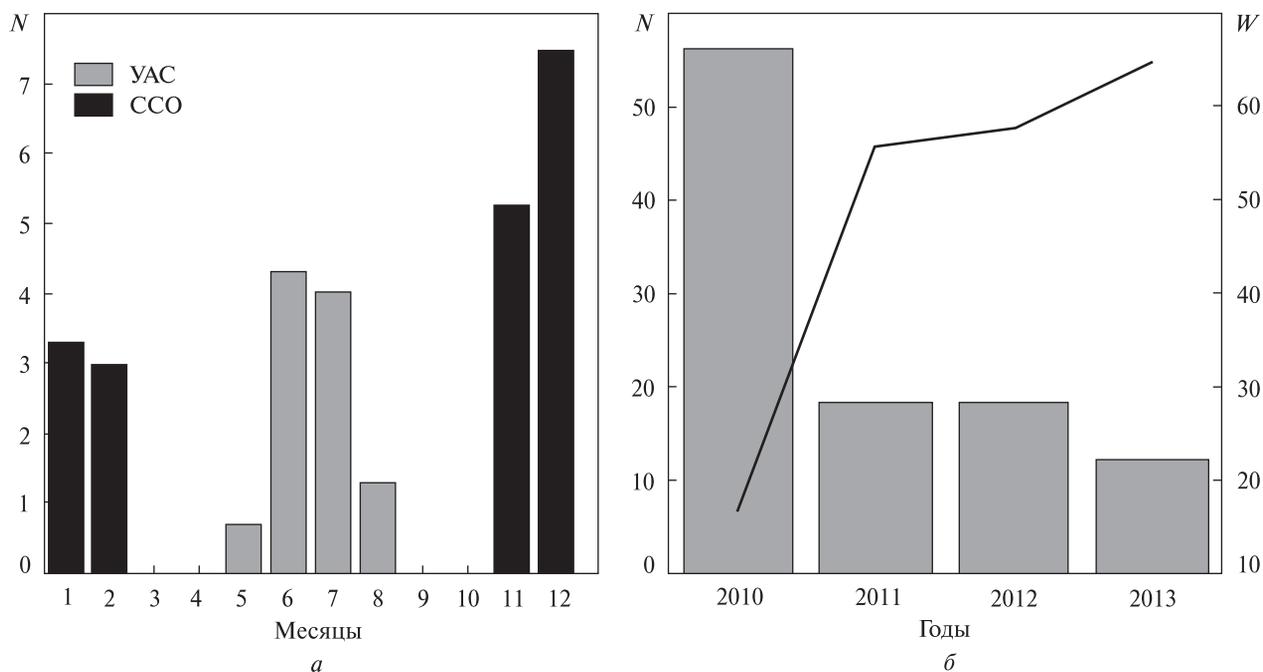


Рис. 3. а — среднеемесячное число событий расщепления на УАС и ССО; б — общее число событий расщепления регистрируемых на ССО и УАС (столбики, шкала слева) в зависимости от среднегодового числа Вольфа W (линия, шкала справа).

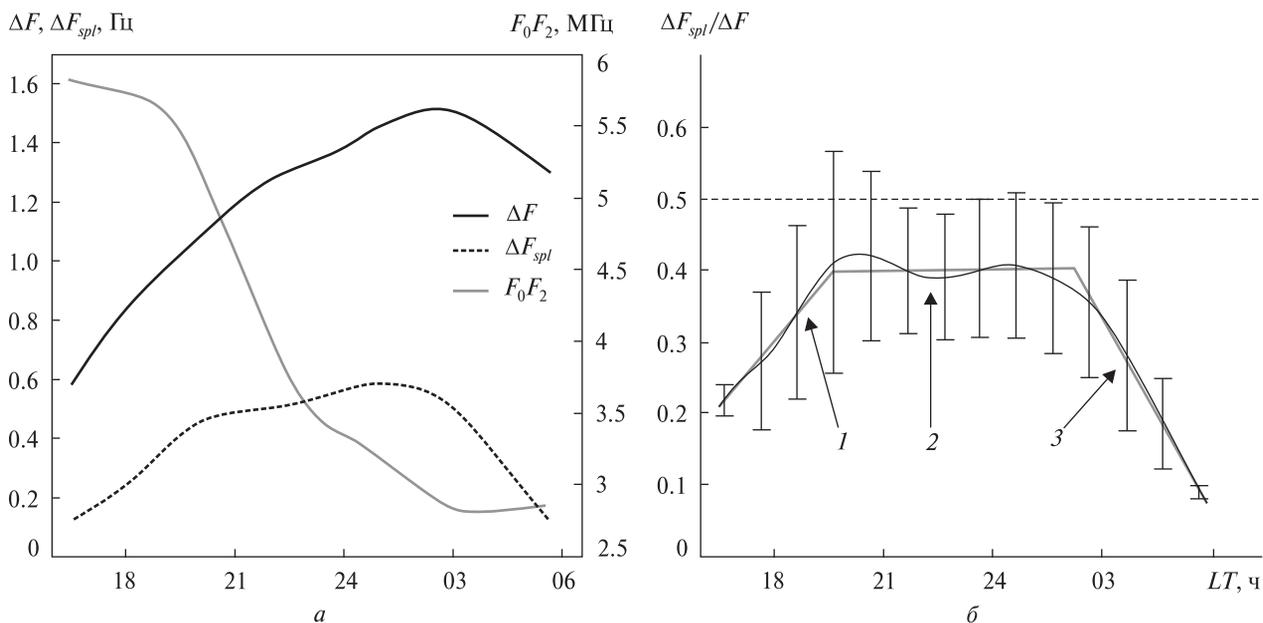


Рис. 4. Сглаженные 3-ч окном и усредненные (по всем случаям расщепления длительностью 10 ч и более) зависимости для: $\Delta F(t), \Delta F_{spl}(t), f_0F_2(t)$ (фрагмент а) и сглаженная 3-ч окном зависимость $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$ — черная кривая (фрагмент б). Прямыми отрезками показаны аппроксимации относительной величины расщепления на участках: 1 — развития, 2 — стационарного расщепления, 3 — релаксации

но растет), стационарный участок 2 (20...02 LT, когда относительная величина расщепления не изменяется) и участок релаксации 3 (02...05 LT, когда относительная величина расщепления линейно уменьшается). Отметим, что на стационарном участке $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$ с учетом доверительных интервалов не превышает значение 0.5 (не достигает половины межмодовой частотной разности, изображенной на рис. 4, б пунктирной линией). Можно констатировать, что моды не «перепутываются» и не взаимодействуют между собой.

В настоящий момент авторы работают над физическим моделированием обнаруженного эффекта расщепления. Можно предложить несколько гипотез о механизме возникновения эффекта. Первая из них — это предположение о том, что расщепление связано с появлением двух эффективных отражающих границ в нижней ионосферной или верхней магнитосферной частях резонатора. Другой возможностью является появление резонансных условий для магнитозвуковых колебаний, распространяющихся в той же полости с отличающимися волновыми нор-

малями. Можно также предположить, что расщепление может формироваться одновременно для двух граничных условий «электрической» и «магнитной» стенок, вблизи пучности и узла стоячей альвеновской волны. Такой механизм объясняет стабильность величины расщепления относительно номера резонансной моды. Наконец, в качестве еще одной гипотезы следует рассмотреть возможность просачивания резонансных колебаний из магнитосопряженной области, обладающей другими условиями освещенности, отличающимися значениями критических частот и, как следствие, резонансными частотами. Предполагается, что на следующем этапе исследований, кроме наземных регистраций в пространственно разнесенных пунктах, будут привлечены бортовые спутниковые измерения, планируемые в проектах «Ионосат-Микро» (ГКАУ) и «Резонанс» (РФКА).

Работа выполнена в 2014 г. в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям в соответствии с

НИР «Исследование электромагнитных резонансных процессов в геокосмосе с синхронным использованием высоко- и низкоорбитальных спутниковых группировок» (№ государственной регистрации 0114U002817).

Авторы благодарны Р. А. Рахматулину за предоставленные магнитометрические данные, полученные на ССО (ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск), а также НАНЦ Украины за обеспечение многолетнего УНЧ-ННЧ-мониторинга на УАС «Академик Вернадский».

1. Бару Н. А., Колосков А. В., Рахматулин Р. А. Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альвеновского резонанса // Первая укр. конф. ЭМЕС: Сб. тез. докл. — Харьков, 2012. — С. 133—135.
2. Бару Н. А., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М., Пашинин А. Ю. Методика оценки критической частоты слоя F2 по разности собственных частот ионосферных альвеновских резонансов // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — **19**, № 2. — С. 151—159.
3. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Изв. вузов. Радиофизика. — 1989. — **32**, № 6. — С. 663—672.
4. Колосков А. В., Безродный В. Г., Буданов О. В. и др. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и радиоастрономия. — 2005. — **10**, № 1. — С. 11—29.
5. Колосков А. В., Силицын В. Г., Герасимова Н. Н., Ямпольский Ю. М. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды // Космична наука і технологія. — 2008. — **14**, № 5. — С. 49—64.
6. Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2014. — **117**. — P. 81—87.
7. Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., Fedorov E., Hayakawa M. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka // Phys. and Chem., Parts A/B/C. — 2004. — **29**, N 4-9. — P. 649—655.
8. Yahnin A. G., Semenova N. V., Ostapenko A. A., et al. 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. — **21**, N 3. — P. 779—786.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2014

М. О. Бару, О. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономічний інститут
Національної академії наук України, Харків

ЭФФЕКТ РОЗЩЕПЛЕННЯ МОДОВОЇ СТРУКТУРИ ІОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНІВСЬКОГО РЕЗОНАТОРА

Аналізуються дані неперервних спостережень іоносферного альвеновського резонансу, виконаних з 2010 по 2013 рр. на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» і на Саянській сонячній обсерваторії (с. Монди, Росія). Вивчено поведінку тонкої спектральної структури резонансів і виявлено раніше невідомий ефект розщеплення декількох нижчих резонансних мод. Досліджено добові та сезонні закономірності «спостережуваності» даного ефекту, а також його залежність від фази 11-річного циклу сонячної активності. Проаналізовано морфологічні особливості поведінки частот розщеплення та визначено його основні фази: розвиток, стаціонарну ділянку та релаксацію. Запропоновано можливі механізми виникнення ефекту розщеплення.

Ключові слова: іоносферний альвеновський резонатор, ефект розщеплення, магнітогідродинамічні хвилі, магнітне поле.

N. A. Baru, A. V. Koloskov, Yu. M. Yampolski

Institute of Radio Astronomy of the National Academy
of Sciences of Ukraine, Kharkiv

THE SPLITTING EFFECT OF THE MODE STRUCTURE OF THE IONOSPHERIC ALFVEN RESONATOR

We analyze the data of continues observations of ionospheric Alfvén resonance (IAR) which were carried out since 2010 until 2013 at the Ukrainian Antarctic Station “Academic Ver-nadskiy” and at the Sayan Solar Observatory (Mondy, Russia). The behavior of IAR fine spectral structure is studied and previously unknown effect of the splitting of several lowest resonance modes is found. Diurnal and seasonal regularities of the observability of this effect as well as its dependence on the phase of the eleven-year cycle of solar activity are investigated. The morphological features of the frequency splitting behavior are analyzed and its main phases as development, stationary section and relaxation are identified. Possible mechanisms of the occurrence of splitting effect are suggested.

Key words: ionospheric Alfvén resonator, splitting effect, magnetohydrodynamic waves, magnetic field.