

УДК 550.388.2 + 537.876.23

## НАБЛЮДАЕМОСТЬ ИОНОСФЕРНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ В АНТАРКТИКЕ В ПОЛНОМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И «ЭФФЕКТ РАСЩЕПЛЕНИЯ»

*Н.А. Бару<sup>1</sup>, А.В. Колосков<sup>1</sup>, Ю.М. Ямпольский<sup>1</sup>, Р.А. Рахматулин<sup>2</sup>, А.Ю. Пашинин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,

4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина, e-mail: baru@rian.kharkov.ua

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики РАН, Сибирское отделение,

126-а, ул. Лермонтова, Иркутск, Россия, 664033, e-mail: rav@iszf.irk.ru

На основании анализа непрерывных записей природных УНЧ-СНЧ шумов, зарегистрированных на Украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский с 2002 по 2013 год, исследованы зависимости характеристик сигналов ионосферного альфвеновского резонанса (ИАР) от геомагнитной и солнечной активности на протяжении 11-летнего солнечного цикла. Обнаружена значимая антикорреляция наблюдаемости резонансных мод со значениями чисел Вольфа и локальными К-индексами магнитного поля, измеренными на УАС. По данным наблюдений ИАР на УАС и на Саянской солнечной обсерватории (п. Монды, Россия) исследованы суточные и сезонные закономерности наблюдаемости нового эффекта расщепления низших резонансных мод, а также его зависимость от фазы 11-летнего цикла солнечной активности. Проанализированы морфологические особенности поведения величины расщепления и выделены его основные фазы: развитие, стационарный участок и релаксация. Предложены возможные механизмы возникновения эффекта расщепления.

### Спостережуваність іоносферних альфвенівських резонансів в Антарктиці у повному циклі сонячної активності та „ефект розщеплення”

М.О. Бару, О.В. Колосков, Ю.М. Ямпольський, Р.А. Рахматулін, О.Ю. Пашинін

**Реферат.** На підставі аналізу неперервних записів природних УНЧ-СНЧ шумів, зареєстрованих на Українській антарктичній станції (УАС) Академік Вернадський з 2002 по 2013 рік, досліджено залежності характеристик сигналів іоносферного альфвенівського резонансу (ІАР) від геомагнітної та сонячної активностей протягом 11-річного сонячного циклу. Виявлено значиму антикореляцію спостережуваності резонансних мод зі значеннями чисел Вольфа та локальними К-індексами магнітного поля, що вимірювались на УАС. За даними спостережень ІАР на УАС та на Саянській сонячній обсерваторії (с. Монди, Росія) досліджено добові та сезонні закономірності спостережуваності нового ефекту розщеплення нижчих резонансних мод, а також його залежність від фази 11-річного циклу сонячної активності. Проаналізовано морфологічні особливості поведінки ефекту розщеплення та виділено його основні фази: розвиток, стаціонарну ділянку та релаксацію. Запропоновано можливі механізми виникнення ефекту розщеплення.

### The observability of the ionospheric Alfvén resonances in Antarctica over the complete solar cycle and the splitting effect

N.A. Baru, A.V. Koloskov, Yu.M. Yampolski, R.A. Rahmatulin, A.Yu. Pashinin

**Abstract.** The dependence of the characteristics of the ionospheric Alfvén resonance (IAR) signals from the geomagnetic and solar activity are investigated over an eleven-year solar cycle on the grounds of the analysis of the continuous data of the natural VLF-ELF noise that is registered at Ukrainian Antarctic Station (UAS) Akademik Vernadsky from 2002 till 2013. Significant anticorrelation between the observability of the resonance modes and the Wolf numbers and local K-indexes that is measured at UAS is found. The diurnal and seasonal regularities of the observability of the new effect, the splitting of the lower resonance modes,

and its dependence from the phase of the eleven-year solar cycle are investigated using the data of IAR observations at UAS and Sayan Solar observatory (Mondy, Russia). The morphological features of the behaviour of the splitting magnitude are analyzed and its main stages as evolution, stationary section and relaxation are allocated. Possible mechanisms of the appearance of splitting effect are offered.

**Key words:** ionospheric Alfvén resonance, solar cycle, splitting.

## 1. Введение

Одной из волноведущих природных структур, формирующих электромагнитный климат геокосмоса в УНЧ-СНЧ диапазоне, является ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР). ИАР – это резонансная система для альфвеновской 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 (Бару и др., 2012; Бару и др., 2013; Беляев и др., 1989; Колосков и др., 2008; Molchanov et al., 2004; Yahnin et al., 2003). В последнее время в литературе также появились свидетельства приема МГД составляющих ИАР «in situ» с борта космического аппарата (Dudkin et al., 2014). Поведение ИАР определяется как свойствами его основного источника – мировой грозовой активности, так и с изменениями в околоземной плазме. Это позволяет использовать ИАР для изучения грозových разрядов и ионосферной диагностики (Бару и др., 2014). Кроме того, характеристики резонанса меняются вследствие регулярных и спорадических гелио- и геофизических факторов: мощных возмущений магнитного поля (бури и суббури), выпадений высокоэнергичных частиц из радиационных поясов Земли, 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. В 2002 г. специалистами Радиоастрономического института НАН Украины (РИ НАНУ) на Украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский был начат непрерывный мониторинг ИАР. Данные наблюдений показали, 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. Анализ обнаруженных закономерностей позволил разработать методику модельного восстановления критической частоты главного ионосферного максимума  $-f_0F_2$ . Результаты исследований опубликованы в статьях (Бару и др., 2013; Бару и др., 2014).

На настоящий момент ряды данных, полученных на УАС, являются самой длинной непрерывной регистрацией ИАР в мире. Это позволило авторам статьи поставить задачу исследования характеристик резонансных сигналов на протяжении полного солнечного цикла. В данной работе выполнен анализ долговременной изменчивости характеристик ИАР и проведено их сопоставление с индексами солнечной и магнитной активности. Поскольку резонансы несут глобальный характер, особый интерес представляют синхронные измерения, осуществляемые в пунктах с большим разнесением в пространстве. Поэтому по инициативе РИ НАНУ в 2010 г. мониторинг ИАР был начат в Восточной Сибири на Саянской солнечной обсерватории (ССО), а с 2014 г. – в Арктике на о. Свалбард (арх. Шпицберген, Норвегия). Большой объем экспериментального материала, полученного в разных гелиофизических условиях, позволил также исследовать тонкую структуру РСС и обнаружить неизвестный ранее эффект расщепления низших резонансных мод ИАР (Бару и др., 2013). В настоящей работе проведен анализ особенностей этого явления, установлены основные закономерности поведения расщепленных мод и предложены возможные механизмы возникновения эффекта.

## 2. Методика проведения наблюдений и обработки данных

Базовым пунктом наблюдений, для которого получен основной объем данных регистраций ИАР, является Украинская антарктическая станция ( $65^{\circ}15'$  ю.ш.,  $64^{\circ}16'$  з.д.). В работе проанализированы записи, полученные на УАС с 2002 по 2013 год включительно. Этот экспериментальный материал использован для исследования долговременных зависимостей характеристик резонансов от активности Солнца. На магнитной станции Саянской солнечной обсерватории Института Солнечно-Земной Физики Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИСЗФ СО РАН) ( $51^{\circ}16'$  с.ш.,  $100^{\circ}55'$  в.д.) измерения в диапазоне ИАР проводятся с 2010 года. Трехлетний интервал наблюдений недостаточно для сопоставления с 11-летним солнечным циклом. Поэтому данные ССО совместно с УАС, полученные в этот период времени, применены для анализа эффекта расщепления. Отметим, что несмотря на разницу географических координат, структуры 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 была осуществлена с помощью индукционных магнитометров, изготовленных Львовским центром Института космических исследований НАНУ-НКАУ, которые измеряли горизонтальные компоненты геомагнитного поля в направлениях географических меридиана ( $x$ ) и параллели ( $y$ ). На УАС функционирует магнитометр Lemі-419ANT (диапазон частот:  $0.001 \div 80$  Гц), на ССО – Lemі-30 (частоты:  $0.001 \div 40$  Гц). При обработке данных, полученных на УАС с 2002 по 2009 год, оператором для каждого дня наблюдений определялись факты регистрации РСС (резонанс считается зарегистрированным, если можно выделить 2 или более спектральных максимумов) и наличия расщепления спектральных максимумов. Затем вычислялись вероятности таких событий для каждого месяца. Записи 2010–2013 гг. с обоих пунктов наблюдения (УАС и ССО) подвергались более детальной обработке при помощи специального пакета прикладных программ, разработанного в РИ НАНУ. Для каждого 10-минутного 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 (Колосков и др., 2005). Далее оператором определялся факт наличия РСС и расщепления, а также оценивались: собственные частоты спектральных мод ИАР, средний частотный разнос между линиями ИАР –  $\Delta F$  и величина расщепления  $\Delta F_{spl}$ . Оценка ионосферной обстановки выполнялась с помощью станций вертикального зондирования – IPS-42, расположенного на УАС, и DPS-4, размещенного в двухстах километрах от ССО в г. Иркутске. Как было показано в работе (Бару и др., 2014), наиболее важным для ИАР ионосферным параметром являлось текущее локальное значение критической частоты слоя  $F_2 - f_oF_2$ .

## 3. Анализ экспериментальных данных

### 3.1. Морфологические особенности модовой структуры ИАР

Наши измерения показали, что в большом количестве случаев низшие моды ИАР расщепляются на величину  $\Delta F_{spl}$  (рис. 1). Наиболее контрастно 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 для 10 декабря 2010 г. Как видно из этой иллюстрации, начиная с 12 UT (19 LT – локального времени) моды ИАР расщепляются на два сателлита, расстояние между которыми плавно растет до 0.8-1 Гц в 20 UT (3 LT). К 24 UT (7 LT) величина  $\Delta F_{spl}$  уменьшается. Эффект четко прослеживается для трёх первых мод ИАР, причем с увеличением номера резонансного мода ИАР момент возникновения расщепления незначительно сдвигается в ночные часы. Оба сателлита и нерасщепленные участки линий ИАР имеют практически круговую поляризацию с направлением

вращения по часовой стрелке (коэффициент эллиптичности близок к +1). Анализ данных показал, что величины других поляризационных и спектральных характеристик ИАР как на нерасщеплённых, так и на расщеплённых участках суточной зависимости являются идентичными и не могут быть использованы для селекции спутников.

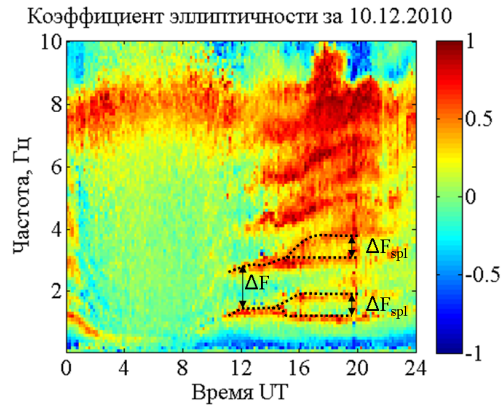


Рис. 1. Суточная спектрограмма коэффициента эллиптичности для 10.12.2010 г.

Суточные закономерности в поведении расщепления на УАС и СОО представлены на рис. 2, а и 2, б. Сезонная вероятность регистрации расщепления продемонстрирована на рис. 3. Из рисунка 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.

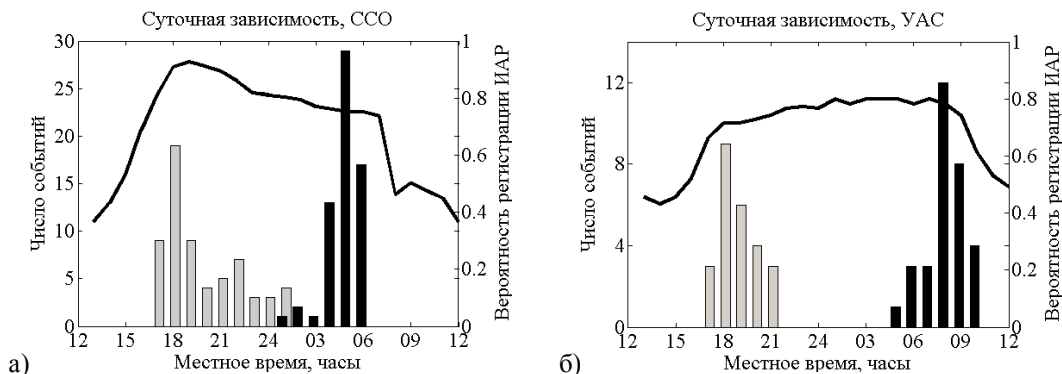


Рис. 2. Суточные закономерности возникновения (серые столбики) и пропадания (чёрные столбики) эффекта расщепления на ССО (а) и УАС (б). Линией указана вероятность регистрации ИАР (правая ордината) в каждом из пунктов.

Рисунок 3 демонстрирует, что в обоих пунктах расщепление регистрируется только во время локальной зимы, а во все остальные сезоны года отсутствует. Выполненный анализ показывает, что суточные и сезонные зависимости для числа событий расщепления полностью соответствуют аналогичным кривым вероятности регистрации ИАР, однако для расщепления они выражены более чётко. 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.

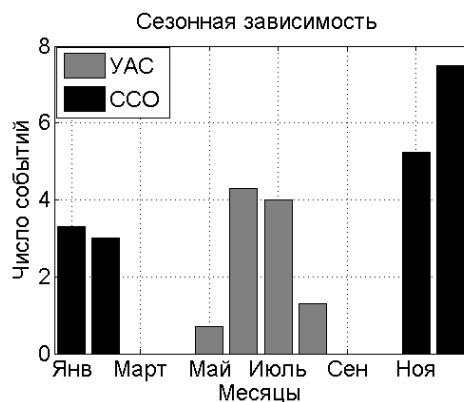


Рис. 3. Среднемесячное количество случаев расщепления на УАС (серые столбики) и ССО (черные столбики).

### 3.2. Характеристики ИАР на протяжении полного цикла солнечной активности

Рисунок 4.а иллюстрирует поведение ИАР, зарегистрированных на УАС, на протяжении 11-летнего солнечного цикла. Серые столбики соответствуют вероятности регистрации ИАР, рассчитанной для каждого года в интервале от 2002 до 2013. Чёрные столбики демонстрируют аналогичную величину для эффекта расщепления. Значения вероятностей отложены на левой оси ординат. Видно, что обе вероятности ведут себя похожим образом и имеют максимум, соответствующий солнечному минимуму 2008-2009 годов. Обратим внимание на асимметрию межгодового хода вероятностей. Для предпоследнего солнечного максимума (2002 год) вероятность регистрации ИАР существенно ниже, чем для последнего максимума, приходящегося на 2012-2013 годы. Также отметим, что в период с 2002 по 2003 год на УАС не было зафиксировано ни одного случая расщепления. На этом же рисунке приведены данные о солнечной и локальной геомагнитной активности. Для удобства сопоставления с данными ИАР кривые активностей показаны с инвертированными осями ординат (эти оси изображены справа). Штриховой линией показаны среднегодовые числа Вольфа, которые характеризуют число солнечных пятен и прямо пропорциональны солнечной активности в 11-летнем цикле. Информация о числе солнечных пятен получена по интернет-ссылке <http://www.sidc.be/silso/datafiles> из Международного центра данных Королевской Обсерватории Бельгии. Геомагнитную активность характеризуют среднегодовые локальные К-индексы, рассчитанные на магнитной обсерватории УАС – А1А. Видно, что долговременная вариация вероятностей регистрации ИАР очень хорошо следует ходу инвертированных кривых солнечной и геомагнитной активностей. Это же относится и к вероятности регистрации эффекта расщепления. Таким образом, наблюдаемость ИАР находится в явной обратной зависимости как от солнечной активности, так и от локальной возмущенности геомагнитного поля.

Как было показано ранее в работах (Бару и др., 2013; Бару и др., 2014), характеристики ИАР в значительной степени определяются параметрами локальной ионосферы, и в первую очередь частотой главного ионосферного максимума  $f_0F_2$ . На рисунке 4.б для всего времени наблюдений представлены данные о вероятности регистрации ИАР на УАС (серая линия) совместно со значениями критических частот, измеренных при помощи ионозонда (штриховая линия). Кривые рассчитаны с месячным усреднением. Для удобства сопоставления

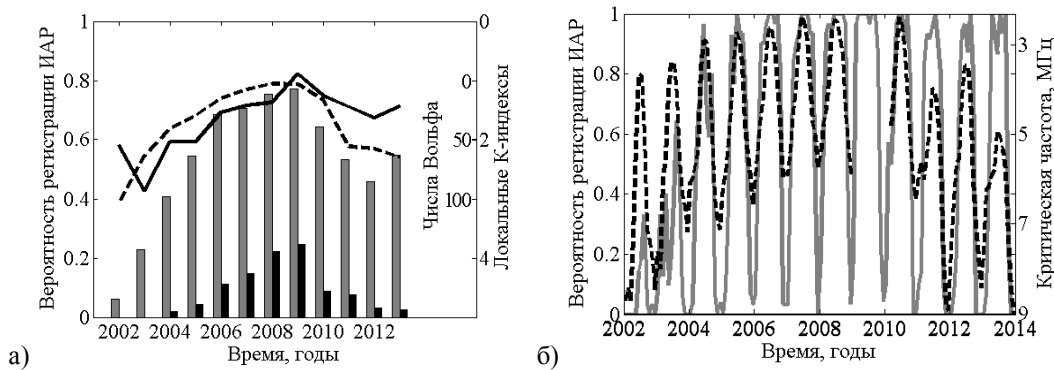


Рис. 4. а) среднегодовые вероятности регистрации ИАР (серые столбики) и эффекта расщепления (чёрные столбики) совместно со среднегодовыми значениями чисел Вольфа (штриховая линия) и локальных К-индексов (сплошная кривая); б) среднемесячные значения вероятности регистрации ИАР (сплошная серая кривая) и критической частоты ионосферного слоя F<sub>2</sub> (штриховая чёрная кривая). Шкалы значений чисел Вольфа, К-индексов и  $f_0F_2$  инвертированы.

правая ось ординат, соответствующая значениям критических частот, инвертирована. Видно, что обе кривые хорошо коррелированы, что подтверждает обратную зависимость наблюдаемости ИАР от критической частоты.

Перейдем теперь к обсуждению и интерпретации полученных результатов.

#### 4. Обсуждение результатов и выводы

Несмотря на то, что в литературе имеются сведения об обратной зависимости наблюдаемости ИАР от геомагнитной и солнечной активности (Hayakawa et al., 2004; Molchanov et al., 2004; Yahnin et al., 2003; Belyaev et al., 2000), эти результаты получены по фрагментированным записям с большим количеством пропусков, которые не дают полной картины поведения ИАР на протяжении солнечного цикла. В настоящей работе использованы непрерывные ряды данных за 12 лет наблюдений, что позволило провести более детальный анализ данных. В первую очередь отметим большую абсолютную величину коэффициента корреляции изображенных на рис. 4.а ходов среднегодовой вероятности регистрации ИАР и значений чисел Вольфа, составляющую  $-0.91$ . Практически столь же высокая антикорреляция,  $-0.77$ , наблюдается для зависимостей среднемесячной вероятности регистрации ИАР и критической частоты (см. рис. 4.б). Таким образом, основным фактором, определяющим долгосрочные изменения наблюдаемости ИАР, можно считать вариации солнечной активности и контролируемые ими изменения критической частоты над пунктом наблюдения. В то же время, несмотря на высокую степень подобия, связь между солнечной активностью и наблюдаемостью ИАР не является линейной. Максимальные различия наблюдаются при больших уровнях солнечной активности. Из рисунка 4.а видно, что с 2002 по 2006 г. вероятность регистрации ИАР растет быстрее, чем уменьшаются значения чисел Вольфа. Во время минимума и последнего максимума активности (2011–2013 гг.), величина которого существенно меньше предыдущего, связь близка к линейной. Для зависимостей среднемесячных вероятностей регистрации ИАР и критической частоты слоя F<sub>2</sub> степень подобия максимальна в зимние месяцы с 2004 по 2010 год, то есть также в периоды средней и низкой активности. В максимумах солнечного цикла с 2002 по 2003 и с 2011 по 2013 годы степень подобия ухудшается. Еще сильнее различия проявляются в летние месяцы, когда для всех лет наблюдений вне зависимости от фазы

солнечного цикла и величин критической частоты вероятность регистрации ИАР опускается практически до нуля. Таким образом, при средних и низких величинах активности Солнца наблюдаемость ИАР изменяется обратно пропорционально активности, а при её повышении эта зависимость становится более резкой, вплоть до полного пропадания резонансов. Отметим также высокую степень подобия кривых вероятности регистрации ИАР и инвертированной частоты  $f_0F_2$  над УАС (см. рис. 4.б), которая подтверждает определяющую роль изменений критической частоты слоя  $F_2$  на параметры резонансов.

Ранее в работе (Бару и др., 2013) нами были сопоставлены вероятности регистрации ИАР с геомагнитной активностью. Эти исследования показали незначительную обратную зависимость наблюдаемости резонансов от величины локального К-индекса. Поскольку анализ был выполнен для условий минимума солнечной активности, когда геомагнитная активность также минимальна и изменяется слабо, в работе был сделан вывод о необходимости проведения анализа также и для условий солнечного максимума. Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, данные за 12 лет наблюдений показали чёткую обратную зависимость наблюдаемости резонансов и среднегодовых величин К-индекса. Величина коэффициента корреляции составила  $-0.79$ . Как видно из рис. 4.б, кривые вероятности регистрации ИАР и инвертированных значений К-индексов совпадают вплоть до мелких особенностей, таких как локальный минимум в 2012 году. Отличия в поведении кривых наблюдаются только для 2002 года, когда средние К-индексы уменьшаются, несмотря на максимальную фазу солнечного цикла. По-видимому, именно солнечная активность в это время является определяющим фактором, влияющим на наблюдаемость ИАР.

Переходя к описанию эффекта расщепления, отметим, что коэффициент корреляции между вариацией вероятности регистрации расщепления и вероятностью регистрации ИАР за 12 лет наблюдений равен 0.82. Высокий уровень статистической связи показывает, что количество случаев регистрации расщепления в период солнечного минимума возрастает скорее всего из-за общего увеличения наблюдаемости ИАР, а не по причине зависимости от солнечного цикла. Исследуем теперь поведение величины расщепления в зависимости от критической частоты слоя  $F_2$ . Ранее в работе (Бару и др., 2014) нами была подтверждена обратная зависимость  $f_0F_2$  и частотной разницы между соседними резонансными модами -  $\Delta F$ , а также разработана методика оценки критической частоты слоя  $F_2$  по измеряемой в эксперименте величине  $\Delta F$ . В настоящей статье проанализировано, сохраняется ли эта закономерность для величины расщепления  $\Delta F_{spl}$  и как ведет себя соотношение величин -  $\Delta F_{spl}/\Delta F$ . С этой целью исследовано поведение усреднённых зависимостей  $\Delta F(t)$ ,  $\Delta F_{spl}(t)$ ,  $f_0F_2(t)$  (рис. 5.а) и соотношение  $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$  (рис 5.б) для всех случаев, когда расщепление наблюдалось в течение 10 часов и более. Для анализа привлечены записи 2010–2013 годов, полученные на УАС и ССО.

Как видно из рисунка 5.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. Рисунок 5.б демонстрирует, что величина расщепления  $\Delta F_{spl}(t)$ , нормированная на межмодовый частотный сдвиг  $\Delta F(t)$ , состоит из трёх характерных участков, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями. Это: участок развития расщепления 1 (~16-20 LT, когда относительная величина расщепления линейно растёт), стационарный участок 2 (~20-02 LT, когда относительная величина расщепления не меняется) 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 учётом доверительных интервалов не превышает значение 0.5 (не достигает половины межмодовой частотной разности). 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 явления. Первая из них – это предположение о том, что расщепление связано с появлением

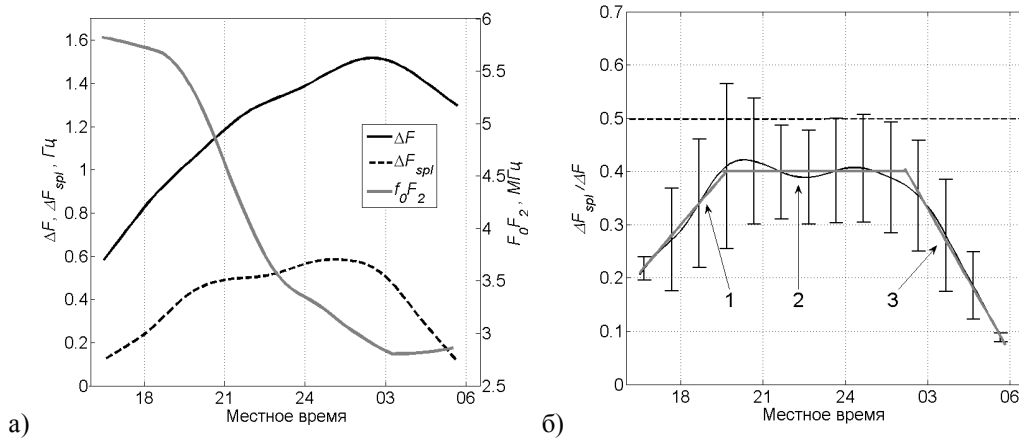


Рис. 5. а) сглаженные трёхчасовым окном и усреднённые по всем проанализированным случаям расщепления среднесуточные зависимости для  $\Delta F(t)$ ,  $\Delta F_{spl}(t)$ ,  $f_0F_2(t)$ ; б) сглаженная трёхчасовым окном нормированная зависимость расщепления  $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$  (чёрная кривая). Серыми отрезками показаны аппроксимации относительной величины расщепления на участках развития – 1, стационарного расщепления – 2 и релаксации – 3.

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 нормальными. Можно также предположить, что расщепление может формироваться одновременно для двух граничных условий «электрической» и «магнитной» стенок, вблизи пучности и узла стоячей альфвеновской волны. Такой механизм объясняет стабильность величины расщепления относительно номера резонансной моды. Наконец, в качестве ещё одной гипотезы следует рассмотреть возможность просачивания резонансных колебаний из магнитосопряжённой области, обладающей другими условиями освещенности, отличающимися значениями критических частот и, как следствие, резонансными частотами.

Сформулируем выводы по работе.

- 1) Обнаружена значимая антикорреляция наблюдаемости ионосферных альфвеновских резонансов с магнитной и солнечной активностями и изучены особенности поведения резонансов на протяжении полного солнечного цикла.
- 2) На многолетнем массиве экспериментальных данных подтверждена зависимость наблюдаемости ИАР от критической частоты.
- 3) Изучены суточные, сезонные и долгосрочные 11-летние закономерности наблюдаемости нового эффекта расщепления низших резонансных мод ИАР.
- 4) Проанализирована морфология эффекта расщепления. Установлено наличие фаз расщепления (развитие, стационарный участок, релаксация) и определены их характерные продолжительности. Предложены возможные механизмы возникновения эффекта.

**Работа выполнена в рамках «Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки» по направлению «Геокосмические исследования» (авторы статьи считают своим долгом поблагодарить НАНЦ Украины за обеспечение многолетнего УНЧ-ННЧ мониторинга на УАС Академик Вернадский) и при частичной финансовой поддержке НИР «Ятаган-2» (№0111U000063) «Шпицберген-2014» (№0114U002820).**



### Список литературы

1. **Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматуллин.** Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альфвеновского резонанса // Сб. тез. докл. Первой украинской конференции ЭМЕС. – Харьков (Украина). – 2012. – С. 133–135.
2. **Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматулин.** Зависимость характеристик ионосферного альфвеновского резонанса от состояния геокосмоса по данным синхронных наблюдений в Антарктике и Евразии // Украинский антарктический журнал. – 2013. – № 12. – С. 177–185.
3. **Н.А. Бару, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский** и др. Методика оценки критической частоты слоя F2 по разности собственных частот ионосферных альфвеновских резонансов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 151–159.
4. **П.П. Беляев, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт** и др. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Известия вузов. Радиофизика. – 1989. – Т. 32, № 6. – С. 663–672.
5. **А.В. Колосков, В.Г. Безродный, О.В. Буданов** и др. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 11–29.
6. **А.В. Колосков, В.Г. Синицын, Н.Н. Герасимова** и др. Околосемные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 5. – С. 49–64.
7. **D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Korepanov** et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – V. 117. – P. 81–87.
8. **M. Hayakawa, O.A. Molchanov, A.Yu. Schekotov** et al. Observation of ionospheric Alfvén resonance at a middle latitude station // Adv. Polar Upper Atmos. Res. – 2004. – V. 18. – P. 67–76.
9. **O.A. Molchanov, A.Yu. Schekotov, E. Fedorov** et al. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. – 2004. – V. 29, Is. 4–9. – P. 649–655.
10. **A.G. Yahnin, N.V. Semenova, A.A. Ostapenko** 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 // ANGEО. – 2003. – Vol. 21, No. 3. – P. 779–786.
11. **P.P. Belyaev, S.V. Polyakov, E.N. Ermakova** et al. Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985–1995 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – No 62. – P. 239–248.