

УДК 550.388.2

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНОГО АЛЬФВЕНОВСКОГО РЕЗОНАНСА ОТ СОСТОЯНИЯ ГЕОКОСМОСА ПО ДАНЫМ СИНХРОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В АНТАРКТИКЕ И ЕВРАЗИИ

Н.А. Бару¹, А.В. Колосков¹, Р.А. Рахматулин²

¹ *Радиоастрономический институт НАН Украины, 4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина, e-mail: baru@rian.kharkov.ua*

² *Институт солнечно-земной физики РАН, Сибирское отделение, 126-а, ул. Лермонтова, Иркутск, Россия, 664033, e-mail: rav@iszf.irk.ru*

Среди процессов в околоземной плазме, формирующих свойства геокосмоса, ключевая роль принадлежит электромагнитным резонаторам Земли: шумановскому резонатору (ШР) и ионосферному альфвеновскому резонатору (ИАР). ИАР в большей степени, чем ШР, локализован в пространстве, и его свойства во многом определяются характеристиками среды распространения. В отличие от ШР, который имеет глобальный характер и наблюдается всегда, сигналы ИАР регистрируются в основном в ночной период и демонстрируют существенно большую, чем у ШР, изменчивость параметров. На поверхности Земли ИАР фиксируется в виде резонансной структуры спектра (РСС) естественного электромагнитного фона в диапазоне частот 0.1–30 Гц. В данной работе изучено влияние характеристик окружающей среды на параметры ИАР по результатам многопозиционных наблюдений. Для анализа нами были использованы годовые ряды данных, полученные на Украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский, в низкочастотной обсерватории (НЧО) РИ НАНУ под Харьковом (Украина) и на магнитной станции Саянской солнечной обсерватории Монды вблизи Иркутска (Россия). Авторами было исследовано поведение параметров ИАР, таких как вероятность регистрации резонансных линий, расстояние между максимумами dF , на годовом и суточном интервалах. Было проведено сравнение этих параметров с характеристиками ионосферы и возмущенностью магнитного поля над пунктами наблюдений, а также выполнен сравнительный анализ полученных результатов по всем обсерваториям. На большом массиве экспериментальных данных и для различных пунктов наблюдения нами была проверена и подтверждена правильность методики восстановления критической частоты слоя F2 - f_0F2 по величине частотного разноса мод РСС – dF . Также были обнаружены и изучены случаи расщепления линий максимумов ИАР на два сателлита.

Залежність характеристик іоносферного альфвенівського резонансу від стану геокосмосу за даними синхронних спостережень в Антарктиці та Євразії.

М.О. Бару, О.В. Колосков, Р.А. Рахматулін

Реферат. Серед процесів у навколоземній плазмі, що формують властивості геокосмосу, ключова роль належить електромагнітним резонаторам Землі: шуманівському резонатору (ШР) та іоносферному альфвенівському резонатору (ИАР). ИАР більшою мірою, ніж ШР, локалізований у просторі, і його властивості багато в чому визначаються характеристиками середовища поширення. На відміну від ШР, який має глобальний характер і спостерігається завжди, сигнали ИАР реєструються в основному в нічний період і демонструють істотно більшу, ніж у ШР, мінливість параметрів. На поверхні землі ИАР фіксується у вигляді резонансної структури спектра (РСС) природного електромагнітного фону в діапазоні частот 0.1–30 Гц. У даній роботі вивчено вплив характеристик навколишнього середовища на параметри ИАР за результатами багатопозиційних спостережень. Для аналізу нами було використано річні ряди даних, отриманих на Українській антарктичній станції (УАС) Академік Вернадський, у низкочастотній обсерваторії (НЧО) РИ НАНУ під Харковом (Україна) та на магнітній станції Саянської сонячної обсерваторії Монди поблизу Іркутська (Росія). Авторами було досліджено поведінку

параметрів ІАР, таких як ймовірність реєстрації резонансних ліній, відстань між максимумами dF , на річному та добовому інтервалах. Було здійснено порівняння цих параметрів з характеристиками іоносфери і збудженістю магнітного поля над пунктами спостережень, а також виконано порівняльний аналіз отриманих результатів по всіх обсерваторіях. На великому масиві експериментальних даних і для різних пунктів спостереження нами було перевірено та підтверджено правильність методики встановлення критичної частоти шару F2 - f_0F2 за величиною частотного розносу мод РСС – dF . Також було виявлено і вивчено випадки розщеплення ліній максимумів ІАР на два сателіти.

Dependence of the parameters of ionospheric Alfvén resonance from the conditions of Geospace by the data of synchronous observations in Antarctica and Eurasia.

N.A. Baru, A.V. Koloskov, R.A. Rakhmatulin

Abstract. Among the processes in the circumterrestrial plasma what form properties of the geospace the key role belong to the electromagnetic resonances of the Earth: Schumann Resonance (SR) and Ionospheric Alfvén Resonance (IAR). This is because IAR is localized in space more than SR and its properties largely depend on the characteristics of the propagation medium. In contrast to the SR, which has global nature and which is observable at any time, IAR signals are registered mostly during the night and demonstrate more variability of the parameters than SR signals. At the Earth surface IAR is registered as Spectral Resonance Structure (SRS) of the natural electromagnetic noise at frequency range 0.1-30 Гц. In this work we studied an influence of the characteristics of environment on IAR parameters by the means of multiposition observations. Annual data series recorded at Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadskiy” (UAS), Low Frequency Observatory (LFO) IRA NASU near Kharkov (Ukraine) and magnetic station of Sayan Solar Observatory Mondy near Irkutsk (Russia) were used for the analysis. Authors investigated the behaviour of IAR parameters, such as probability of resonance lines registration, frequency spacing dF , for annual and diurnal intervals. These parameters were compared with characteristics of the ionosphere and magnetic fields disturbances above all the observation points. Long data sets recorded at different stations were used to verify and confirm our technique of the reconstruction of F2 layer critical frequency – f_0F2 from SRS frequency spacing. Also we have detected and studied new effect of splitting of the IAR maximums on two satellites.

Key words: ionosphere, Alfvén, resonance, critical frequency, morphology.

1. Введение

Максимумы «педерсеновской» и «холловской» проводимостей, существующие на высотах E-слоя ионосферы, приводят к образованию там эффективной «отражающей стенки» для магнитогидродинамических (МГД) альфвеновских волн, распространяющихся в верхней ионосфере и магнитосфере. Это, в свою очередь, приводит к возникновению в области замкнутых силовых линий так называемого FLR (field line resonances), т.е. системы стоячих волн вдоль силовых линий геомагнитного поля (Kivelson et al., 1986). Структура FLR образуется при отражении МГД волн от ионосферы на двух концах силовой линии – в магнитосопряженных областях Южного и Северного полушарий. Однако если на высотах 1000–1500 км возникают дополнительные условия для отражения МГД волн, то область пространства, где существует резонансный процесс, существенно уменьшается и оказывается ограниченной сверху плазмопаузой, а снизу – нижней ионосферой. Такое явление, названное ионосферным альфвеновским резонатором (ИАР), было впервые описано в 1981 г. (Поляков С.В.). На высотах E-области ионосферы МГД волны ИАР трансформируются в электромагнитные и принимаются на поверхности Земли в виде резонансной структуры спектра (РСС) естественного электромагнитного фона в частотном диапазоне 0,1–5 Гц. В дальнейшем ИАР исследовался многими авторами как в теоретическом (Остапенко и др., 1990; Demekhov et al., 2000; Колосков и др., 2008), так и в экспериментальном плане (Belyaev et al, 1999; T. Vcsinger et al., 2002; Shi et al., 2010). Был проведён анализ морфологии РСС, исследована связь с ионосферными параметрами (Беляев и др., 1989б). В работе (Belyaev et al., 2000) были изучены параметры ИАР на протяжении солнечного цикла и установлена обратная зависимость между «наблюдаемостью» ИАР и уровнем солнечной активности. В работах (Беляев и др., 1989а) теоретически и (Беляев и др., 1989б) экспериментально было показано, что верхняя граница частотного диапазона

наблюдаемости РСС достигает 10 Гц. Однако все экспериментальные наблюдения, которые использовались в данных работах, были единоразовыми либо фрагментарными.

На Украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский проводится мониторинг горизонтальных магнитных компонент УНЧ-СНЧ полей с начала текущего столетия. Наряду с записями антарктической станции Arrival Heights (Satori et al., 2005) это наиболее длительные ряды непрерывных наблюдений в данном диапазоне частот. Данные, полученные на УАС, используются авторами для систематического поиска РСС, отвечающих ИАР. По результатам анализа данных, полученных на УАС, нами был увеличен частотный диапазон обнаружения РСС до 40 Гц и разработана методика оценки критической частоты области F2 ионосферы. Эти вопросы освещены в статье (Колосков и др., 2012). В данной работе представлены результаты дальнейшего развития наших исследований. Основным пунктом наблюдений по-прежнему является УАС, но дополнительно используются данные, полученные на двух других пунктах, расположенных в Северном полушарии, на значительном удалении от станции. Нами осуществлён сравнительный анализ морфологии ИАР в трёх пунктах. На большем массиве экспериментальных данных и для различных пунктов наблюдений проверена методика оценки критической частоты ионосферы и проведена её дальнейшая разработка.

2. Методика эксперимента

Как уже отмечалось, реперным пунктом наблюдений являлась Украинская антарктическая станция Академик Вернадский ($65^{\circ}15'$ ю.ш., $64^{\circ}16'$ з.д.), оснащенная индукционным магнитометром Lemi-112A с рабочим диапазоном частот 0,03–300 Гц (Безродный и др., 2003) и станцией ионосферного зондирования IPS-42. Наличие на станции обеих установок позволяло проводить сопоставление параметров ИАР с характеристиками ионосферы. Как будет показано далее, свойства ИАР в значительной степени контролируются локальными ионосферными условиями, поэтому данные ионосферной диагностики помогают интерпретировать результаты УНЧ-СНЧ измерений. Станция IPS-42 расположена на расстоянии порядка 500 м от магнитометра, что позволяет считать измерения однопозиционными. Отметим, что станция вертикального зондирования на УАС была модернизирована и дополнена блоком цифровой регистрации, поэтому ионограммы доступны в электронном формате. Зондирования выполняются в мониторинговом режиме каждые 15 мин. Все ионограммы обрабатываются оператором по методике URSI (Медникова, 1977) и доводятся до стандартного формата месячных *ged*-файлов, содержащих информацию об основных ионосферных параметрах в табличной форме.

Следующим пунктом регистрации данных в диапазоне УНЧ-СНЧ является Саянская солнечная обсерватория Монды, расположенная в Российской Федерации в точке с координатами $51^{\circ}37'$ с.ш., $100^{\circ}55'$ в.д. Саянская обсерватория расположена в Северном полушарии на расстоянии порядка 18 300 км от УАС со значительным разносом по широте и долготе. Это обеспечивает существенное различие ионосферных параметров в обоих пунктах. Измерения УНЧ-СНЧ шумов осуществляются индукционным магнитометром Lemi-30, работающим в диапазоне частот 0,001–30 Гц (<http://www.isr.lviv.ua/lemi30.htm>). Отметим, что, как и на УАС, данный прибор разработан и изготовлен Львовским центром Института космических исследований НАНУ НККАУ (www.isr.lviv.ua). Важным преимуществом Саянской обсерватории является возможность сопоставления УНЧ-СНЧ данных с результатами ионосферного зондирования. Следует учитывать, что ионозонд расположен не непосредственно на обсерватории, как на УАС, а вблизи г. Иркутска, т.е. на расстоянии более 100 км от обсерватории, что усложняет поиск реакции на ионосферные возмущения мелких и средних масштабов. Тем не менее этот разнос меньше характерных крупномасштабных градиентов в ионосфере, что позволяет производить сопоставление с её регулярными изменениями. Иркутский ионозонд DPS-4 относится к последнему поколению

устройств такого типа. Он снабжен программой автоматической обработки данных ARTIST-5 (Кузьмин и др., 2012), которая обеспечивает получение основных ионосферных параметров каждые 15 мин.

Третьим пунктом регистрации является низкочастотная обсерватория (НЧО) Радиоастрономического института, расположенная под Харьковом в точке с координатами 49°56'0.5" с.ш., 36°57'10" в.д., где расположен УНЧ-СНЧ магнитометр, работающий в диапазоне частот 0.1–40 Гц. На НЧО отсутствует станция ионосферного зондирования, но это частично компенсируется наличием GPS-ТЕС приемника, позволяющего оценивать полное электронное содержание над пунктом. Магнитометр НЧО (Пазнухов и др., 2010) разработан и изготовлен специалистами Радиоастрономического института. Отметим, что все три используемых магнитометра производят измерения магнитного поля в абсолютных единицах, снабжены GPS-системами синхронизации с абсолютным временем и имеют сходные характеристики, что позволяет сопоставлять получаемые данные. Магнитные датчики везде ориентированы вдоль географических направлений юг–север и запад–восток.

Нами была выполнена сквозная обработка УНЧ-СНЧ данных для всех трёх пунктов наблюдения. Проводилась спектральная обработка данных, в ходе которой для компонент ЮС (x) и ЗВ (y) строились «мгновенные» спектры сигналов с частотным разрешением 0.1 Гц (длительность реализации 10 сек):

$$s_{x,y}(f) = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} B_{x,y}(t) e^{-i2\pi ft} dt .$$

Далее «мгновенные» спектры использовались для расчета средних энергетических S_{xx} , S_{yy} и взаимных спектров S_{xy} , вычисляемых с разрешением по времени в 10 мин. (усреднение 60-ти «мгновенных» спектров). Энергетические спектры, а также модуль и фаза взаимных спектров использовались для расчета поляризационных параметров сигнала по методике, изложенной в статье (Колосков и др., 2005). В данной работе мы не будем останавливаться на исследовании поляризационных характеристик сигналов, а сосредоточимся на анализе наблюдаемости и средней разности собственных частот РСС – величине dF . Для вычисления этих величин использовался следующий алгоритм. На первом этапе строились суточные спектрограммы сигналов для каждого поляризационного канала. Затем при помощи созданной нами специальной компьютерной программы оператор вручную выделял линии РСС, которые автоматически оцифровывались. Далее данные для резонансных мод с идентичными номерами усреднялись для различных поляризационных каналов (если РСС присутствовали только в одном канале, то усреднения не происходило и использовались данные только этого канала). Затем значения усредненной резонансной частоты применялись для расчета dF . Кроме того, фиксировался факт наличия ИАР. Считалось, что ИАР обнаружен, когда в спектре присутствует три либо больше резонансных максимума. Кроме того, мы оценивали величину критической частоты слоя F2 ионосферы – f_0F2 по данным ионозондов. Таким образом, для каждого 10-минутного интервала нами определялись 3 параметра: dF , f_0F2 и факт наличия РСС.

3. Сравнительная морфология поведения ИАР

Ранее нами была исследована морфология сигналов ИАР по данным анализа на УАС (Колосков и др., 2012). С появлением данных, полученных на НЧО и в Саянской обсерватории, появилась возможность провести сравнительный анализ морфологии. Для всех пунктов в поведении параметров ИАР наблюдаются идентичные, четко выраженные

сезонные и суточные зависимости. На рис. 1 такие зависимости представлены для вероятности регистрации ИАР. Максимум вероятности регистрации приходится на локальную полночь, минимум – на полдень. Наблюдается плавное изменение вероятности в течение суток. Начало возрастания и спада зависит от захода (восхода) Солнца над пунктом наблюдения. Также отмечается чётко выраженная зависимость вероятности регистрации по сезонам. Локальной зимой она очень высока и практически не зависит от времени суток. Весной резко падает и в полуденные часы ИАР не наблюдаются, летом резонансная структура видна только иногда в ночные часы. Осенью вероятность регистрации достаточно велика, но есть отчетливая зависимость между ночными и дневными часами. Есть и различия между пунктами наблюдения. Зимой вероятность регистрации на НЧО значительно ниже, чем на других станциях. Летом же наименьшая вероятность регистрации наблюдается на УАС (Рис. 1-3, 5-7 см. на цв. вклейке между 182 и 183 стр.).

Суточная зависимость dF , представленная на рис. 2, характеризуется плавным ростом с вечера к утру и быстрым уменьшением dF до минимума вблизи местного полдня. Так же, как и для вероятности регистрации, для dF имеет место сезонная зависимость: локальной зимой величина dF максимальна, затем происходит уменьшение к лету и увеличение осенью. Суточное поведение dF качественно схоже в каждом из пунктов. Также сопоставима величина dF . Единственное отличие приходится на локальное лето, когда на Антарктическом полуострове наблюдается аномалия в поведении критических частот: ночью они выше, чем днём (Pavlov et al., 2009). Из-за этого величина dF оказывается ниже.

Ранее нами (Колосков и др., 2012) были обнаружены моды ИАР на частотах выше 10 Гц, которые регистрировались на УАС и НЧО в различное время. На рис. 3 приведена гистограмма регистрации подобных РСС на трёх станциях по месяцам. На ней видно, что частота появления ИАР выше 10 Гц для каждой из станций различна. Даже на НЧО и Саянской обсерватории, несмотря на схожее сезонное поведение регистрации «высокочастотной» РСС в одно и то же время, они наблюдаются менее чем в 20% случаев. Таким образом, нами получено статистическое количественное подтверждение того предположения, что характеристики ИАР зависят в большей мере не от глобальных ионосферных условий, а от состояния ионосферы над пунктом наблюдения.

Анализ связи параметров ИАР с геомагнитной активностью в целом подтвердил описанную в литературе (Belyaev et al., 2000) обратную зависимость между вероятностью регистрации и k -индексом геомагнитной активности (см. рис. 4а).

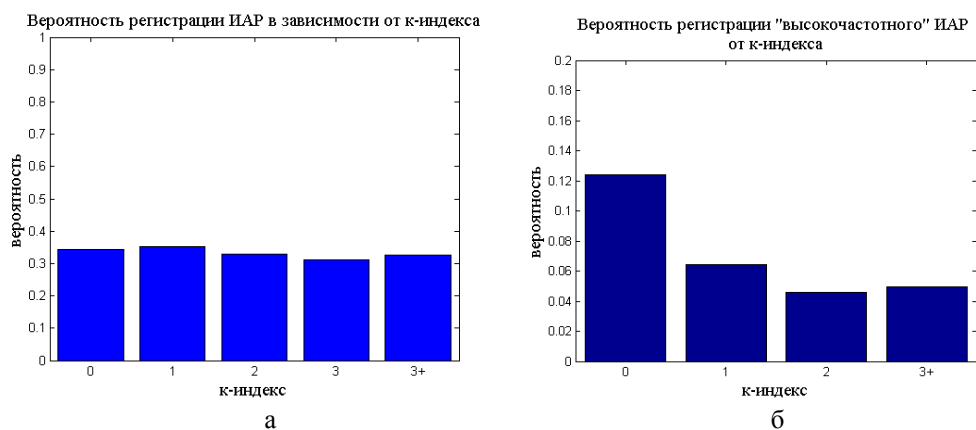


Рис. 4. Зависимость вероятности регистрации ИАР от k -индекса магнитной активности. а) регистрация РСС независимо от частотного диапазона, б) случаи регистрации «высокочастотной» РСС.

Однако, по данным наших наблюдений, эта связь выражена менее существенно, чем описано в литературе. В то же время если посмотреть на подобное распределение для «высокочастотных» мод РСС (рис. 4б), то наблюдается четкая обратная зависимость: чем выше k -индекс, тем ниже вероятность регистрации ИАР. Однако следует иметь в виду, что 2010 год не был годом солнечного максимума, поэтому целесообразно в будущем повторить данный анализ для сезона максимума солнечной активности.

Детальный анализ данных позволил обнаружить эффект расщепления линий РСС, не описанный в известной авторам литературе. На рис. 5 показана спектрограмма, на которой выделены моменты расщепления 2-го, 3-го и 4-го спектральных максимумов ИАР. Этот эффект достаточно хорошо выражен только для Саянской обсерватории. Явление заключается в расщеплении резонансных максимумов на два сателлита, которое возникает в вечерние часы. На представленном примере выделены РСС и отмечены моменты расщепления. Один резонансный максимум расщепляется на два, расстояние между которыми плавно растёт до величины порядка $dF/2$. После чего сателлиты начинают сближаться. Резонансные максимумы меньшего порядка обычно расщепляются раньше, чем более высокого порядка. Имеет место сезонная зависимость этого явления: оно характерно для зимы и отсутствует летом.

В настоящее время нами выполняется накопление экспериментального материала и изучение морфологии эффекта расщепления с целью интерпретации физического механизма и построения модели данного явления.

4. Методика оценки критической частоты слоя F2

В статье (Колосков и др., 2012) нами была исследована связь между разностью собственных частот РСС dF с критической частотой слоя F2 – f_0F2 и разработана методика оценки критической частоты, основанная на феноменологической модели ИАР и эмпирической зависимости f_0F2 от dF . К настоящему времени мы имеем синхронные данные о характеристиках ионосферы и параметрах РСС еще из одного пункта – Саянской обсерватории. Это позволило обобщить формулы расчета критической частоты для произвольного пункта наблюдения, в котором известна средняя величина полного вектора геомагнитного поля $\langle B_0 \rangle$. Для выполнения такого обобщения рассмотрим зависимость (7) статьи (Колосков и др., 2012) и введем в неё масштабный коэффициент α . Это позволяет записать следующее выражение для величины dF :

$$dF = \alpha / f_0 F 2 . \quad (1)$$

Теперь учтем, что альфвеновский показатель преломления обратно пропорционален $\langle B_0 \rangle$ над точкой наблюдения (формула (2) из (Колосков и др., 2012)), вследствие чего получаем, что $\alpha \sim \langle B_0 \rangle$ и, соответственно, будет разным в разных пунктах. Далее оценим величину α по экспериментально полученным зависимостям критической частоты от dF для обоих пунктов наблюдения и проверим, насколько точно выполняются эти соотношения. Для выполнения расчетов массив критических частот был разбит по диапазонам расстояний между максимумами РСС с шагом 0.1 Гц. Критические частоты для каждого диапазона dF усреднялись. Далее график строился в координатах $1/dF - f_0F2$. В полученную кривую с помощью метода наименьших квадратов вписывалась прямая, проходящая через начало координат, по наклону которой определялся коэффициент α . Для Саянской обсерватории он оказался равен $\alpha_{Irk} = 3,45$, а для УАС $\alpha_{UAS} = 2.2$. Далее для уравнения данной прямой делалась обратная замена переменных. Результирующие экспериментальные зависимости и вписанные модельные кривые представлены на рис. 6.

Запишем теперь средние величины векторов магнитного поля над УАС $\langle B_{0,UAS} \rangle = 34156$ нТл и над Саянской обсерваторией $\langle B_{0,Irk} \rangle = 51418$ нТл за 2010-й год (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>). Исходя из проведенного выше анализа, в соответствии с феноменологической моделью ИАР соотношение величин средних магнитных полей над пунктами должно равняться отношению коэффициентов α . По результатам анализа данных на УАС и Саянской обсерватории это соотношение выполняется с точностью порядка 4.2%, что подтверждает адекватность модели и возможность использования формулы (1) для оценки величин критических частот над произвольным пунктом наблюдения ИАР, для которого известна величина среднего геомагнитного поля.

Для проверки качества восстановления критической частоты слоя F2 по модельной формуле (1) нами были выполнены оценки f_0F2 над УАС и Саянской обсерваторией, которые сравнивались с данными ионосферного зондирования. Расчеты проводилось за период с конца локальной осени по начало весны. Как видно из рис. 1, данный период характеризуется максимальной вероятностью регистрации ИАР. На рис. 7 приведены характерные примеры такого восстановления за несколько дней для каждой из станций.

Видно, что абсолютного совпадения в деталях получить не удалось. Однако для оценки средней величины и суточного хода критической частоты F2 области ионосферы соответствие можно признать удовлетворительным.

5. Выводы

Наличие длительных синхронных массивов данных с Саянской обсерватории и НЧО позволило более подробно изучить морфологию поведения ИАР. Проведён сравнительный анализ данных регистрации РСС с целью поиска и выделения локальных особенностей параметров резонанса, а также исследована их связь с состоянием геокосмоса. Показано, что качественно сезонно-суточное поведение характеристик ИАР одинаково во всех пунктах. Синхронный анализ параметров ИАР и локальных индексов геомагнитной активности «к» подтвердил описанную в литературе обратную зависимость для наблюдаемости РСС. Показано, что такая зависимость выражена лучше для «высокочастотных» мод РСС, чем для всех случаев наблюдения резонансов независимо от частотного диапазона. Продемонстрировано, что альфвеновский резонанс зависит в большей степени от локальных характеристик среды над пунктами наблюдений, а не от глобального состояния ионосферы. Экспериментально обнаружено новое явление – расщепление линий максимумов ИАР – и начато изучение его морфологических особенностей.

Получила дальнейшее развитие разработанная нами ранее методика оценки одного из основных ионосферных параметров – критической частоты ионосферного слоя F2 – f_0F2 по данным наблюдения ионосферного альфвеновского резонанса. Этот алгоритм обобщен нами для произвольного пункта измерений УНЧ-ННЧ полей, для которого есть информация о средней величине вектора магнитного поля. Таким образом, методика позволяет проводить оценку f_0F2 при наличии в пункте наблюдений только магнитометра, без установки ионозонда. Конечно, данный способ диагностики не может в полной мере заменить результаты ионосферного зондирования. Во-первых, восстанавливаемые значения критической частоты не отражают всех мелких деталей ее суточного хода. Во-вторых, восстановление возможно только во время регистрации РСС, которые даже в зимнее время не наблюдаются круглосуточно. Тем не менее такая диагностика представляется нам полезной. Отметим также, что точность оценки частоты по данным ИАР возрастает для малых величин f_0F2 в ночное время, когда погрешности при обработке ионограмм увеличиваются.

Авторы выражают признательность сотрудникам Национального антарктического научного центра (НАНЦ), зимовщикам-геофизикам, специалистам РИ НАНУ и ИСЗФ за квалифицированную работу по обслуживанию приемных установок в Антарктике, Украине и России, что обеспечило высокое качество данных. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НАНЦ в рамках НТР "Антей" 0113U004571, а также НИР "Ятаган-2" 0111U000063 и "Шпицберген-2013" 0113U002656.

Список литературы

В.Г. Безродный, О.В. Буданов, А.В. Колосков и др. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне. *Космічна наука та технологія*. Т. 9. N 5/6. 2003. стр. 117–123.

П.П. Беляев, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт и др. Теория формирования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. *Известия высших учебных заведений*, 1989, т. 32, № 7, стр. 802–810.

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 высших учебных заведений*, 1989, т. 32, № 6, стр. 663–672.

А.В. Колосков, Н.А. Бару. Определение критической частоты F-слоя по данным наблюдений ионосферного альфвеновского резонанса. *Украинский антарктический журнал*, 2011-2012, № 10-11, стр. 114–120.

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, 10, № 1, с. 11–29.

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.

А.В. Кузьмин, А.С. Канаев. Средства вертикального радиозондирования ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. Выпуск 2, 2012, 72–82 с.

П.В. Медникова. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука. 1977. 342 с.

А.А. Остапенко, С.В. Поляков. Динамика коэффициента отражения альфвеновских волн диапазона Pc1 от ионосферы при вариациях электронной концентрации нижней ионосферы. *Геомагнетизм и Аэронаука*, т. 30, №1, 1990, стр. 50–56.

В.Е. Пазухов, О.В. Буданов, А.Г. Рохман и др. Приемно-измерительный комплекс СНЧ диапазона с УКВ ретранслятором. *Радиофизика и Радиоастрономия*, 2010, т. 15, № 1, стр. 31–41.

С.В. Поляков, В.О. Рапопорт. Ионосферный Альфвеновский Резонатор. *Геомагнетизм и Аэронаука*, 1981, т. 21, стр. 816–822.

P.P. Belyaev, T. Businger, S.V. Isaev et al. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator. *Journal of geophysical research*, vol. 104, #A3, pp. 4305–4317, 1999.

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* 62, 2000, pp. 239–248.

T. Businger, C. Haldoupis, P.P. Belyaev et al. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station ($L = 1.3$). *Journal of geophysical research*, vol. 107, #A10, 1281, 2002.

A.G. Demekhov, P.P. Belyaev, S.V. Isaev et al. Modelling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc 1 frequency range. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62 (2000) 257±265

M.G. Kivelson and D.J. Southwood. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances. *J. Geophys. Res.*, 1986, vol. 91, 4345.

Н.А. Бару: ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНОГО АЛЬФВЕНОВСКОГО ...

A.V. Pavlov and N.M. Pavlova, Anomalous variations of $NmF2$ over the Argentine Islands: a statistical study. *Annales Geophysicae*, #27, pp. 1363–1375, 2009.

G. Satori, E. Williams, V. Mushtak. Response of the Earth–ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V 67, No. 6, 2005, pp. 553–562.

Shi Run, Zhao Zheng-Yu, Zhang Bei-Chen, Study of the influence of IAR on geomagnetic signal observed on the ground. *Chinese journal of geophysics*, V.53, # 5, 2010, pp. 693–793.