

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО РАЗНОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ИОНОСФЕРНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

*Выполнена обработка данных наблюдений ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР), полученных синхронно в Антарктиде на Украинской антарктической станции и в России вблизи г. Иркутск. За несколько лет наблюдений восстановлены параметры ИАР, проанализированы их суточные и сезонные зависимости и случаи регистрации резонансов в частотном диапазоне выше 10 Гц. Проведено сопоставление данных с результатами ионосферного зондирования и подтверждена связь параметров ИАР с характеристиками околосредней плазмы над пунктами наблюдений. В рамках простой феноменологической модели ИАР разработана методика оценки критической частоты ионосферного слоя F2 по значению средней разности частот между соседними модами альфвеновского резонанса. Методика апробирована на данных наблюдений, выполненных в обеих приемных позициях, и позволяет производить оценку критической частоты над произвольным пунктом земной поверхности, где выполняется мониторинг ИАР.*

*Ключевые слова:* ионосферный альфвеновский резонатор, критическая частота

### 1. Введение

Ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР) – это резонансная система для альфвеновской моды магнитогидродинамических волн, локализованная в области верхней ионосферы. Верхняя граница ИАР соответствует высотам с большим градиентом альфвеновской скорости, возникающим вследствие быстрого уменьшения плотности плазмы выше максимума слоя F. На нижней границе резонатора, на высотах E-области ионосферы, характеризующихся максимальными значениями педерсеновской и холловской проводимостей [1, 2], альфвеновские волны трансформируются в электромагнитные и формируют резонансные структуры спектра (РСС) в УНЧ–СНЧ диапазоне, которые могут быть зарегистрированы магнитометром, расположенным на поверхности Земли. Возможность существования в ионосфере резонансной системы для альфвеновских волн была впервые предсказана теоретически в работе [1], авторы которой оценили также верхнюю границу частотного диапазона РСС в 1 Гц. Впоследствии эта оценка была повыше-

на до 10 Гц [2] и подтверждена результатами наблюдений [3]. Отметим, что до настоящего момента теоретические и экспериментальные исследования ИАР в большинстве случаев были ограничены полосой частот 0.1–10 Гц. В литературе имеется достаточно большое количество свидетельств наблюдений ИАР в низких [4], средних [3] и высоких широтах [5], а также в нескольких пространственно разнесенных пунктах [6, 7]. Основными характеристиками, которыми принято описывать РСС, являются вероятность их регистрации и собственные частоты резонансных линий. Морфология поведения этих параметров анализировалась многими авторами в зависимости от времени суток и сезона года [3, 8, 9], уровня возмущенности геомагнитного поля [8, 10, 11] и фазы 11-летнего цикла солнечной активности [9, 12].

Данные измерений демонстрируют также явную зависимость характеристик РСС (в первую очередь значений резонансных частот) от параметров околосредней плазмы, причем основной вклад вносит участок ионосферы непосредственно над пунктом наблюдения [3, 8]. Таким образом, мониторинг параметров РСС потенциально может быть использован для ионосферной диаг-

ностики, на что указывают, например, авторы статьи [5]. В настоящей работе нами выполнен сравнительный анализ характеристик РСС, восстановленных по записям магнитометров, и параметров ионосферы над пунктами наблюдений, полученных ионозондами. Используются данные систематических длительных регистраций в двух значительно разнесенных в пространстве пунктах, расположенных в регионе Антарктического полуострова и вблизи г. Иркутск (Россия). В рамках феноменологической модели ИАР показана возможность определения критической частоты слоя F2 ионосферы –  $f_oF2$ , по измеряемой в эксперименте средней разности резонансных частот РСС и получена простая формула для расчетов. Предложенная методика апробирована для обеих приемных позиций, что подтверждает возможность оценивать  $f_oF2$  над произвольным пунктом, где выполняются систематические наблюдения ИАР.

## 2. Данные наблюдений и результаты первичной обработки

Мониторинг ИАР выполнялся синхронно на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский” (УАС) ( $65^{\circ}15'$  ю. ш.,  $64^{\circ}16'$  з. д.) и на магнитной станции Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (далее Саянская обсерватория) вблизи Иркутска ( $51^{\circ}16'$  с. ш.,  $100^{\circ}55'$  в. д.). Отметим, что пункты расположены в разных полушариях, а пространственный разнос между ними составляет 18270 км. Наблюдения проводились с помощью индукционных магнитометров, разработанных Львовским центром Института космических исследований НАН и НКА Украины <[www.isr.lviv.ua](http://www.isr.lviv.ua)>. Оба прибора имеют сходные характеристики и снабжены двумя идентичными каналами регистрации, позволяющими измерять вариации ортогональных горизонтальных компонент магнитного поля. Магнитные антенны устройств ориентированы в направлениях юг–север и запад–восток в географической системе координат. На УАС установлен магнитометр Lemi-112A с частотным диапазоном  $0.03 \div 300$  Гц [13]. В Саянской обсерватории размещен магнитометр Lemi-30, работающий в диапазоне частот  $0.001 \div 40$  Гц <<http://www.isr.lviv.ua/lemi30.htm>>. Для обоих устройств данные синхронизируются

с мировым временем (UTC) при помощи GPS приемников.

Вблизи пунктов наблюдения находятся также ионозонды, которые применялись для получения информации о параметрах ионосферы. На УАС на расстоянии около 0.5 км от магнитометра расположена ионосферная станция IPS-42, модернизированная для цифрового представления ионограмм. Сканирования выполняются раз в 15 мин. Обработка данных производится оператором при помощи специального программного обеспечения UACIDES по методике URSI [14]. В Иркутске установлен цифровой ионозонд DPS-4. Данные снимаются также раз в 15 мин. Обработка ионограмм происходит в автоматическом режиме с помощью стандартного программного обеспечения “Артист-5тм” [15]. Ионозонд расположен на расстоянии порядка 200 км от Саянской обсерватории. Таким образом, для обоих пунктов наблюдения доступна информация об основных параметрах ионосферы с временным разрешением 15 мин.

Рассмотрим теперь методику обработки магнитометрических данных. Суточные записи в каналах юг–север и запад–восток разбивались на участки длительностью по 10 мин, для каждого из которых рассчитывались средние энергетические спектры. Усреднялись шестьдесят элементарных спектров, вычисленных по 10-секундным интервалам, что обеспечивало спектральное разрешение 0.1 Гц. Далее строились суточные спектрограммы, по которым определялись собственные частоты ИАР. Для этого оператор при помощи специально созданного компьютерного программного обеспечения выделял линии, соответствующие максимумам ИАР в каждом из каналов регистрации. После чего происходило усреднение собственных частот резонансных мод с одинаковым номером из разных каналов. Если резонансная мода с данным номером была зарегистрирована только в одном канале, то ее частота сохранялась без усреднения. Резонанс считался зарегистрированным, если можно было выделить 2 или более спектральных максимума, образующих РСС. Таким образом, для каждого 10-минутного интервала восстанавливались такие характеристики ИАР, как наличие резонансных максимумов в спектре и собственные частоты. Посколь-

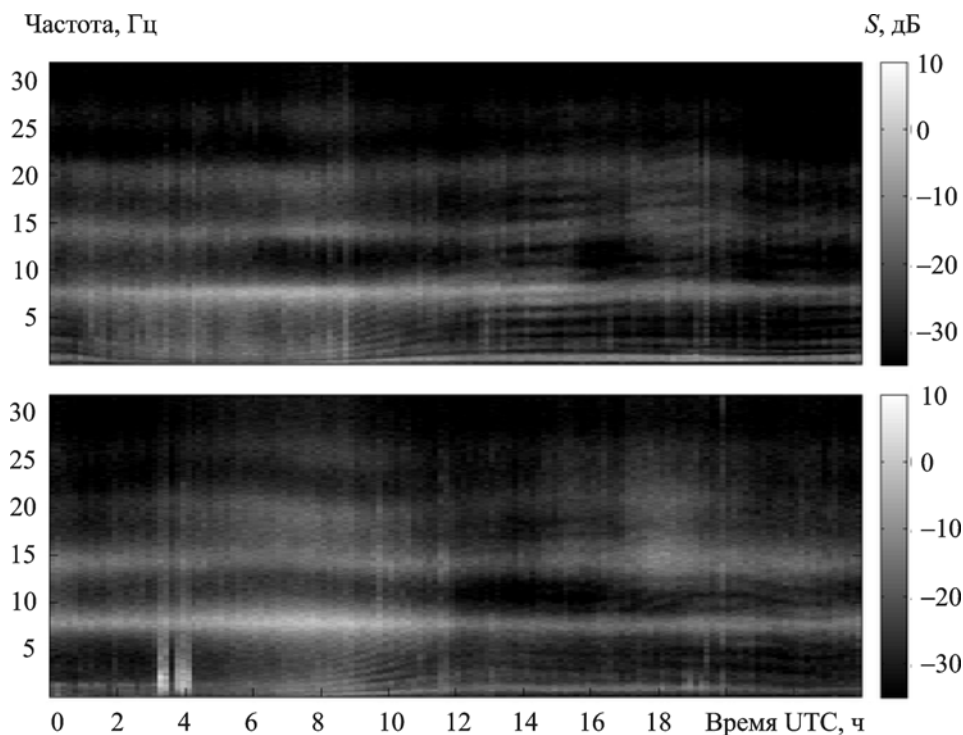
ку порядковый номер моды не всегда удавалось идентифицировать, для анализа мы использовали величину  $\Delta F$ , равную средней разности частот между соседними модами ИАР. Отметим также, что  $\Delta F$  рассчитывается путем усреднения по всем выделенным модам ИАР, поэтому определяется точнее, чем каждая резонансная частота в отдельности.

В представленной работе были обработаны данные, полученные в Антарктиде в 2008, 2010 гг. и в Саянской обсерватории в 2010–2011 гг. Наличие длительных непрерывных массивов данных позволило изучить общие закономерности поведения ИАР [6, 8]. Для обоих пунктов наблюдаются идентичные четко выраженные сезонные и суточные зависимости в поведении параметров ИАР. РСС фиксируются в основном ночью, днем реже. Максимум вероятности регистрации приходится на локальную полночь. Вероятность регистрации зависит от сезона года: наибольшая вероятность регистрации приходится на локальную зиму, тогда как локальным летом происходит резкий ее спад. Суточная зависимость  $\Delta F$  характеризуется плавным ростом с вечера к утру и быстрым уменьшением  $\Delta F$  до

минимума вблизи местного полудня. Как и для вероятности регистрации, для  $\Delta F$  имеет место сезонная зависимость: локальной зимой  $\Delta F$  максимальна, затем происходит уменьшение к лету и увеличение осенью.

Мы выявили также случаи регистрации РСС на частотах выше 10 Гц (см. рис. 1). Отметим, что данная частота многими авторами [3, 16] рассматривается как верхняя граница диапазона наблюдаемости ИАР. За время наблюдений было зафиксировано 139 таких событий. Как показали результаты анализа [6], вероятность наблюдать РСС на высоких частотах увеличивается в магнитоспокойных условиях. Однако одновременно в обоих пунктах подобные РСС были зарегистрированы всего два раза. Такая несинхронность, по нашему мнению, означает, что влияние глобальных факторов тут не является определяющим, и свидетельствует о том, что свойства ИАР зависят в основном от состояния ионосферы над пунктом наблюдения.

Наличие ионозондов вблизи пунктов регистрации позволило сопоставить выявленные закономерности поведения параметров РСС с критической частотой ионосферного слоя F2 –  $f_oF2$ .



**Рис. 1.** Спектрограмма за 09.12.2010 г., полученная в Саянской обсерватории. Спектральная плотность  $S$  сигнала отображается в оттенках серого и представлена в децибелах. На верхней панели представлены данные регистрации в канале юг–север, на нижней – в канале запад–восток. В канале юг–север с 12:00 по 24:00 UTC наблюдаются РСС на частотах выше 10 Гц

Критическая частота ионосферы была выбрана для анализа, поскольку возможность ее оценки по наблюдениям ИАР представляет значительный практический интерес. С другой стороны, от частоты  $f_oF2$  зависит альфвеновский показатель преломления (см. [1–3]), и поэтому она должна существенно влиять на значения собственных частот ИАР. Проведенный анализ продемонстрировал, что как вероятность регистрации РСС, так и  $\Delta F$  находятся в противофазе с  $f_oF2$ . Наиболее показательной и хорошо оцениваемой количественно оказалась зависимость величины  $\Delta F$  от критической частоты слоя F2 ионосферы. Эта связь четко прослеживается на графиках сезонной (рис. 2, а) и суточной (рис. 2, б) зависимостей критической частоты слоя F2 ионосферы (сплошные кривые) и частотного разнеса между максимумами РСС (пунктирные кривые).

Наличие явной зависимости между величинами  $\Delta F$  и  $f_oF2$  позволило нам поставить задачу об оценке критической частоты слоя F2 по данным наблюдений РСС.

### 3. Методика оценки критической частоты слоя F2 и анализ полученных результатов

Рассмотрим простую феноменологическую модель ИАР. Согласно [3, 17] можно написать следующее выражение для определения разницы частот между соседними резонансными максимумами ИАР  $\Delta F$ :

$$\Delta F = \frac{c}{2n_A L}. \quad (1)$$

Здесь  $c$  – скорость света;  $L = h + l$  – линейный размер резонатора, определяемый толщиной главного ионосферного максимума  $h$  и характерным масштабом резонатора в верхней ионосфере до высот быстрого спада альфвеновского показателя в протоносфере  $l$ ;  $n_A$  – альфвеновский показатель преломления,

$$n_A = \frac{c\sqrt{4\pi\rho}}{B_0} \propto \frac{\sqrt{M_{eff}N_e}}{B_0}, \quad (2)$$

где  $B_0$  – напряженность магнитного поля Земли,  $\rho$  и  $N_e$  – плотность плазмы и электронная кон-

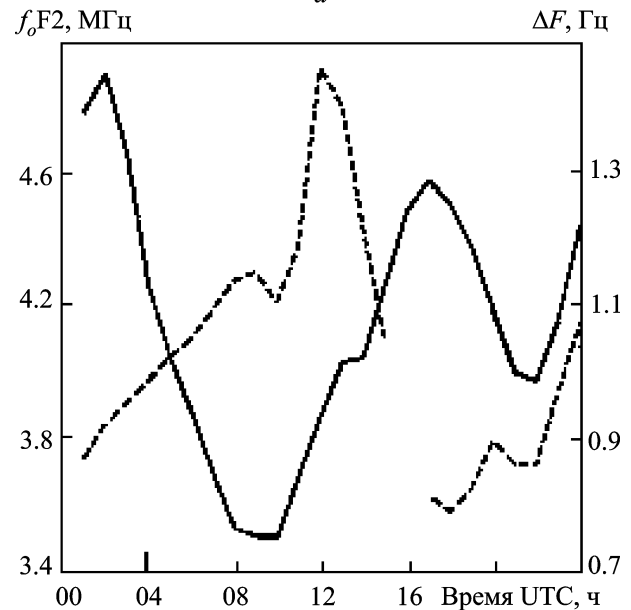
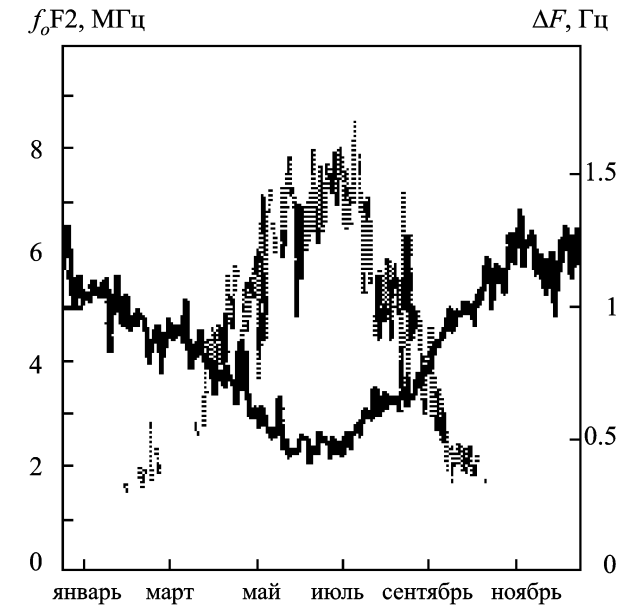


Рис. 2. Полученные на УАС временные зависимости для величин  $\Delta F$  (пунктирные кривые) и  $f_oF2$  (сплошные кривые): а – за 2010 г., б – среднесуточный график

центрация,  $M_{eff}$  – эффективная масса ионов. Для упрощения дальнейших выкладок, следуя [3], будем считать, что электронная концентрация в ионосферном слое толщиной  $L$  не зависит от высоты и равна электронной концентрации в максимуме слоя F2 –  $N_{e\max}$  (т. е. ионосфера является однородной). Учтем также, что электронная концентрация является квадратичной функцией от плазменной частоты  $f_p$  [18]:

$$N_e = 0.0124 f_p^2. \quad (3)$$

Для электронной концентрации в максимуме слоя F2 можно написать следующее простое выражение:  $N_{e\max} = 0.0124(f_oF2)^2$  [18]. Таким образом, учитывая (2) и (3) и предполагая, что ионосферная плазма является однокомпонентной, получаем

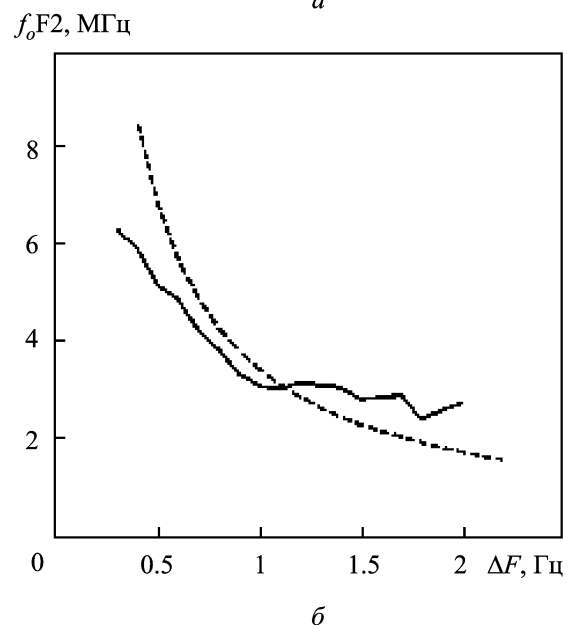
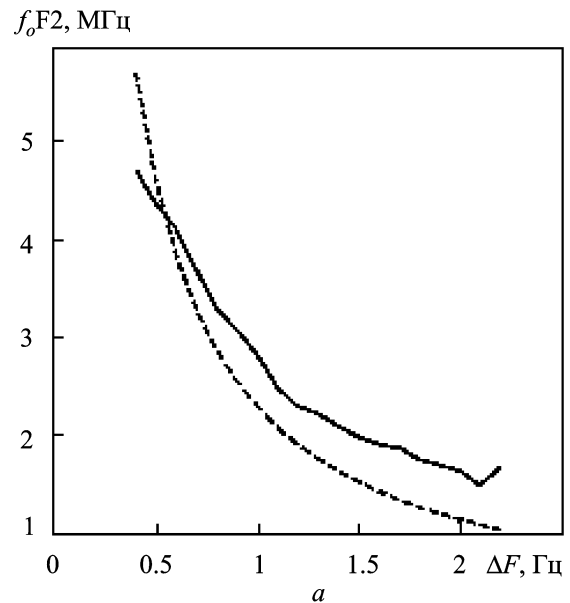
$$n_A \propto \frac{f_oF2}{B_0}. \quad (4)$$

Если считать, что линейные размеры резонатора меняются слабо, то, учитывая формулы (1)–(4), получим, что критическая частота слоя F2 обратно пропорциональна разнице частот между соседними резонансными максимумами. Откуда можно записать простое выражение для оценки критической частоты слоя F2 по измеряемым в эксперименте значениям  $\Delta F$ :

$$f_oF2 = \alpha / \Delta F. \quad (5)$$

Коэффициент  $\alpha$  может быть найден по определяемой из наблюдений зависимости  $f_oF2$  от  $\Delta F$ . Отметим, что поскольку альфвеновский показатель преломления обратно пропорционален среднему значению напряженности магнитного поля Земли в ионосфере над точкой наблюдения (2), коэффициент  $\alpha \sim B_0$  и будет различным для разных пунктов регистрации.

Экспериментальные зависимости  $f_oF2$  от  $\Delta F$ , измеренные на УАС и в Саянской обсерватории, представлены на рис. 3, а и рис. 3, б соответственно сплошными линиями. При получении экспериментальных зависимостей для каждого 10-минутного интервала, когда была зарегистрирована РСС, восстанавливались пары значений  $\Delta F$  и  $f_oF2$ . Далее весь массив записей был поделен на диапазоны по величине  $\Delta F$  с шагом 0.1 Гц. Значения  $f_oF2$ , попавшие в один такой диапазон, усреднялись. Затем в экспериментальную зависимость вписывалась модельная кривая, рассчитанная по формуле (5). Для этого график зависимости  $f_oF2$  от  $\Delta F$  был построен в координатах  $1/\Delta F$  и  $f_oF2$ , а потом методом наименьших квадратов аппроксимирован прямой, проходящей через начало координат. После чего была сделана обратная замена переменных и определены



**Рис. 3.** Зависимости критической частоты  $f_oF2$  от  $\Delta F$  (сплошные кривые) по результатам анализа данных ИАР, полученных на УАС с апреля по август 2010 г. (а) и в Саянской обсерватории с ноября 2010 г. по март 2011 г. (б). Пунктирными линиями показаны модельные кривые  $f_oF2 = \alpha / \Delta F$

значения искомого коэффициента  $\alpha$  для кривой, описываемой выражением (5). Такая процедура была выполнена для данных, полученных на УАС. Коэффициент оказался равен  $\alpha_{UAS,2010} = 2.2$ , что позволило записать следующее выражение:

$$f_oF2_{UAS} = 2.2 / \Delta F_{UAS}. \quad (6)$$

При помощи формулы (6) было проведено восстановление критической частоты по результатам анализа ИАР. Для проверки разработанной методики сопоставлен временной ход критической частоты, рассчитанной по величине  $\Delta F$ , и ход частоты, измеренной ионозондом. Сопоставление проводилось для наиболее благоприятных, с точки зрения наблюдения ИАР, интервалов времени, когда вероятность регистрации РСС максимальна. Для УАС это апрель–август 2010 г., с заката до восхода (00:00–10:00 UTC, 18:00–24:00 UTC). На рис. 4 представлены результаты сравнения за несколько дней этих периодов. Критическая частота по данным ионозонда обозначена сплошной кривой, восстановленная по формуле (6) – пунктирной линией. Как видно из рисунка, полного количественного соответствия получить не удалось. Различия проявляются в основном при низких значениях  $\Delta F$ , когда модельная кривая выходит за пределы доверительных интервалов экспериментальной. Средняя относительная ошибка оценки для всего интервала анализа  $f_oF2$  составляет 14 %. Она рассчитывалась как отношение среднеквадратического отклонения разности значений критической частоты по данным ионозонда и частоты, восстановленной по результатам анализа ИАР, к среднему значению критической частоты по данным ионозонда. Такое соответствие можно считать удовлетворительным, а методику пригодной для оценки значения критической частоты ионосферы.

Аналогичная процедура была проделана для данных, полученных в Саянской обсерватории. Экспериментально определенный коэффициент в формуле (5) оказался равен  $\alpha_{Irk,2010-2011} = 3.45$ . В то же время коэффициент  $\alpha$  может быть оценен другим образом через значения напряженностей магнитных полей над пунктами наблюдения. Действительно, исходя из формул (4)–(5) отношение полных векторов магнитного поля  $B_0$  для двух пунктов наблюдения должно равняться отношению коэффициентов пропорциональности  $\alpha$  в этих пунктах. Зная магнитное поле над УАС и Саянской обсерваторией, можно рассчитать  $\alpha_{Irk,2010-2011}$  по значению  $\alpha_{UAS,2010}$ . Средние за год значения полного вектора геомагнитного поля на высоте 300 км над этими пунктами были рассчитаны согласно модели IGRF11 с использованием онлайн калькулятора <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>> и составили 51418 нТл в Саянской

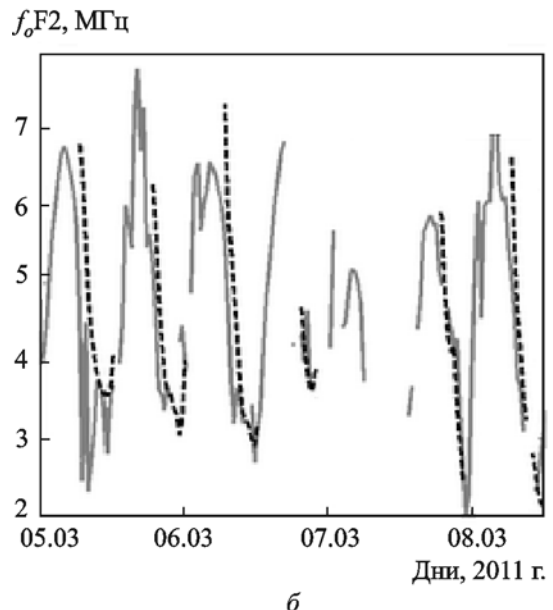
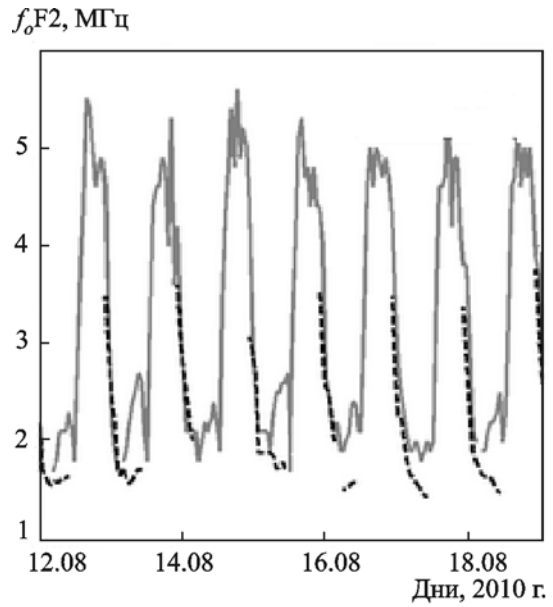


Рис. 4. Временной ход критической частоты слоя F2 по данным ионозонда (сплошные кривые) и восстановленной по модельному приближению (пунктирные линии) за несколько дней 2010 г. для УАС (а) и 2011 г. для Саянской обсерватории (б)

обсерватории и 34156 нТл на УАС. Расчеты  $\alpha_{Irk,2010-2011}$  по соотношению напряженностей магнитных полей дали значение 3.31, что очень близко к значению коэффициента  $\alpha_{Irk,2010-2011} = 3.45$ , вычисленному ранее непосредственно по данным наблюдений. Этот факт подтверждает адекватность использованной в работе модели и показывает, что возможно рассчитать коэффициент про-

порциональности в формуле (5) для произвольно-го пункта наблюдения. Для оценки критической частоты слоя F2 над Саянской обсерваторией будем использовать значение коэффициента пропорциональности, рассчитанное по соотношению магнитных полей,  $\alpha_{Irk,2010-2011} = 3.31$ . Результаты расчетов, совместно с данными, полученными с помощью ионозонда, представлены на рис. 4, б. Относительная ошибка восстановления  $f_oF2$  составляет 18 %. Сравнение, как и для УАС, проводилось для интервалов времени, когда вероятность регистрации ИАР максимальна. Для Саянской обсерватории это период с ноября 2010 по март 2011 г., с захода до восхода (10:00–24:00 UTC). Полученное значение ошибки больше, чем на УАС. Однако это может быть связано не только с неточностью использованной феноменологической модели, но и с относительно большим расстоянием между магнитометром и ионозондом – 200 км.

С целью проверки работоспособности разработанной методики оценки  $f_oF2$  модельные кривые, полученные на УАС в 2010 г., были использованы для расчетов критической частоты по массиву данных 2008 г. Результаты этих вычислений представлены на рис. 5 вместе с данными, полученными с помощью ионозонда. Сравнение проводилось за период апрель–август 2008 г. Относительная ошибка измерений составила 15 %. Это значение сравнимо с аналогичным, полученным для данных 2010 г. Таким образом, коэффициенты для модельной кривой (5), рассчитанные по данным для одного года, можно использовать для данных других лет.

Понятно, что предложенный метод не может заменить традиционные способы ионосферной диагностики. Так, определение значений критической частоты может выполняться не круглосуточно, а только во время существования РСС, т. е. преимущественно локальной ночью. Кроме того, можно говорить лишь об оценке  $f_oF2$ , поскольку точность ее восстановления оказывается меньшей, чем в измерениях с помощью ионозонда. К достоинствам разработанной методики можно отнести отсутствие ограничений на минимальное значение оцениваемой критической частоты, что позволяет определять  $f_oF2$ , меньшие 2 МГц, которые не всегда фиксируются ионозондом. Предлагаемая методика является так-

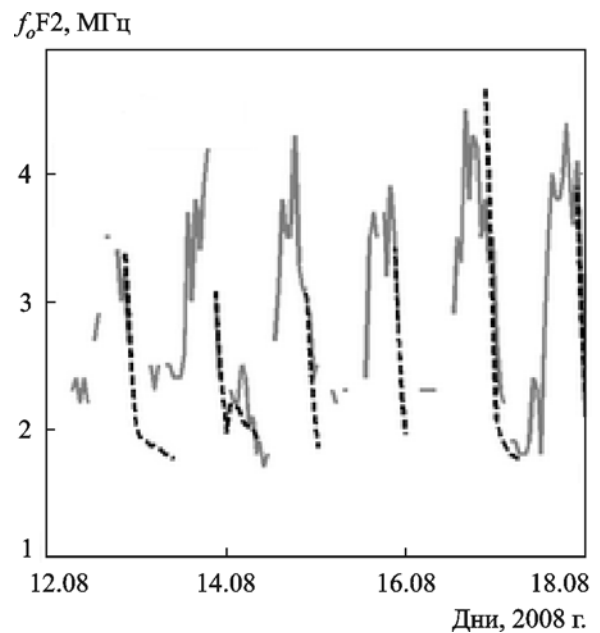


Рис. 5. Временной ход критической частоты слоя F2 по данным ионозонда (сплошная кривая) и восстановленный по модельному приближению (пунктирная линия) за несколько дней 2008 г. для УАС

же менее дорогостоящей, чем ионосферное зондирование, и, будучи пассивной, не требует излучения каких-либо зондирующих сигналов.

#### 4. Заключение

В работе проведен анализ данных долговременных наблюдений ИАР, выполненных в двух пунктах с большим пространственным разнесом, расположенных в регионе Антарктического полуострова (УАС) и вблизи г. Иркутск (Саянская обсерватория). За несколько лет наблюдений восстановлены следующие параметры ИАР: вероятность регистрации, собственные частоты, средний частотный разнос между резонансными максимумами. Проведено исследование сезонных и суточных зависимостей для этих величин. Обнаружены и проанализированы случаи регистрации РСС на частотах, превышающих 10 Гц. Показано, что большинство таких случаев регистрируется не одновременно в двух пунктах, а только в одном из них. Это указывает на то, что поведение ИАР в большей мере определяется свойствами локальной ионосферы, а не глобальным состоянием околосферной плазмы. Подтверждено,

что, несмотря на существенный пространственный разнос приемных позиций и их размещение в разных географических зонах и полушариях, суточные и сезонные закономерности для локального времени и сезонов года имеют сходный характер. Сопоставление результатов анализа параметров ИАР с данными ионозондов, расположенных вблизи пунктов наблюдения, подтвердили наличие устойчивой зависимости частотного разноса  $R_{3000}F_2$  от критической частоты слоя F2 ионосферы  $f_oF_2$ . С использованием данных наблюдений и простой феноменологической модели ИАР в работе разработана методика оценки критической частоты слоя F2 по измеряемой в эксперименте величине  $\Delta F$ . Методика апробирована на многомесячных рядах данных регистраций ИАР, полученных для обеих приемных позиций. Показано, что модельное восстановление критической частоты может быть осуществлено для произвольного пункта земной поверхности, где проводится мониторинг ИАР.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Национальный антарктический научный центр Украины за обеспечение мониторинговых измерений на УАС, а также отметить вклад разработчиков магнитометров Lemi-419ant и Lemi-30 (ЛЦ ИКИ). Работа выполнена при финансовой поддержке НТР “Антей” (№ госрегистрации 0113U004571), а также НИР “Ятаган-2” (№ госрегистрации 0111U000063) и “Шпицберген-2014” (№ госрегистрации 0114U002820).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков С. В., Рапопорт В. О. Ионосферный Альфвеновский Резонатор // Геомагнетизм и аэрномия. – 1981. – Т. 21, № 5. – С. 816–822.
2. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. Теория формирования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Известия вузов. Радиофизика. – 1989. – Т. 32, № 7. – С. 802–810.
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 // Известия вузов. Радиофизика. – 1989. – Т. 32, № 6. – С. 663–672.
4. Bosinger T., Haldoupis C., Belyaev P. P., Yakunin M. N., Semenova N. V., Demekhov A. G., and Angelopoulos V. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station (L=1.3) // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2002. – Vol. 107, No. A10. – P. SIA 4-1–SIA 4-9.
5. Belyaev P. P., Bosinger T., Isaev S. V., and Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. Space Phys. – 1999. – Vol. 104, No. A3. – P. 4305–4317.
6. Бару Н. А., Колосков А. В., Рахматулин П. А. Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альфвеновского резонанса // Сб. тез. докл. Первой украинской конференции ЭМЕС. – Харьков (Украина). – 2012. – С. 133–135.
7. Parent A., Mann I. R., and Shiokawa K. Observing the MLT and L-shell dependence of ground magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator // Int. Conf. Substorms-8. – Calgary (Canada). – 2006. – P. 225–230.
8. Колосков А. В., Синицын В. Г., Герасимова Н. Н., Ямпольский Ю. М. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 5. – С. 49–64.
9. Belyaev P. P., Polyakov S. V., Ermakova E. N., and Isaev S. V. Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985-1995 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2000. – Vol. 62, No.4. – P. 239–248.
10. Hayakawa M., Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., and Fedorov E. Observation of ionosphere Alfvén resonance at a middle latitude station // Adv. Polar Upper Atmos. Res. – 2004. – No. 18 – P. 65–76.
11. Semenova N. V., Yahnin A. G., Vasil’ev A. N., and Amm O. Specific Features of Resonance Structures in Spectra of ULF Electromagnetic Noise at High Latitudes (Barentsburg Observatory) // Geomagn. Aeronomy. – 2008. – Vol. 48, No.1. – P. 36–44.
12. Yahnin A. G., Semenova N. V., Ostapenko A. A., Kangas J., Manninen J., and 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 // ANGIO. – 2003. – Vol. 21, No. 3. – P. 779–786.
13. Безродный В. Г., Буданов О. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне // Космічна наука та технологія – 2003. – Т. 9, № 5/6 – С. 117–123.
14. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / В. Р. Ригготт, К. Равер / Пер. с англ. под ред. П. В. Медниковой. – М.: Наука, 1977. – 342 с.
15. Кузьмин А. В., Канаев А. С. Средства вертикального радиозондирования ионосферы // Гелиогеофизические исследования. – 2012. – № 2. – С. 72–82.
16. Shi Run, Zhao Zheng-Yu, Zhang Bei-Chen. Study of the influence of IAR on geomagnetic signal observed on the ground // Chi. J. Geophys. – 2010. – Vol. 53, Is. 5 – P. 693–703.
17. Demekhov A. G., Belyaev P. P., Isaev S. V., Manninen J., Turunen T., and Kangas J. Modelling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc 1 frequency range // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2000. – Vol. 62, No. 4. – P. 257–265.



18. Jayachandran B., Krishnankutty T. N., and Gulyaeva T. L. Climatology of ionospheric slab thickness // ANGEО. – 2004. – Vol. 22, No.1. – P. 25–33.

М. О. Бару<sup>1</sup>, А. В. Колосков<sup>1</sup>, Ю. М. Ямпольський<sup>1</sup>,  
А. Ю. Пашинін<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup> Інститут сонячно-земної фізики СВ РАН,  
вул. Лермонтова, 126-а, м. Іркутськ, 664033, Росія

#### МЕТОДИКА ОЦІНКИ КРИТИЧНОЇ ЧАСТОТИ ШАРУ F2 ЗА РІЗНИЦЕЮ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ ІОНОСФЕРНИХ АЛЬФВЕНІВСЬКИХ РЕЗОНАНСІВ

Виконано обробку даних реєстрації сигналів іоносферного альфвенівського резонансу (ІАР), отриманих синхронно в Антарктиді на Українській антарктичній станції та в Росії поблизу м. Іркутськ. За декілька років спостережень відновлено параметри ІАР, проаналізовано їх добові та сезонні залежності, а також випадки реєстрації резонансів у частотному діапазоні вище 10 Гц. Дані зіставлено з результатами іоносферного зондування та підтверджено зв'язок параметрів ІАР з характеристиками навколоземної плазми над пунктами спостереження. В рамках простої феноменологічної моделі ІАР розроблено методику оцінки критичної частоти іоносферного шару F2 за значенням середньої різниці частот між сусідніми модами альфвенівського резонансу. Методику апробовано за даними спостережень, отриманих в обох приймальних позиціях, і вона дозволяє оцінювати критичну частоту над довільним пунктом земної поверхні, де виконується моніторинг ІАР.

N. A. Baru<sup>1</sup>, A. V. Koloskov<sup>1</sup>, Y. M. Yampolski<sup>1</sup>,  
and A. Y. Pashinin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Radio Astronomy, National Academy  
of Sciences of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Solar-Terrestrial Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
126-a, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia

#### EVALUATION TECHNIQUE FOR THE F2 LAYER CRITICAL FREQUENCY BY THE DIFFERENCE OF IONOSPHERE ALFVEN RESONANCE EIGENFREQUENCIES

The data processing of the Ionosphere Alfvén Resonance (IAR) signals synchronously received in Antarctica (Ukrainian Antarctic Station) and in Russia near Irkutsk has been made. The IAR parameters are calculated for several years, their diurnal and seasonal characteristics and the cases of registration of resonances in the frequency band higher than 10 Hz analyzed. The data are mapped with the ionosphere sounding results. The relation between IAR parameters and characteristics of the near-Earth plasma above the stations of observation is confirmed. The technique of the F2 layer critical frequency evaluation by the value of the average frequency spacing between neighboring modes of the Alfvén resonance is developed within a simple phenomenological model of IAR. The technique is verified by the data of both stations and allows evaluating critical frequencies above any point on the Earth surface, where monitoring of IAR is performed.

Стаття поступила в редакцію 26.03.2014