

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ ИАР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И ИЗМЕНЧИВОСТИ МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ N_mF2

SPECTRAL ANALYSIS OF IAR OSCILLATIONS TO DETERMINE THE VALUE AND VARIABILITY OF THE PEAK ELECTRON DENSITY N_mF2

А.С. Потапов 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

Т.Н. Полюшкина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, tnp@iszf.irk.ru*

А.В. Гульельми 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru*

К.Г. Ратовский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru*

И.С. Москалев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, hancok@iszf.irk.ru*

A.S. Potapov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

T.N. Polyushkina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, tnp@iszf.irk.ru*

A.V. Guglielmi

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, guglielmi@mail.ru*

K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

I.S. Moskaev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, hancok@iszf.irk.ru*

Аннотация. Эта методическая статья рассматривает возможность оценки в разных условиях максимума электронной концентрации области F2 ионосферы (N_mF2) по данным о частоте спектральных полос (гармоник) излучения ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР). Описана простая методика отслеживания частоты спектральных полос в течение суток по измерению их положения на графике суточного динамического спектра ИАР. С привлечением расчетов в рамках глобальной ионосферной модели IRI-2016 проверена корректность сравнения измеренных в одной точке частот резонансных полос с данными радиозондирования, выполнявшегося в других точках, удаленных от пунктов измерения частот ИАР на некоторое расстояние. Предложен алгоритм сравнения измеряемой радиозондом N_mF2 с частотами спектральных линий путем предварительного вычисления оценочного фактора. Он формируется на основе нелинейной комбинации частот трех наблюдаемых гармоник. Затем временной ряд этого фактора сравнивается с результатами радиозондирования, вычисляются коэффициенты корреляции и регрессии и подсчитываются ошибки оценок. На материале редких случаев круглосуточного наблюдения излучения ИАР в зимние месяцы 2011–2012 гг. была прослежена зависимость средней ошибки определения N_mF2 от местного времени. Приведены данные о наиболее благоприятных интервалах местного времени для определения N_mF2 по данным о частотах гармоник ИАР в зависимости от сезона. Обсуждаются некоторые дополнительные факторы, влияющие на точность оценок и определяющие частотный диапазон излучения ИАР.

Abstract. This methodical paper explores the possibility of estimating the peak electron density of the F2-region of the ionosphere (N_mF2) under different conditions, using data on the frequency of spectral bands (harmonics) of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) oscillation. We describe a simple technique for tracking the frequency of spectral bands during the day by measuring their position on the plot of the IAR daily dynamic spectrum. Through calculations within the framework of the global ionospheric model IRI-2016, we verify the correctness of the comparison of the frequencies of resonant bands, measured at one point, with data from radio sounding, performed at other points remote from IAR frequency measurement sites at a distance. We propose an algorithm for comparing N_mF2 , measured by a radiosonde, with frequencies of spectral lines by precalculating the evaluation factor. It is formed on the basis of a nonlinear combination of the frequencies of the three observed harmonics. Then the time series of this factor is compared with the results of radio sounding, and correlation and regression coefficients, as well as estimation errors are calculated. Using the material on rare cases of round-the-clock observation of IAR oscillations in the winter months of 2011–2012, we trace the dependence of the average error in determining the peak electron density on local time. We present the data on the most favorable local time intervals for determining N_mF2 from IAR harmonic frequencies depending on season. Some additional factors are discussed which affect the accuracy of estimates and determine the frequency range of IAR oscillations.

Ключевые слова: ионосферный альфвеновский резонатор, спектральные полосы, гармоники излучения, максимум электронной концентрации, суточные вариации, регрессионный анализ.

Keywords: ionospheric Alfvén resonator, spectral bands, oscillation harmonics, electron density maximum, diurnal variations, regression analysis.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия широкую известность приобрел ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР) как яркий представитель резонансных образований атмосферно-ионосферно-магнитосферной системы наряду с такими структурами, как шумановский [Schumann, 1952], магнитосферный (field-line) [Hasegawa, Chen, 1974; Southwood, 1974], ионноциклотронный [Guglielmi et al., 2000] резонаторы, ионосферный магнитозвуковой волновод [Greifinger, Greifinger, 1968] и волновод под сводом плазмопаузы [Гульельми, 1979]. Теории и экспериментально наблюдаемым свойствам ИАР посвящены десятки, если не сотни, статей — начиная с работ первооткрывателей этого явления [Поляков, 1976; Поляков, Рапорт, 1981; Беляев и др., 1987, 1997; Belyaev et al., 1989, 1990, 1999] и их последователей [Demekhov et al., 2000; Pokhotelov et al., 2000, 2001, 2003; Böisinger et al., 2002, 2004; Chaston et al., 2002; Lysak, 1991, 2004; Surkov et al., 2004, 2006; Lysak, Yoshikawa, 2006; Semenova et al., 2008; Ермакова и др., 2008, 2011; Simões et al., 2012; Lysak et al., 2013; Dudkin et al., 2014; Baru et al., 2016].

Исследования ИАР приносят новые сведения о волновых свойствах ионосферы на стыке ультранизкочастотного (УНЧ) и крайненизкочастотного (КНЧ) диапазонов в интервале частот от десятых долей герца до ~10 Гц. Резонансная полость ИАР охватывает интервал высот от переходной области, где ионосфера переходит в магнитосферу, до нижней ионосферы. Резонатор удерживает стоячие альфвеновские волны, спектр частот которых определяется распределением альфвеновской скорости по высоте и размерами полости. Это открывает принципиальную возможность определения некоторых параметров ионосферы по измерению спектральных характеристик ИАР. Подробное описание морфологии резонатора и свойств его излучения можно найти в обзоре [Потапов и др., 2021]. ИАР играет важную роль в процессах взаимосвязи ионосферы и магнитосферы. Вполне возможно, что этот резонатор является незамкнутым и представляет собой часть общего ионосферно-магнитосферного резонатора [Гульельми и др., 2023].

Попытки обосновать возможность и (или) непосредственно использовать измерения спектральной структуры излучения ИАР для диагностики ионосферы как альтернативы ее радиозондированию предпринимались с самого открытия резонатора и теоретического осмысления его физической природы [Belyaev et al., 1990; Yahnin et al., 2003; Parent et al., 2010; Колосков, Бару, 2011–2012; Fedorov et al., 2016; Потапов и др., 2016]. Наиболее перспектив-

ным в этом отношении ионосферным параметром является максимум электронной концентрации N_mF2 в области F2 ионосферы, где наблюдается глубокий минимум вертикального профиля альфвеновской скорости. Именно там накапливается основная часть времени пробега волны вдоль оси резонатора, следовательно, частоты гармоник ИАР наиболее сильно зависят от основного параметра этой области — максимума электронной концентрации N_mF2 . Тем не менее, на практике оказывается, что хотя на отдельных временных интервалах корреляция между N_mF2 и частотой каждой из гармоник ИАР очень высока, на соседних интервалах она может существенно падать, приводя к большим ошибкам в оценке N_mF2 .

В работе [Potapov, Polyushkina, 2020b] была предпринята попытка решить эту проблему путем применения многофакторного регрессионного анализа с привлечением данных о дополнительных параметрах. Это позволило повысить точность оценки N_mF2 , но усложнило процесс ее оперативного получения, поскольку некоторые дополнительные параметры невозможно получить в режиме реального или даже квазиреального времени. Примером может служить индекс авроральной активности AE .

В данной работе мы подошли по-другому к изучению возможности оценки N_mF2 в зависимости от разных факторов. Первым делом мы описали практические способы отслеживания частоты гармоник излучения в течение суток по измерению положения резонансных полос гармоник в суточном динамическом спектре ИАР. Мы проверили также корректность сравнения частот резонансных полос, измеренных в одной точке (станции «Монды», «Узур» или «Исток») с данными радиозондирования в других точках (Иркутск и НорКМИС), удаленных от пунктов измерения частот ИАР на некоторое определенное расстояние. Далее мы на материале редких случаев практически круглосуточного наблюдения излучения ИАР (что достижимо только в отдельные зимние дни) проследили зависимость средней ошибки в оценке N_mF2 от местного времени и сравнили ее со средними значениями максимума электронной концентрации, измеренными цифровым ионозондом (дигизондом). Поскольку в зависимости от сезона резонансные полосы в суточном динамическом спектре появляются в разное местное время и делятся по-разному, мы привели данные о наиболее благоприятных интервалах для определения N_mF2 по данным о частотах гармоник ИАР в течение года. Основной целью работы была выработка методики определения максимума электронной концентрации в ионосфере по данным о частоте гармоник ИАР в разных условиях и оценка ошибок такого определения с учетом неоднозначной зависимости частоты излучения ИАР от N_mF2 .

1. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Проникающие из ИАР к земной поверхности колебания относятся к классу геомагнитных пульсаций. Они регистрируются с помощью высокочувствительных индукционных магнитометров. Рассмотренные в данной статье события были зарегистрированы цифровым индукционным магнитометром на среднеширотной станции «Монды», расположенной на территории Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН. Наблюдения велись также на среднеширотной станции «Узур» и высокоширотной станции «Исток», но в данной статье они не использовались. Магнитометр ЛЕМ1-030 на ст. «Монды» имеет следующие характеристики. Основным элементом является индукционный датчик в виде многовитковой катушки с сердечником, обладающим высокой магнитной проницаемостью. Имеется также предварительный усилитель, набор фильтров, в том числе фильтр-пробка на 50 Гц, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой накопитель. Частотный диапазон прибора составляет 0.001–30 Гц. В диапазоне 1–30 Гц прибор имеет плоскую АЧХ с коэффициентом преобразования 20 мВ/нТл. Уровень шума не превышает 0.2 пТл/Гц^{1/2} на частоте 1 Гц и 0.2 пТл/Гц^{1/2} на частоте 10 Гц. Его АЦП имеет 24 разряда, частота дискретизации 64 Гц. Для анализа использовались выходные данные двух горизонтальных датчиков, ориентированных с севера на юг (*X*-компонента) и с востока на запад (*Y*-компонента). Время контролировалось GPS-приемником.

Цифровые магнитные записи в диапазоне 1–8 Гц обрабатывались с помощью специально разработанного для исследования ИАР компьютерного кода в среде MATLAB. Программа рассчитывает динамический спектр сигнала по двум компонентам и строит суточную spectroграмму частота — время. Интенсивность сигнала на заданной частоте в заданное время отображается цветом. Использовалось окно Габора шириной 200 с с перекрытием 15360 точек. Из этих суточных spectroграмм были отобраны те, которые отображают характерные для излучения ИАР частотные структуры, имеющие вид регулярно изгибающихся в течение суток спектральных полос (пример spectroграммы показан на рис. 1). База данных с динамическими спектрами ИАР за 2009–2020 гг. имеется в свободном доступе на [<https://data.kmio.istp.ac.ru>].

Для данного исследования мы отбирали события, в которых хотя бы в течение части суток были отчетливо видны три спектральные полосы, со второй по четвертую. Каждая из полос соответствует одной из гармоник излучения резонатора. Мы не проводили измерения первой гармоники, поскольку чаще всего она бывает зашумлена наложением спектрального отклика геомагнитных пульсаций Pi1 или Pc1, или просто произвольных шумовых излучений.

В последние годы появился ряд работ [Beggan, 2014; Гетманов и др., 2018; Marangio et al., 2020], в которых предлагаются методы автоматического анализа структуры динамических спектров излуче-

ний, в частности, резонансных типа ИАР. Однако методы эти пока что далеки от совершенства в отношении естественных сигналов. Так, авторы работы [Marangio et al., 2020] признают, что их техника с использованием нейросетей хорошо работает с геофизическими данными при условии, что «они имеют четко определяемые паттерны с минимальным шумом».

В нашей работе частоты гармоник определялись визуально. Для этого, как показано на рис. 1, на выбранных spectroграммах вверх от каждой часовой метки были проведены вертикальные линии, пересекающие три интересующие нас гармоники (со второй по четвертую). Частоты гармоник измерялись путем определения положения курсора, указывающего на пересечение проведенной вертикальной линии с серединой спектральной полосы гармоники. Далее полученные значения частоты обрабатывались по определенному алгоритму для вычисления так называемого оценочного фактора Q_{est} ; полученные значения сравнивались с измерениями $N_m F2$, полученными по радиозондированию критической частоты $f_o F2$ слоя F2 ионосферы, однозначно связанной с $N_m F2$. Измерения $f_o F2$ производились в Иркутске с помощью дигизонда DPS-4 [Reinisch et al., 1997].

Перед таким сравнением выполнялись две важные процедуры. Во-первых, ряд вычисленных по $f_o F2$ значений $N_m F2$ сглаживался методом скользящего среднего, чтобы избавиться от влияния короткопериодных волновых возмущений в области радиозондирования. (Предполагается, что свойства резонатора определяются не локальными условиями в ионосфере над местом измерений, а гораздо более широкой областью, см. ниже.) Во-вторых, поскольку мы имели 15-минутные измерения критической частоты, то и ряды измерений частоты гармоник ИАР были переведены в 15-минутные значения путем интерполяции часовых измерений.

В результате сравнения Q_{est} с $N_m F2$ вычислялись коэффициенты r корреляции по Пирсону, а также коэффициенты a , b линейной регрессии $N_e = aQ_{est} + b$.

Возникает вопрос, справедливо ли сравнение значений $N_m F2$, получаемых путем измерения частоты излучения ИАР, наблюдаемого в некоторой точке, с измерениями $N_m F2$, полученными по значениям радиозондирования критической частоты $f_o F2$ слоя F2 ионосферы в другой точке, расположенной на некотором расстоянии от первой? Другими словами, каков радиус корреляции $f_o F2$ (или $N_m F2$) вдоль земной поверхности по сравнению с расстоянием между точками измерений?

В литературе имеется не так много сведений о пространственных масштабах (радиусе корреляции) ионосферных условий. Так, авторы работы [Stanislawska et al., 1997] считают, что основные параметры ионосферы достаточно хорошо коррелируют на расстояниях порядка 1 тыс. км. Поскольку в нашем исследовании точки магнитных и радиочастотных измерений не совпадают друг с другом, мы в начале анализа уточнили правомерность сравнения наших измерений. Мы воспользовались глобальной ионосферной моделью IRI-2016, которая дает усредненную типичную картину состояния ионосферы над выбранной точкой на земной поверхности для заданных года,

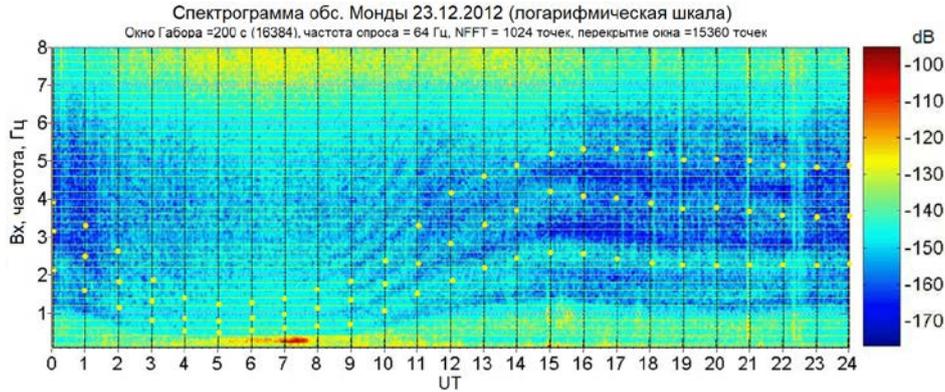


Рис. 1. Суточная спектрограмма зимнего события ИАР 23 декабря 2012 г. Желтые точки соответствуют значениям частот гармоник (со второй по четвертую) для каждого часа

месяца, дня и часа наблюдений. Мы получаем магнитные данные в трех пунктах, расположенных в следующих местах (указаны географические координаты): Монды (52° N , 101° E), Узур (53° N , 108° E) и Исток (70° N , 88° E). Радиозондирование с помощью цифровых зондов DPS-4 ведется в двух станциях: Иркутск (52° N , 104° E) и Норильск (69° N , 88° E). Поскольку нас в первую очередь интересует максимум электронной концентрации в слое F2 ионосферы, мы рассчитали по модели IRI-2016 вариации вечерних и ночных (17–05 LT) значений этого параметра над всеми пятью пунктами, расположенными практически в одном временном секторе, где полночь по мировому времени 00 UT соответствует 06–07 LT. Именно в интервале 17–05 LT наиболее часто наблюдается излучение ИАР. На рис. 2 для примера показаны вариации $N_m\text{F2}$ в разные сезоны 2018 г. Видно, что даже во время зимнего солнцестояния разница между оценками $N_m\text{F2}$ в интересующих нас пунктах согласно модели IRI-216 невелика. Так, между Иркутском и Мондами она достигает максимальных значений в районе 01 LT, но не превышает при этом 9 %. Это значительно меньше типичного отклонения измеряемых ионозондом концентраций от модельных. Таким образом, для сопоставления оцениваемого по дисперсным полосам ИАР максимума электронной концентрации с прямыми радиоизмерениями критической частоты (а значит, и $N_m\text{F2}$) на станциях «Монды» и «Узур» вполне можно использовать данные ионозонда DPS-4 в Иркутске. Еще более благоприятная ситуация складывается для пары пунктов Норильск—Исток. Там различия в модельных профилях IRI-2016 вообще почти не заметны, как видно на рис. 2. (Заметим, что на рис. 2 и везде далее значения $N_m\text{F2}$ мы будем приводить в единицах числа частиц в кубическом миллиметре — мм^{-3} , в отличие от общепринятых единиц измерения $N_m\text{F2}$ — м^{-3} и см^{-3} .)

2. ОЦЕНКА МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В СЛОЕ F2 ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИК ИАР

Исходные теоретические формулы для поиска зависимости частот гармоник ИАР f_n^{IAR} и их частот-

ного масштаба (разности между соседними гармониками) Δf^{IAR} от параметров среды имеют вид [Поляков, Рапопорт, 1981]

$$f_n = \frac{c_A}{2L}(n + \Phi), \quad \Delta f = f_{n+1} - f_n = \frac{c_A}{2L}, \quad (1)$$

или $\Delta f = K / \sqrt{N_e}$, где $c_A = B / \sqrt{4\pi N_e m_{i\text{eff}}}$ — скорость Альфвена; B — магнитное поле на высоте максимума слоя F2 ионосферы; L — характерный масштаб резонатора в продольном направлении; $m_{i\text{eff}}$ — эффективная масса ионов; n — номер гармоники, $K = B / (2L\sqrt{4\pi m_{i\text{eff}}})$. В формуле (1) под N_e понимается электронная концентрация, меняющаяся с высотой, и в действительности перед $c_A = B / \sqrt{4\pi N_e m_{i\text{eff}}}$ в (1) должен стоять интеграл по высоте, чтобы учесть изменения с высотой как N_e , так и B , и $m_{i\text{eff}}$. Но поскольку частота гармоник (а также расстояние между ними) определяется альфвеновской скоростью и продольным размером волновода, а профиль альфвеновской скорости имеет глубокий и резкий минимум в области максимума электронной концентрации $N_m\text{F2}$ в слое F2 ионосферы при том, что магнитное поле и эффективная масса ионов меняются с высотой намного медленнее, чем N_e , то для грубых оценок можно предположить, что частота в основном зависит от значения альфвеновской скорости в максимуме электронной концентрации. Более подробно эти вопросы рассмотрены в работе [Potapov, Polyushkina, 2020b].

Таким образом, для оценки $N_m\text{F2}$ по измерениям частотного масштаба Δf^{IAR} резонансной структуры можно использовать формулу

$$N_m\text{F2} = \frac{K^2}{(\Delta f^{\text{IAR}})^2}, \quad (2)$$

предварительно определив K^2 по результатам регрессионного анализа выбранного массива одновременных измерений $N_m\text{F2}$ и Δf^{IAR} .

Что касается оценки $N_m\text{F2}$ по измерениям частоты отдельной спектральной линии (гармоники), имеем

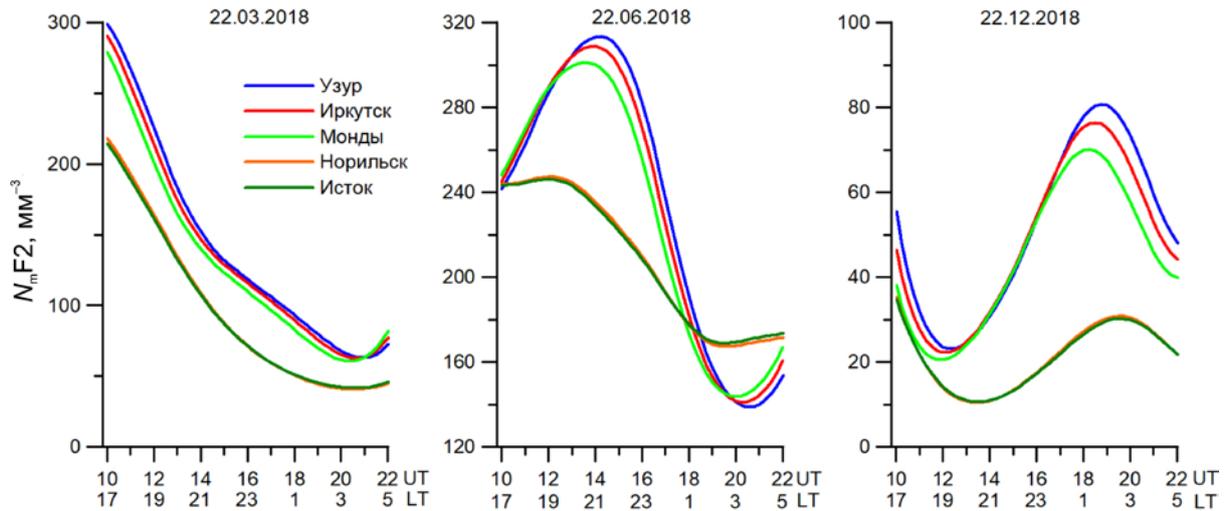


Рис. 2. Вариации максимума электронной концентрации в ионосфере, рассчитанные с помощью модели IRI-2016 для равноденствия и летнего и зимнего солнцестояний в пяти пунктах, где либо проводилось радиозондирование, либо измерялись частоты гармоник ИАР

$$N_m F2 = \frac{K^2 (n + \Phi)^2}{(f_n)^2}. \quad (3)$$

В этом случае предварительно необходимо оценить фазовый параметр Φ . Обсудим, как это можно сделать. Поскольку вид предыдущей формулы не зависит от номера гармоники

$$N_m F2 = \frac{K^2 (n + \Phi)^2}{(f_n)^2} = \frac{K^2 (n + m + \Phi)^2}{(f_{n+m})^2},$$

где m — произвольное целое число, нетрудно найти, что

$$\Phi = \frac{n(1-R) + m}{R-1}, \quad (4)$$

где $R = f_{n+m}/f_n$. С другой стороны, отношение частоты гармоники с большим номером к частоте гармоники с меньшим номером имеет вид

$$R = \frac{\Phi + n + m}{\Phi + n}. \quad (5)$$

Так, если $n=m=1$, то $\Phi=-1/2$ при $R=3$ и $\Phi=0$ при $R=2$. В первом случае мы имеем на нижней границе резонатора пучность магнитного поля стоячей альфвеновской волны (тип 1); во втором — узел магнитного поля (тип 2), но при этом на земной поверхности излучение ИАР не наблюдается. Подробно эта ситуация рассмотрена в работе [Potarov et al., 2022a]. Нетрудно убедиться, что приведенные там в виде треугольных матриц два варианта отношений частот гармоник для стоячих альфвеновских волн первого и второго типа получаются согласно приведенным здесь формулам (4) и (5) при $\Phi=-1/2$ и $\Phi=0$ соответственно. В первом случае отношение частот гармоник следует последовательности нечетных чисел 1:3:5:9 и т. д., во втором — натуральному ряду чисел 1:2:3:4 и т. д. На практике отношения частот могут отклоняться от теоретически предсказываемых из-за неоднородности, нелинейных эффектов

и других факторов. Но, как показано в [Potarov et al., 2022b], на среднеширотной станции наблюдений они всегда остаются гораздо более близкими к типу 1 стоячих волн, чем к типу 2.

На практике возможны два различных способа оценки вариаций $N_m F2$ путем анализа спектральных полос излучения ИАР: по величине частотного масштаба Δf излучения ИАР и по частоте отдельной гармоники с учетом фазового параметра Φ . Использование того или другого метода имеет свои достоинства и недостатки. Для оценки $N_m F2$ по Δf требуется, чтобы на анализируемом участке динамического спектра были хорошо различимы несколько гармоник (4–5 и более спектральных полос).

С другой стороны, при оценке по отдельной гармонике не всегда легко бывает определить номер гармоники, так как выбранная спектральная полоса может раздвоиться или слиться с другой. Часто наблюдается «загрязнение» полосы иррегулярными низкочастотными возмущениями. Мы выбрали способ определения по трем гармоникам — второй, третьей и четвертой, с последующим усреднением результатов.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ $N_m F2$ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ

Чтобы изучить зависимость ошибки в определении $N_m F2$ от местного времени мы отобрали 12 зимних событий наблюдения ИАР в январе, декабре 2011 г. и январе 2012 г. Во время этих событий спектральные полосы трех интересующих нас гармоник были видны на динамических спектрах все 24 часа. Спектрограмма одного из событий как раз и показана в разделе 1 на рис. 1. Начальная процедура обработки данных описана там же. В нее входило измерение часовых значений частоты каждой из трех гармоник путем визуального анализа спектральных полос и линейная интерполяция числового ряда этих значений с получением ряда из 96 15-минутных зна-

чений частоты каждой из гармоник. Далее, учитывая то, что из теоретических соображений (3) ожидается обратная пропорциональность максимума электронной концентрации квадрату частоты гармоник, для удобства последующего сравнения этих частот с $N_m F2$ и поиска коэффициентов корреляции и регрессии мы вычисляем значения фактора $Q_n = (n + \Phi)^2 / (f_n)^2$ для каждой n -й гармоники в каждой временной точке. Основываясь на наших предыдущих результатах в работах [Potapov et al., 2022a, b], мы везде в дальнейшем полагаем $\Phi = -1/2$. Очевидно, для выбранного нами набора гармоник Q_n имеет вид $Q_2 = 2.25/f_2^2$, $Q_3 = 6.25/f_3^2$, $Q_4 = 12.25/f_4^2$. Далее для получения усредненного значения оценочного фактора Q_{est} мы просто усредняем вычисленные три величины Q_n : $Q_{est} = (Q_2 + Q_3 + Q_4)/3$.

Для каждого из отобранных 12 дней строились массивы данных, включающие в себя следующие параметры:

1. Суточный ряд интерполированных 15-минутных значений усредненного по трем гармоникам оценочного фактора Q_{est} .

2. Суточный ряд 15-минутных значений $N_m F2$ (мм^{-3}), вычисленных по измерениям дигизондом DPS-4 в Иркутске критической частоты $f_o F2$ и сглаженных скользящим усреднением с окном из 11 точек (2.75 ч). Чтобы сохранить постоянное число точек отсчета (96) за сутки, при усреднении мы использовали по пять точек (1.25 ч) из предыдущих и последующих суток.

3. Суточный ряд значений $1000/h_m F2$, где $h_m F2$ — высота максимума слоя F2 (км), по данным измерений тем же дигизондом и таким же образом сглаженный.

4. Сглаженный ряд значений полного электронного содержания (total electron content — TEC) в единицах TECU по результатам измерений ионозонда DPS-4. Следует учесть, что ионозонд измеряет профиль электронной концентрации только до высоты максимума $h_m F2$, а TEC рассчитывается после экстраполяции профиля выше $h_m F2$ методом Хуанга—Райниша [Reinisch et al., 2004].

Заметим, что данные о суточных вариациях высоты максимума слоя F2 и вариациях TEC (пп. 3 и 4) использовались нами лишь для общей характеристики состояния ионосферы во время каждого события и не обсуждаются далее.

Типичные суточные вариации перечисленных параметров показаны разноцветными линиями на рис. 3 для события 5 января 2011 г. Отдельные факторы частот гармоник Q_n не показаны, приведены только вариации усредненного оценочного фактора $Q_{est} = (Q_2 + Q_3 + Q_4)/3$. На рисунке видно, что все четыре ионосферных параметра — максимум электронной концентрации $N_m F2$, полное электронное содержание TEC, оценочный фактор по трем гармоникам ИАР Q_{est} и обратная высота максимума слоя F2 — имеют схожий суточный ход, хотя для разных

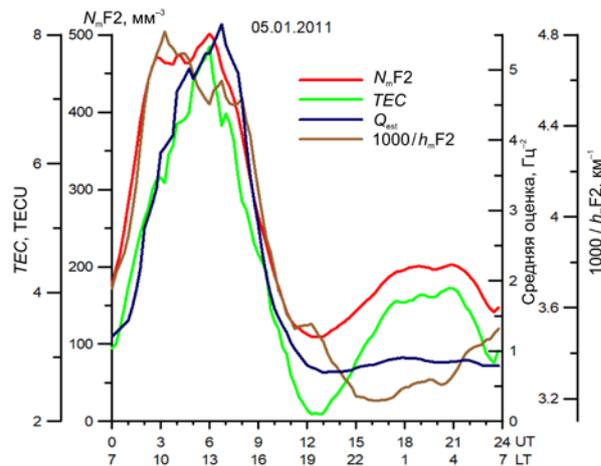


Рис. 3. Суточные вариации максимума электронной концентрации по результатам радиозондирования, полного электронного содержания TEC, обратной высоты максимума слоя F2 (умноженной на 10^3) и оценочного фактора $Q_{est} = (Q_2 + Q_3 + Q_4)/3$, вычисленного по значениям частот 2-й, 3-й и 4-й гармоник ИАР

параметров он существенно отличается в деталях. Особенно сильно бросается в глаза разницей в поведении параметров в интервале местного времени примерно с 20 ч до 7 ч утра (13–24 UT). Для зимы это ночное время. Интересующий нас в первую очередь оценочный фактор ИАР проявляет две основные особенности. (Причем, они характерны не только для данного конкретного события, но и для других зимних случаев.) Во-первых, в дополуденное время рост Q_{est} на 1–2 ч отстает от роста N_e , что занижает оценку $N_m F2$ в эти часы. Во-вторых, в ночное время Q_{est} практически не реагирует на изменения $N_m F2$.

На наш взгляд, оба эти эффекта связаны с тем, что наблюдаемый спектральный состав зависит не от локальных условий над станцией, которые отражаются в результатах радиозондирования, а от интегральных вдоль долготы характеристик ионосферы. В раннее утреннее время область, формирующая спектр резонатора, охватывает частично затененную ионосферу с низкой электронной концентрацией, поэтому значения Q_{est} оказываются заниженными. В ночное же время, когда резонатор сформирован, его свойства и спектральный состав определяются достаточно широким регионом, куда попадают области с разными значениями $N_m F2$, отличающимися от измеряемого над местом радиозондирования значения $N_m F2$. Эти особенности характерны для зимних условий, когда излучение ИАР видно непрерывно в течение полных суток, за исключением двух-трех часов вблизи полудня, когда спектральные полосы ИАР трудно различимы. В другие сезоны ситуация иная, мы вернемся к этому позже.

Чтобы проследить зависимость спектральных характеристик ИАР от времени дня, мы действовали следующим образом. Мы разбили сутки на три неравных интервала: утреннее время, включая полдень (07–13 LT), послеполуденный интервал (13–19 LT) и период от позднего вечера до раннего утра (19–07 LT). Затем мы сравнили вариации $N_m F2$ и факто-

ра Q_{est} в течение каждого из выделенных интервалов суток, а также в течение полных суток для каждого из 12 событий. По каждому из интервалов были вычислены основные характеристики связи $N_m F2$ и Q_{est} : коэффициент корреляции по Пирсону r_i , где i — номер события, т. е. обработанных суток наблюдения ИАР, коэффициенты a_i и b_i линейной регрессии $N_m F2^{\text{est}} = a_i Q_{\text{est}} + b_i$ и коэффициента линейной зависимости c_i регрессионной прямой $N_m F2^{\text{est}} = c_i Q_{\text{est}}$, проходящей через начало координат ($Q_{\text{est}} = 0, N_m F2^{\text{est}} = 0$). В табл. 1–3 приведены полученные коэффициенты для всех рассмотренных зимних событий. Показаны результаты для первого и второго интервалов местного времени, а также для полных суток. Корреляция между $N_m F2$ и Q_{est} для третьего (ночного) интервала оказалась низкой и хаотично меняющейся от события к событию; для ряда событий она имела отрицательный знак (антикорреляция), даже при общей положительной и высокой корреляции по данным полных суток.

Из рассмотрения результатов, приведенных в таблицах, видно, что связь $N_m F2$ с Q_{est} сильно меняется в течение суток. Наиболее высока она в послеполуденное время (табл. 2), когда концентрация электронов в ионосфере падает. Менее выражена эта связь в утреннее время (табл. 1), на подъеме концентрации. В ночное время связь практически отсутствует при минимальных значениях $N_m F2$, хотя по данным полных суток корреляция $N_m F2$ с Q_{est} остается высокой. Для иллюстрации этих вариаций мы подсчитали ошибки оценок $N_m F2$ по измеренным Q_{est} , используя различные варианты уравнения регрессии с коэффициентами, полученными усреднением отдельно по утренним, послеполуденным и круглосуточным интервалам всех событий.

Полученные результаты показали, что наименьшие ошибки оценок $N_m F2$ по измеренным Q_{est} дает уравнение линейной регрессии $N_m F2^{\text{est}} = a Q_{\text{est}} + b$ с коэффициентами $a=62.34$ и $b=77.56$, полученными их усреднением для послеполуденного интервала всех событий. Важно отметить, что ошибки оказываются

Таблица 1

Коэффициенты корреляции r_i , регрессии a_i и b_i и линейной зависимости c_i , их средние и СКО для интервала 07–13 LT

№	Дата	r_i	a_i	b_i	c_i
1	23.01.2011	0.921	58.7	139	90.8
2	05.01.2011	0.896	61.9	195	110
3	08.01.2011	0.868	71.9	235	127
4	11.01.2011	0.822	35.5	234	77.5
5	12.01.2011	0.917	36.2	174	63.5
6	19.01.2011	0.811	49.4	247	109
7	20.01.2011	0.866	48.1	174	90.1
8	22.01.2011	0.870	71.1	191	135
9	19.12.2011	0.864	61.2	314	105
10	24.12.2011	0.813	53.2	360	104
11	07.01.2012	0.773	57.6	514	114
12	23.12.2012	0.982	93.2	50.1	104
Средние		0.867	58.2	235	103
СКО		0.058	16.0	118	19.9

Таблица 2

Коэффициенты корреляции r_i , регрессии a_i и b_i и линейной зависимости c_i , их средние и СКО для интервала 13–19 LT

№	Дата	r_i	a_i	b_i	c_i
1	23.01.2011	0.991	68.4	60.5	83.8
2	05.01.2011	0.990	74.6	55.9	88.2
3	08.01.2011	0.990	67.0	62.9	78.8
4	11.01.2011	0.989	44.7	97.1	62.8
5	12.01.2011	0.991	53.9	47.3	62.1
6	19.01.2011	0.992	60.1	90.6	82.3
7	20.01.2011	0.958	60.8	65.0	76.0
8	22.01.2011	0.990	75.7	46.7	89.3
9	19.12.2011	0.987	58.6	99	69.4
10	24.12.2011	0.989	54.3	105	65.9
11	07.01.2012	0.991	62.0	122	73.7
12	23.12.2012	0.988	68.6	78.8	83.8
Средние		0.987	62.3	77.6	76.3
СКО		0.009	9.07	24.8	9.59

Таблица 3

Коэффициенты корреляции r_i , регрессии a_i и b_i и линейной зависимости c_i , их средние и СКО для полных суток

№	Дата	r_i	a_i	b_i	c_i
1	23.01.2011	0.963	71.6	67.8	90.1
2	05.01.2011	0.932	73.2	107	105
3	08.01.2011	0.871	74.2	111	100
4	11.01.2011	0.887	53.8	89.4	73.1
5	12.01.2011	0.927	45.9	100	65.4
6	19.01.2011	0.890	78.1	73.3	98.1
7	20.01.2011	0.923	66.5	69.7	84.9
8	22.01.2011	0.886	84.2	75.7	110
9	19.12.2011	0.883	71.4	78.8	82.9
10	24.12.2011	0.860	66.1	103	80.7
11	07.01.2012	0.837	72.1	169	92.0
12	23.12.2012	0.926	60.3	95.5	77.7
Средние		0.899	68.1	95.2	88.4
СКО		0.036	10.6	28.0	13.5

минимальными не только для послеполуденного времени, но и для всего протяжения суток. Среднесуточная ошибка определения $N_m F2$ по приведенному уравнению регрессии составила $64.4 \pm 13 \text{ мм}^3$. Суточное изменение этих усредненных по всем событиям ошибок показано на рис. 4 вместе с суточным ходом усредненных значений $N_m F2$.

Как обсуждалось выше при описании рис. 3, повышенные значения ошибок в утреннее время связаны с запаздыванием отклика частоты излучения ИАР на локальное повышение электронной концентрации в ионосфере, а это запаздывание обусловлено достаточно большой долготной протяженностью резонатора. В остальное время, с 13 LT до конца суток, ошибки по абсолютной величине невелики. То, что в ночные часы Q_{est} практически не коррелирует с электронной концентрацией, объясняется двумя дополнительными (помимо долготной протяженности резонатора) факторами. Во-первых, ширина спектральных полос в это время велика, а вариации их частоты не превышают ширины полос, что приводит к большим погрешностям в измерении частоты гармоник. Во-вторых, фактические вариации $N_m F2$, изме-

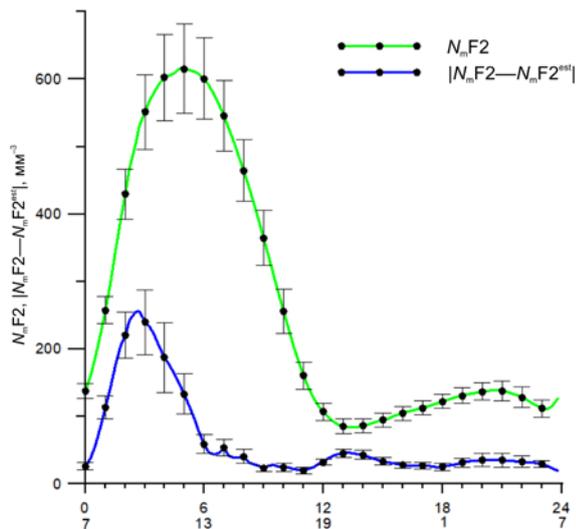


Рис. 4. Суточный ход усредненных по всем 12 зимним событиям ошибок определения максимальной концентрации электронов по спектру излучения ИАР

ряемые дигизондом, малы, имеют чаще всего шумоподобный характер и не превышают точности измерений с помощью радиозондирования.

Описанные результаты получены для зимних условий, когда на широте станции наблюдения солнце не поднимается высоко и заветка нижней части ионосферы даже в околополуденные часы слаба, что позволяет излучению ИАР проникать к земной поверхности. Зависимость длительности наблюдения спектральных полос ИАР от условий освещения ионосферы в разные сезоны года детально проиллюстрирована на рис. 3, 4 в [Potapov et al., 2014]. Уже через 40–50 дней после зимнего солнцестояния спектральные полосы ИАР в утренне-полуденные часы перестают быть различимыми. Одновременно сдвигается на более поздние часы начало восходящего веера полос. К весеннему равноденствию начало различимой спектральной структуры приходится на 18–19 LT и через 2–3 ч эти полосы плавно трансформируются в ночные. В мае–июле бывают видны лишь небольшие фрагменты полос длительностью до трех-четырех часов в темное время суток, обычно в интервале от 23 до 03 LT. Потом все повторяется в обратном порядке до следующего зимнего солнцестояния.

Мы рассмотрели возможность оценки максимума электронной концентрации ионосферы по данным о частотах гармоник ИАР для других сезонов хотя бы в те небольшие окна в суточных динамических спектрах, когда видны полосы гармоник и удастся оцифровать их. Для примера приводим событие 13 августа 2011 г. (рис. 5). Спектральные полосы наблюдались с 14 до 21 UT (21–04 LT). На этом коротком участке мы имеем очень высокую ($r=0.995$) корреляцию между N_mF2 и Q_{est} , но коэффициенты регрессии значительно отличаются от своих среднезимних значений. Несмотря на это, при их использовании средняя ошибка в определении N_mF2 по Q_{est} составляет $\sim 89 \text{ мм}^{-3}$, что сравнимо с аналогичной ошибкой для зимнего периода.

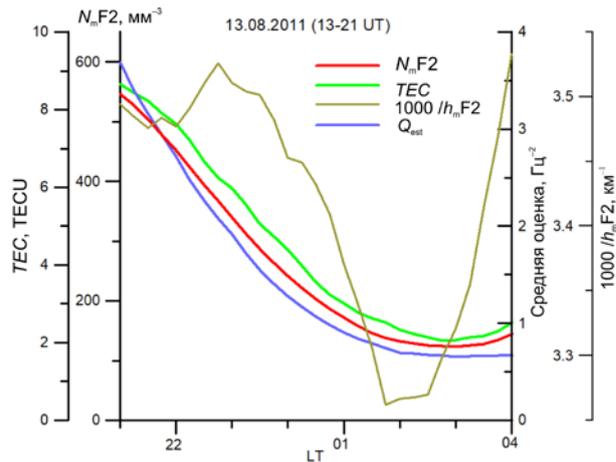


Рис. 5. Вариации максимума электронной концентрации N_mF2 , полного электронного содержания TEC , обратной высоты максимума слоя F2 (умноженной на 10^3) и оценочного фактора $Q_{est} = (Q_2 + Q_3 + Q_4)/3$, вычисленного по значениям частот 2-й, 3-й и 4-й гармоник ИАР, в ночь с 13 на 14 августа 2011 г. по местному времени

Дополнительно мы провели независимое испытание метода, используя данные наблюдений за период вблизи осеннего равноденствия в сентябре 2011 г. Методика была следующей. Мы выбрали десять дней месяца с хорошо различимыми спектральными полосами ИАР и в каждом выбранном сутках выполнили два измерения в два момента времени, измерив в каждый из моментов частоту одной из гармоник. Результаты показаны в табл. 4. Так же, как и для зимнего периода, частоты гармоник сначала пересчитывались в оценочные факторы Q_{est} , а по ним уже рассчитывались оценки максимума электронной концентрации N_mF2_{est} с использованием полученного по зимним событиям регрессионного уравнения $N_mF2_{est} = 62.34 \cdot Q_{est} + 77.56$. Разница заключалась в том, что в этот раз мы подсчитывали Q_{est} по измерениям частоты одной гармоники, а не трех, как ранее. Как видно, это не сильно сказалось на величине ошибок оценки.

Следует заметить, что даже в июне примерно в половине ночей удастся различить по 3–4 спектральных полосы в течение трех-четырех часов. Это обеспечивает возможность прослеживания сезонного и солнечно-циклического хода частот излучения ИАР хотя бы для ночного времени (см. [Potapov, Polyushkina, 2020a]).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные теоретические формулы (1) выведены в рамках идеальной магнитной гидродинамики, допускающей представление резонатора Альфвена в виде одномерной стационарной колебательной системы. Неоднородность и, вообще говоря, нестационарность реального резонатора, в принципе, может повлиять на точность мониторинга состояния ионосферы по предложенной нами методике. Обсудим этот вопрос на качественном уровне.

Начнем с того, что ИАР является открытым резонатором. Это значит, что в отличие от закрытых (объем-

Таблица 4

Результаты анализа оценки максимума электронной концентрации $N_m F2$ в дни, близкие к осеннему равноденствию, по измеренным частотам отдельных спектральных полос ИАР и ошибки оценок по сравнению со значениями $N_m F2$, измеренными путем радиозондирования

№	Дата (UT)	Время UT/LT	B_x/B_y	Номер гармоники	Частота, Гц	$N_m F2$, мм ⁻³	Q_{est} , Гц ⁻²	$N_m F2_{est}$, мм ⁻³	Ошибка, мм ⁻³
1	20110915	17/00	B_x	2	1.1	231	1.86	193	37.9
2		15/22	B_x	3	1.6	356	2.44	230	126
3	20110916	17/00	B_x	4	2.6	257	1.81	191	67.3
4		19/02	B_x	3	2.3	231	1.18	151	80.2
5	20110918	13/20	B_y	4	1.65	470	4.50	358	112
6		12/19	B_y	4	1.4	483	6.25	467	15.6
7	20110920	14/21	B_y	3	1.05	521	5.67	430	89.7
8		15/22	B_y	4	1.7	411	4.24	341	69.6
9	20110921	13/20	B_y	4	1.25	573	7.84	566	7.07
10		14/21	B_y	3	1.05	560	5.67	430	129
11	20110924	12/19	B_y	3	1.05	560	5.67	431	129
12		14/21	B_y	3	1.45	446	2.97	263	183
13	20110926	14/21	B_y	3	1.05	573	5.67	431	142
14		15/22	B_y	4	1.5	434	5.44	417	17.6
15	20110927	13/20	B_x	3	1.25	314	4.00	327	11.9
16		15/22	B_x	4	2.1	240	2.78	251	10.7
17	20110929	17/00	B_x	2	1.3	206	1.33	160	45.8
18		19/02	B_x	4	2.9	160	1.46	168	7.66
19	20110930	11/18	B_y	2	0.5	701	9.00	639	62.6
20		14/21	B_y	4	1.8	367	3.78	313	53.7
								Среднее	70.0

ных) резонаторов волновое поле в ИАР ограничено в вертикальном направлении двумя торцами, т. е. отражающими элементами резонатора, но в горизонтальном направлении оно ограничено только каустической поверхностью. Пусть для простоты силовые линии внешнего магнитного поля вертикальны и резонатор однороден в горизонтальном направлении. Тогда в рамках идеальной магнитной гидродинамики моды двумерного резонатора можно представить, например, в виде гауссова пучка вида $\Phi_n(z) \exp(-ax^2)$. Здесь оси X и Z ориентированы в горизонтальном и вертикальном направлениях, причем $z \subseteq [0, L]$. Величины $\Phi_n(z)$ есть собственные функции соответствующего продольного оператора. (Если c_A не зависит от z , то $\Phi_n \propto \sin(\omega_n z / c_A)$, где $\omega_n = \pi c_A n / 2L$, $n=1, 3, 5, \dots$).

Казалось бы, проблем не возникает, поскольку дискретный спектр ω_n не зависит от распределения волнового поля в поперечном сечении резонатора. Однако положение дел радикально изменяется, как только мы учтем реально существующую горизонтальную неоднородность ионосферы. Дискретный спектр исчезает, спектр колебаний становится непрерывным, колебания оказываются несобственными (вынужденными) [Гульельми, Потапов, 1984]. Положение можно исправить, если выйти за пределы идеальной магнитной гидродинамики и учесть зависимость частоты волны Альфвена от поперечной компоненты волнового вектора. Соответствующие поправки к дисперсионному уравнению для волн Альфвена известны как инерционная, гирочастотная и кинетическая поправки. Оценки показывают, что

на ионосферных высотах в диапазоне частот ИАР преобладает поправка, связанная с инерцией электронов. Любопытная особенность инерционной поправки состоит в том, что поперечная компонента групповой скорости волн Альфвена антипараллельна поперечной компоненте волнового вектора. В результате луч волны Альфвена изгибается в сторону, противоположную горизонтальной проекции градиента плотности плазмы. Это приводит к тому, что волновое поле концентрируется в слоях и волокнах с пониженной концентрацией плазмы N . Фокусировка волн Альфвена в структурных образованиях такого рода, вообще говоря, может привести к восстановлению дискретности спектра.

С физической точки зрения интересно указать на возможность самофокусировки волн Альфвена. Известно, что на высоких широтах дует так называемый анабатический полярный ветер, выносящий ионосферную плазму в геомагнитный хвост. Если в потоке полярного ветра возбужден пучок волн Альфвена, пондеромоторная сила несколько повышает скорость ветра [Гульельми, Фейгин, 2018] и соответственно уменьшает плотность плазмы, что приводит к своеобразной самофокусировке волн Альфвена.

Обрисованная картина волн безусловно интересна сама по себе, однако вернемся к вопросу, который нас интересует с практической точки зрения, а именно: может ли повлиять поперечная структура поля в ИАР на точность предложенного нами мониторинга состояния ионосферы? Нужно со всей определенностью сказать, что поправки к частоте ω_n , связанные с учетом инерции электронов, несущественны. В самом деле, относительное изменение частоты можно оценить как

$$\delta = m_e c^2 / (4\pi e^2 Na), \quad (6)$$

где a — параметр гауссова пучка (см. выше); e и m_e — заряд и масса электрона; c — скорость света [Гульельми, 1979]. Нетрудно убедиться, что безразмерный параметр δ пренебрежимо мал по сравнению с единицей.

В заключение данного раздела статьи кратко обсудим вопрос о частотном диапазоне резонансных колебаний ионосферы. Он тесно связан с вопросом об автономности ИАР, поставленном в работе [Гульельми и др., 2023]. В самом деле, если снизу диапазон ИАР очевидным образом ограничен частотой фундаментальной моды колебаний, то вопрос об ограничении сверху более тонкий. Он требует численного расчета коэффициента отражения от верхнего торца резонатора. Такой расчет можно сделать стандартным методом Рунге — Кутты для каждого конкретного профиля распределения скорости Альфвена по вертикали. Вполне понятно, что на достаточно высоких частотах коэффициент отражения будет мал и добротность резонатора будет резко понижена. Ориентировочные оценки показывают, что для типичного профиля скорости Альфвена верхняя граница не превышает 5–8 Гц, что вполне согласуется с практикой наблюдения ИАР.

ВЫВОДЫ

В этой статье мы показали возможность оценки максимальной электронной концентрации в ионосфере на основе анализа измеренных частот гармоник излучения ИАР и описали практическую методику измерений и анализа. Кроме того, мы оценили величину ошибок определения максимальной электронной концентрации в ионосфере и ее зависимость от местного времени для зимнего сезона. Для других сезонов мы указали примерные интервалы местного времени, когда наблюдаются спектральные полосы ИАР, пригодные для измерения их частот и определения по ним оценки электронной концентрации. В конце мы кратко обсудили возможное влияние на спектр излучения распределения поля в поперечном оси резонатора направлении, а также вопрос о верхней границе частотного диапазона резонансных колебаний ионосферы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00280, [<https://rscf.ru/project/22-27-00280/>]. В части проведения наблюдений на оборудовании Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>] исследования были поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. *Докл. АН СССР*. 1987. Т. 297. С. 840–843.

Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н., Исаев С.В. Экспериментальные исследования ионосферного альфвеновского резонатора по наблюдениям электромагнитного

шумового фона в солнечном цикле 1985–1995 гг. *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1997. Т. 40, № 10. С. 1305–1319.

Гетманов В.Г., Довбня Б.В., Корнилов А.С. Оценка частотных и амплитудных параметров геомагнитных пульсаций типа «серпентинная эмиссия». *Геомагнетизм и аэронаука*. 2018. Т. 58, № 4. С. 540–550.

Гульельми А.В. *МГД-волны в околоземной плазме*. М.: Наука, 1979. 139 с.

Гульельми А.В., Потапов А.С. Об особенностях поля МГД-волны в неоднородной плазме. *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. 1984. Вып. 70. С. 149–157.

Гульельми А.В., Фейгин Ф.З. Воздействие пондеромоторных сил на магнитосферу Земли. *Физика Земли*. 2018. № 5. С. 53–60. DOI: [10.1134/S1069351318050075](https://doi.org/10.1134/S1069351318050075).

Гульельми А.В., Клайн Б.И., Потапов А.С. О спектре ультранизкочастотных колебаний ионосферы в диапазоне Pc1. *Геофизические исследования*. 2023. Т. 24, № 1. С. 74–84. DOI: [10.21455/gr2023.1-5](https://doi.org/10.21455/gr2023.1-5).

Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Поляков С.В. Исследование особенностей резонансной структуры спектра фонового шума в диапазоне частот 1–10 Гц с учетом наклона магнитного поля Земли. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 7. С. 575–584.

Ермакова Е.Н., Поляков С.В., Семенова Н.В. Исследование тонкой структуры в спектре фонового низкочастотного шума на средних широтах. *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXIV Annual Seminar. Apatity*. 2011. Т. 34, № 2. Р. 147–150.

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

Поляков С.В. О свойствах ионосферного альфвеновского резонатора. *Тезисы докладов Симпозиума КАПГ по солнечно-земной физике. Часть 3*. М.: Наука, 1976. С. 72–73.

Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор. *Геомагнетизм и аэронаука*. 1981. Т. 21, № 5. С. 816–822.

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Ойнац А.В. и др. Первый опыт оценки ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 2. С. 192–202. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-2-192-202](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-192-202).

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Цэгмэд Б. Морфология и диагностический потенциал ионосферного альфвеновского резонатора. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 39–56. DOI: [10.12737/szf-73202104](https://doi.org/10.12737/szf-73202104).

Baru N., Koloskov A., Yampolsky Y., Rakhmatulin R. Multipoint observations of Ionospheric Alfvén Resonance. *Adv. Astron. Space Phys.* 2016. Vol. 6, no. 1. P. 45–49. DOI: [10.17721/2227-1481.6.45-49](https://doi.org/10.17721/2227-1481.6.45-49).

Beggan C.D. Automatic detection of ionospheric Alfvén resonances using signal and image processing techniques. *Ann. Geophys.* 2014. Vol. 32. P. 951–958. DOI: [10.5194/angeo-32-951-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-951-2014).

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. Theory for the formation of resonance structure in the spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1989. Vol. 32, no. 7. P. 594–601.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Yu. The ionospheric Alfvén resonator. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1990. Vol. 52, no. 9. P. 781–788.

Belyaev P.P., Böisinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator.

- J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, iss. A3. P. 4305–4317. DOI: [10.1029/1998JA900062](https://doi.org/10.1029/1998JA900062).
- Bösinger T., Haldoupis C., Belyaev P.P., et al. Special properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station ($L=1.3$). *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, A10. P. 1281–1289. DOI: [10.1029/2001JA005076](https://doi.org/10.1029/2001JA005076).
- Bösinger T., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. Fine structure in ionospheric Alfvén resonator spectra observed at low latitude ($L=1.3$). *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. L18802. DOI: [10.1029/2004GL020777](https://doi.org/10.1029/2004GL020777).
- Chaston C.C., Bonnell J.W., Carlson C.W., et al. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A11. P. 1413.
- Demekhov A.G., Belyaev P.P., Isaev S.V., et al. Modeling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc1 frequency range. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 257–265. DOI: [10.1016/S1364-6826\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00119-4).
- 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. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 117. P. 81–87. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.05.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.05.013).
- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A., Ermakova E.N. Modeling diurnal variations of the IAR parameters. *Acta Geod. Geophys.* 2016. Vol. 51, no. 4. P. 597–617. DOI: [10.1007/s40328-015-0158-9](https://doi.org/10.1007/s40328-015-0158-9).
- Greifinger C., Greifinger P. Theory of hydromagnetic propagation in the ionospheric waveguide. *J. Geophys. Res.* 1968. Vol. 73. P. 7473–7490.
- Guglielmi A., Potapov A., Russell C. The ion cyclotron resonator. *JETP Letters.* 2000. Vol. 72, iss. 6. P. 432–435.
- Hasegawa A., Chen L. Theory of magnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1974. Vol. 16. P. 347–359.
- Lysak R.L. Feedback instability of the ionospheric resonant cavity. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, no. A2. P. 1553–1568.
- Lysak R.L. Magnetosphere–ionosphere coupling by Alfvén waves at midlatitudes. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. A07201. DOI: [10.1029/2004JA010454](https://doi.org/10.1029/2004JA010454).
- Lysak R.L., Yoshikawa A. Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere. *Magnetospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions. Geophys. Monograph Ser.* 2006. Vol. 169. P. 289–306. Washington: American Geophysical Union Publ., DC, USA, 2006.
- Lysak R.L., Waters C.L., Sciffer M.D. Modeling of the ionospheric Alfvén resonator in dipolar geometry. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118, no. 4. P. 1514–1528. DOI: [10.1002/jgra.50090](https://doi.org/10.1002/jgra.50090).
- Marangio P., Christodoulou V., Filgueira R., et al. Automatic detection of ionospheric Alfvén resonances in magnetic spectrograms using U-net. *Computers and Geosciences.* 2020. Vol. 145. Article 104598. DOI: [10.1016/j.cageo.2020.104598](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104598).
- Parent A., Mann I.R., Rae I.J. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. Vol. 115. Art. no. A02312. DOI: [10.1029/2009JA014673](https://doi.org/10.1029/2009JA014673).
- Pokhotelov O.A., Pokhotelov D., Streltsov A., et al. Dispersive ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. A4. P. 7737–7746. DOI: [10.1029/1999JA900480](https://doi.org/10.1029/1999JA900480).
- Pokhotelov O.A., Khrushev V., Parrot S., et al. Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feed-back instability. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, no. A11. P. 25813–258234. DOI: [10.1029/2000JA000450](https://doi.org/10.1029/2000JA000450).
- Pokhotelov O.A., Feygin F.Z., Khabazin Yu, et al. Observations of IAR spectral resonance at a large triangle of geophysical observatories. *Proc. XXVI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity: Kola, Science Center, RAS.* 2003. P. 123–126.
- Potapov A.S., Polyushkina T.N. Response of IAR frequency scale to solar and magnetic activity in solar cycle 24. *AIMS Geosciences.* 2020a. Vol. 6, iss. 4. P. 545–560. DOI: [10.3934/geosci.2020031](https://doi.org/10.3934/geosci.2020031).
- Potapov A.S., Polyushkina T.N. Estimation of the ionosphere critical frequency without radio sounding. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2020b. Vol. 58, no. 7. P. 5058–5065. DOI: [10.1109/TGRS.2020.2972011](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2972011).
- Potapov A., Polyushkina T., Dovbnya B., et al. Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 119. P. 91–101. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.07.001).
- Potapov A.S., Guglielmi A.V., Klain B.I. Discrete spectrum of ULF oscillations of the ionosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2022a. Vol. 60. Art. no. 4600505. DOI: [10.1109/TGRS.2021.3092738](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3092738).
- Potapov A.S., Guglielmi A.V., Klain B.I. Ratio between discrete IAR frequencies from observations in the solar cycle 24. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2022b. Vol. 60. Art. no. 2004605. DOI: [10.1109/TGRS.2022.3170473](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3170473).
- Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding support of over-the-horizon radar. *Radio Sci.* 1997. Vol. 32, no. 4. P. 1681–1694. DOI: [10.1029/97RS00841](https://doi.org/10.1029/97RS00841).
- Reinisch B.W., Huang X.-Q., Belehaki A., et al. Modeling the IRI topside profile using scale height from ground-based ionosonde measurements. *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 34. P. 2026–2031. DOI: [10.1016/j.asr.2004.06.012](https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.06.012).
- Schumann W.O. On the radiation free self oscillations of a conducting sphere, which is surrounded by an air layer and an ionospheric shell. *Z Naturforsch.* 1952. Vol. 72. P. 149–155.
- Semenova N.V., Yahnin A.G., Vasil’ev A.N., Amm O. Specific features of resonance structures in spectra of ULF electromagnetic noise at high latitudes (Barentsburg Observatory). *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008. Vol. 48. P. 36–44. DOI: [10.1007/s11478-008-1005-8](https://doi.org/10.1007/s11478-008-1005-8).
- Simões F., Klenzing J., Ivanov S., et al. Detection of ionospheric Alfvén resonator signatures in the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.: Space Res.* 2012. Vol. 117. A11305. DOI: [10.1029/2012JA017709](https://doi.org/10.1029/2012JA017709).
- Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1974. Vol. 22. P. 483–491.
- Stanislawska I., Juchnikowski G., Gulyaeva T.L. Correlation distances based on ionospheric and geomagnetic catalogues. Proc. STP-V Workshop. Hitachi, Japan. 1997. P. 387–390.
- Surkov V.V., Pokhotelov O.A., Parrot M., et al. Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 2877–2889. DOI: [10.5194/angeo-22-2877-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-2877-2004).
- Surkov V.V., Hayakawa M., Schekotov A.Y., et al. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, iss. A1. A01303. DOI: [10.1029/2005JA011320](https://doi.org/10.1029/2005JA011320).
- 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. Vol. 21. P. 779–786. DOI: [10.5194/angeo-21-779-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-779-2003).
- URL: <https://data.kmio.istp.ac.ru> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).
- URL: <https://rscf.ru/project/22-27-00280/> (дата обращения 19 апреля 2023 г.).
- Как цитировать эту статью:*
 Потапов А.С., Полошкина Т.Н., Гульельми А.В., Ратовский К.Г., Москалев И.С. Спектральный анализ излучения ИАР для определения величины и изменчивости максимума электронной концентрации N_mF2 . *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 3. С. 47–57. DOI: [10.12737/szf-93202306](https://doi.org/10.12737/szf-93202306).