

УДК 533.951

ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ НА ИОНОГРАММАХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНЕШНЕГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С РАЗНЫХ ВЫСОТ ОРБИТЫ

Н.Г. Котонаева, Е.С. Перминова

Поступила в редакцию 18 января 2016 г.

Проводится численный анализ значений частот, на которых возможно возникновение электронных резонансов при проведении радиозондирования ионосферы со спутника, находящегося на орбитах от 500 до 25000 км. Рассматриваются гироманнитный резонанс, плазменные резонансы на обыкновенной и необыкновенной компонентах и верхнегибридный резонанс.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ВНЕШНЕЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЗОНАНС, ГИРОМАГНИТНАЯ ЧАСТОТА.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении исследования ионосферы с использованием ионозонда, установленного на искусственном спутнике Земли (ИСЗ), основной задачей является определение концентрации электронов под ИСЗ. Однако несомненный интерес представляет собой также изучение волновых процессов в ионосферной плазме в широком диапазоне частот. Передатчика ионозонда на борту ИСЗ, работающий в импульсном режиме в диапазоне частот от 1 до 20 МГц, создаёт электромагнитные поля, искусственно возбуждающие шумы, резонирующие с собственными колебаниями ионосферной плазмы. Явления электронных резонансов в ионосферной плазме исследовались уже на многих спутниках. Обычно для их регистрации на борту устанавливается радиоспектрометр. Однако и сам ионозонд является инструментом, фиксирующим возбуждаемые им самим резонансы ионосферной плазмы на ионограммах в виде вертикальных пиков на одной частоте с существенной действующей дальностью.

Наиболее ожидаемые для исследователя резонансы фиксируются на гирочастоте и ее гармониках

$$f_{\text{He}} = \frac{eB}{2\pi m_e}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона; m_e — масса электрона; B — магнитное поле Земли.

Впервые плазменные резонансы были обнаружены на ионограммах ИСЗ Alouette-1. Ионосферная аппаратура и особенно антенна на этом ИСЗ были настолько совершенны, что гармоники гирочастоты фиксировались до номера $n = 22$ [1].

Частоты гирорезонансов вдоль орбиты спутника несут информацию о величине и об изменении величины вектора магнитной индукции.

На рисунке 1 представлены две ионограммы ИСЗ «Космос 1809», полученные через 80 с, с отмеченным гирорезонансами на гирочастоте и двух первых кратных частотах. Отметим, что вычисленная по модели IGRF, гирочастота в этом месте должна была бы равняться 1,2 МГц, но ионозонд ее регистрирует на частоте 1,05 МГц.

Второй вид резонансов, регистрируемых бортовым ионозондом — плазменный электронный резонанс. Резонанс, возникающий на высоте ИСЗ, вызванный тем, что собственная частота плазменных колебаний совпадает с излучённым сигналом ионозонда. Резонанс возникает, если частота плазменных колебаний находится в диапазоне рабочих частот ионозонда. Отметим, что резонанс наблюдается на частоте каждой из компонент магниторасщепленного сигнала, как обыкновенной О-компоненты, так и необыкновенной Х-компоненты, однако на частоте появления Z-компоненты

обычно не проявлялся. Что может свидетельствовать об особом характере распространения этого вида волны.

Частота плазменного резонанса для обыкновенной компоненты связана с концентрацией электронов по формуле (2)

$$f_N = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e}}, \quad (2)$$

где N_e — концентрация электронов.

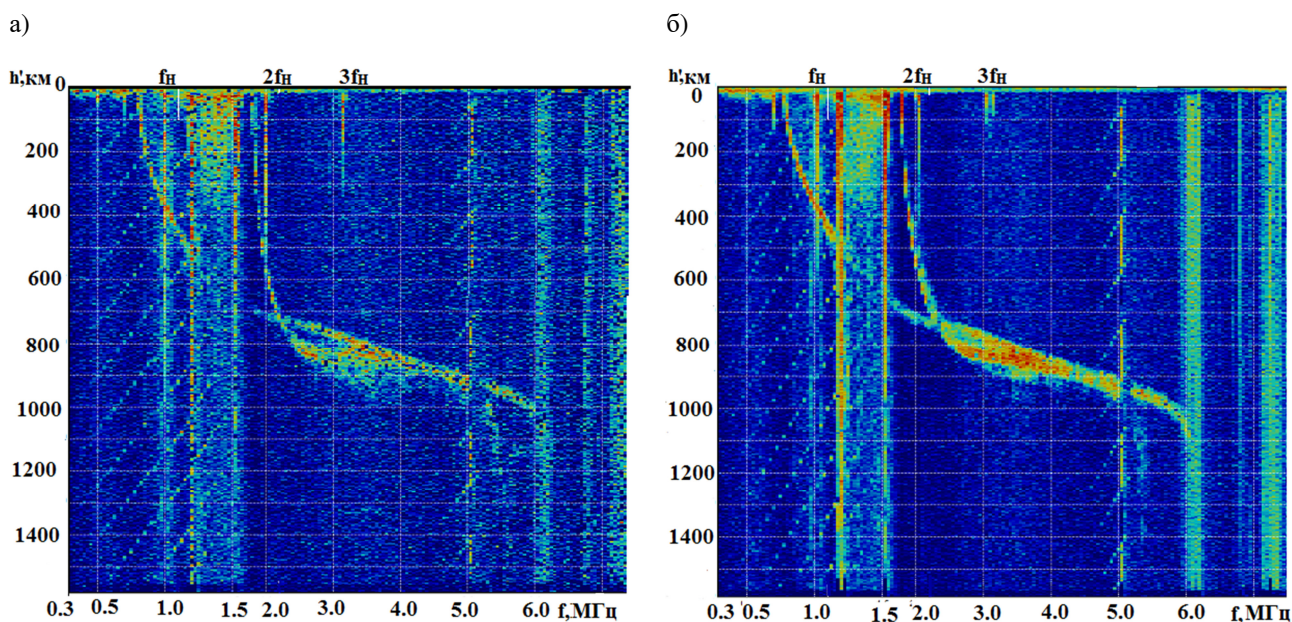


Рис. 1. Ионограммы спутника Космос-1809 на 18.05.1987 год. Высота: 975 км.

а) Время: 22:43:13 UT 16.0 LT. Координаты: 59.6 с.ш. 90.7 з.д.;

б) Время: 22:44:33 UT 16.1 LT. Координаты: 64.1 с.ш. 88.4 з.д.

На рисунке 2 представлены ионограммы с борта орбитального комплекса (ОК) «Мир», полученные в цифровом (внизу) и аналоговом (вверху) виде. Аналоговая запись ионограммы включает в себя информацию об амплитуде принимаемого сигнала, выраженную в цветовой гамме. Цифровые ионограммы записаны на некотором амплитудном срезе, и информация об амплитудах на них потеряна. Цифровые ионограммы сохранялись в режиме запоминания на борту, а аналоговые принимались на ионосферных станциях при пролете над ними ОК «Мир». Короткие следы отражений от ионосферы О- и Х-компонент начинаются с вертикальных пиков – плазменных резонансов на плазменной частоте на высоте орбиты ОК «Мир», составлявшей приблизительно 350 км. На ионограмме слева резонанс имеет меньшую амплитуду, поэтому на аналоговой ионограмме он различим, а на цифровой не отмечен. На правой ионограмме резонансные пики зафиксированы при обоих режимах запоминания. Отметим, что плазменные резонансы с высоты орбиты 350 км были ярко выражены, а гиromaгнитные резонансы сливались с общим шумом и не различались.

Кроме указанных видов резонансов при вертикальном радиозондировании определяют также верхнегибридный резонанс. Верхняя гибридная частота f_T связана с гирочастотой и плазменной частотой выражением [2]

$$f_T = \sqrt{f_N^2 + f_{He}^2}$$

В тех случаях, когда плазменная частота на высоте спутника значительно превышает гирочастоту, верхнегибридный резонанс сливается с плазменным. Так на ионограммах ОК «Мир» верхний гибридный резонанс не наблюдался, а плазменный на О- и Х- компонентах наблюдался всегда (рис. 2).

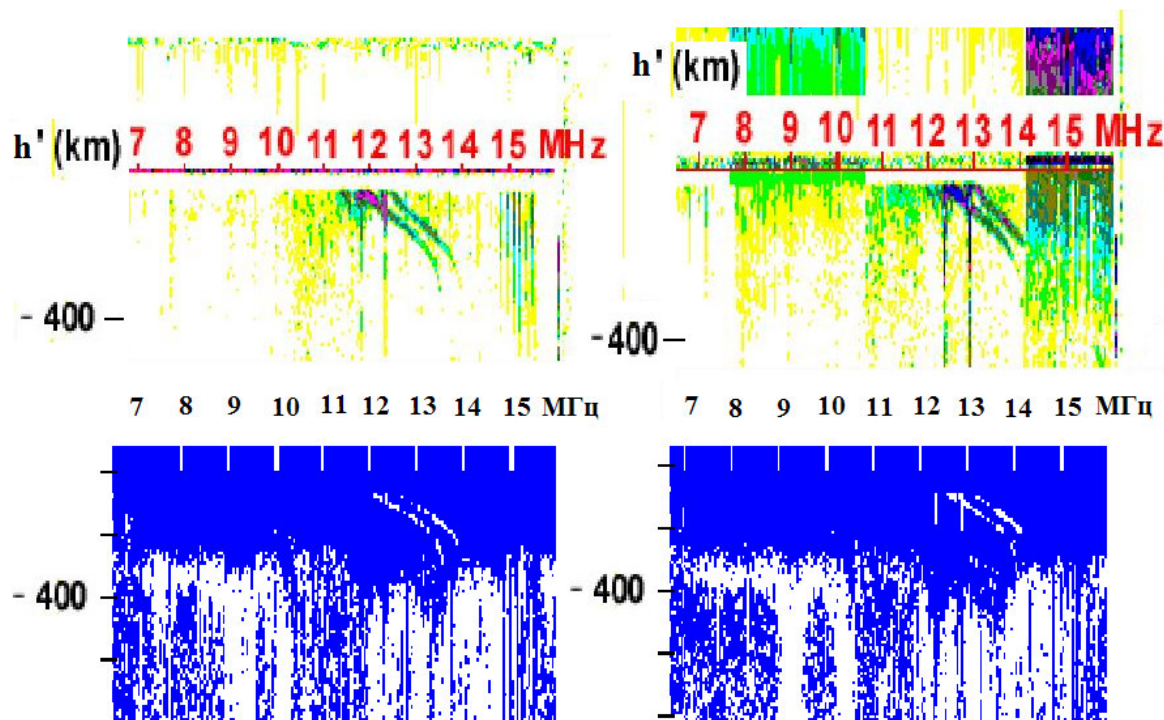


Рис. 2. Ионограммы ОК «Мир» на 21.04.1999 год. Вверху, полученные по телеметрии 137 МГц на ионосферной станции Chung-Li. Внизу, аналогичные, полученные в режиме запоминания на борту.

При малых концентрациях электронов в окрестности спутника, напротив, более ярко выраженным является верхнегибридный резонанс и по нему и частоте гирорезонанса зачастую рассчитывают частоту отсечки — частоту резонанса на соответствующей магнитной компоненте сигнала.

Таким образом, согласно [3] на ионограммах наблюдаются некоторые продолжительные пики, имеющие начало на высоте полета спутника. На данный момент эти следы интерпретируются как некоторые резонансные пики, где резонирует околоаппаратная плазма, продолжительность жизни резонансов различная. На ИСЗ Alouette-1 относительно плазменных резонансов был получен настолько богатый материал, что дальнейшее развитие эксперимента (на ИСЗ Alouette-2, ISIS-1 и ISIS-2) шло, в основном, в плане более детального изучения этих резонансов [1]. Экспериментальные данные выдают пики на частотах: f_{He} , f_N , f_T , часто встречающиеся гармоники $2f_N$, $3f_N$, $2f_T$, пик $2f_N$, наблюдаются редко, никогда не наблюдаются пики $3f_N$, $4f_N$ и т.д., а также $3f_T$, $4f_T$ [4].

При возможном увеличении высоты орбиты спутника с ионозондом на борту интересен вопрос, на каких частотах будут наблюдаться электронные резонансы, и возможна ли их регистрация при расположении спутника на высоких орбитах.

РАСЧЕТЫ

На рисунке 3 пунктирной линией представлены профили гиромангнитной частоты, плазменной частоты и частоты верхнегибридного резонансов в точке с координатами (90° с.ш., 0° в.д.) для 01.01.2015 г. Модели в районах полюсов имеют наибольшие погрешности, поэтому идея использовать данные электронных резонансов для их корректировки имеет смысл. Данная точка взята условно, чтобы исключить суточную зависимость плазменных частот. Все приведенные ниже значения, таким образом, носят оценочный характер. Значения индукции магнитного поля рассчитаны по международной модели среднего глобального магнитного поля Земли (IGRF). Значения плазменных частот до 200 км взяты из модели IRI, выше из модели NeQuick.

Исходим из того, что наименьшая частота работы ионозонда — 1 МГц. Рисунок 3 показывает, что при зондировании с высоты близкой к 1000 км, на ионограммах внешнего зондирования из арктической зоны могут наблюдаться пики плазменных, гиромангнитных резонансов. Причем на высотах меньших 700 км плазменный резонанс на частоте обыкновенной компоненты и верхнегибридный резонансы мало отличаются. На высотах от 1000 до 3000 км на ионограммах могут отмечаться резонансы на второй и выше гармониках гиромангнитной частоты. При наличии резонансов на второй и

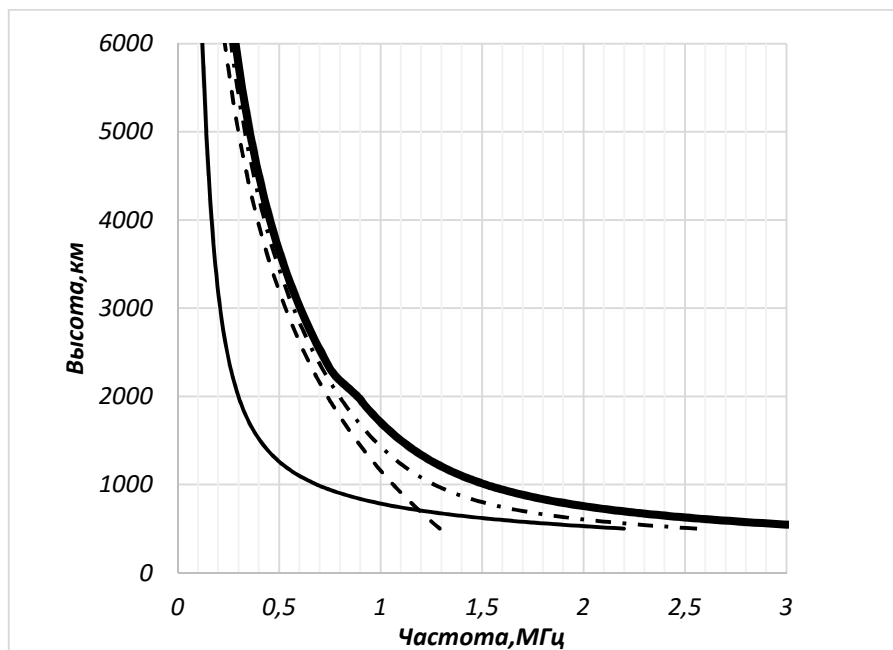


Рис. 3. Профили резонансных частот для точки (90° с.ш., 0° в.д.) для высот до 6000 км.
Сплошные линии (тонкая) — плазменная частота,
(толстая) — частота плазменного резонанса на X- компоненте,
пунктирная линия — гиромагнитная частота,
штрих-пунктирная линия — верхнегибридный резонанс

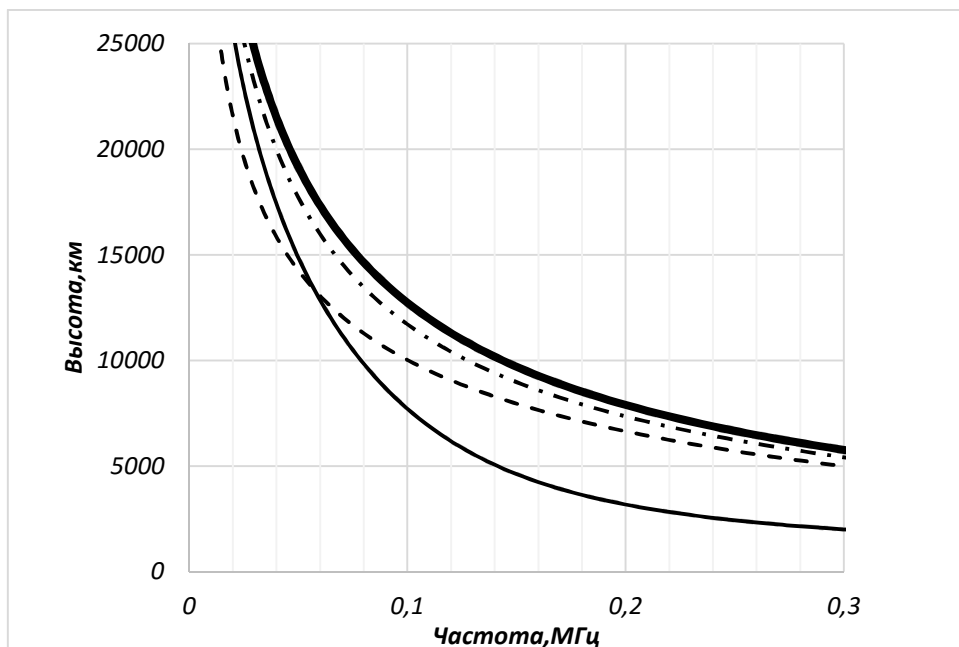


Рис. 4. Профили резонансных частот для точки (90° с.ш., 0° в.д.) для высот выше 5000 км.
Сплошные линии (тонкая) — плазменная частота,
(толстая) — частота плазменного резонанса на X- компоненте,
пунктирная линия — гиромагнитная частота,
штрих-пунктирная линия — верхнегибридный резонанс

третьей гармониках по их разностям можно определить величину гирочастоты, а, следовательно, сделать поправку величины магнитной индукции по (1) при расчетах параметров радиотрасс. На высотах от 3000 до 5000 км на ионограммах могут отмечаться резонансы на третьей и выше гармониках гиромагнитной частоты. На этих высотах при наличии подобного пика на частоте близкой к 1 МГц эту частоту с большой вероятностью можно принять равной $3 f_{He}$. На высотах выше 6000 км гиромагнитные резонансы будут неразличимы. Значения гиромагнитных частот на этих высотах представлены на рис. 4.

Говоря о плазменных резонансах, нужно отметить, что в связи с резким падением концентрации электронов, в арктической зоне плазменные частоты уже на высотах, начиная с 700 км, будут ниже гиромагнитной частоты. На высотах близких к 1000 км плазменный резонанс на частоте обыкновенной компоненты уже не будет наблюдаться (рис.3). Разница в частотах плазменных резонансов О- и Х-компонент определяется из выражений

$$f_N^2 = f_x^2 - f_{He} \cdot f_x, \quad (3)$$

$$f_x = \frac{f_{He} + \sqrt{f_{He}^2 + 4f_N^2}}{2}, \quad (4)$$

Обычно на низких высотах пренебрегаю значением f_{He} по сравнению с f_N , эту зависимость используют в виде $f_x \approx f_N + \frac{f_{He}}{2}$. Однако, как следует из рис.3, на высотах больших 1200 км плазменная частота уже в два раза меньше гиромагнитной, поэтому данное приближение недопустимо.

Из рисунка 3 следует, резонанс на частоте необыкновенной компоненты будет наблюдаться до 1800 км. На высотах до 2500 км возможно наблюдение резонанса на второй гармонике плазменной частоты Х-компоненты. Таким образом, как и следовало ожидать, след Х-компоненты более информативен, чем след О-компоненты.

Из (3) и (4) следует формула определения гирочастоты по частотам отсечки о- и х-компоненты:

$$f_{He} = \frac{f_x^2 - f_N^2}{f_x}, \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет определить значение гирочастоты по частотам резонансов на обыкновенной и необыкновенной компонентах на высоте спутника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает несомненную информативность сведений о плазменных резонансах на ионограммах внешнего радиозондирования. Однако все эти свойства можно использовать при высоте орбиты спутника ниже 2000 км.

Надо отметить, что «попутные» исследования плазменных резонансов с использованием только ионозонда все-таки имеют ограниченные возможности. Для получения большей информации необходимо введение изменений как в программе эксперимента, так и в характеристиках ионозонда. В [1] кратко описаны необходимые изменения. Приведем их в этой статье.

1. Для исследования разного рода плазменных явлений эксперимент должен быть более гибким. Так, например, необходимо запланировать режимы работы, когда передатчик работает на любой фиксированной частоте, а приемник перестраивается в некотором диапазоне. И наоборот, передатчик возбуждает плазму во всем диапазоне частот, а приемник регистрирует реакцию плазмы на фиксированной частоте.

2. Мощность передатчика должна меняться (уменьшаться), чтобы можно было исследовать условия возбуждения плазменных резонансов.

3. Точно также должна быть предусмотрена возможность изменения в процессе эксперимента длительности зондирующего импульса в довольно широких пределах.

4. Длительность двойного гибридного резонанса достигает 30 мс. Для наблюдения подобных длительных плазменных явлений частота зондирования должна быть снижена до 30 Гц.

5. Точно также для исследования тонкой структуры плазменных резонансов шаг по частоте должен быть уменьшен с 25–50 кГц до 10–15 кГц.

6. Для выделения следов отражений, даже в условиях сильной диффузности, можно ограничиться регистрацией на каждой частоте 10–20 отражений (сигналов). Для исследований длительных плазменных явлений это число должно быть увеличено до 200, т.е. на порядок.

7. С другой стороны, наблюдения плазменных резонансов не требуют такой регулярности, как при непрерывном мониторинге ионосферы, поэтому ионограммы могут регистрироваться реже. Тем более, что время, затрачиваемое на получение одной ионограммы возрастает.

8. Для регистрации плазменных явлений приемника ионозонда недостаточно, даже при гибком режиме работы. Он должен быть совмещен с радиоспектрометром, который производит измерения в очень широком диапазоне частот от 20 Гц до 10 МГц, т.е. охватывает и НЧ и ВЧ диапазоны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпачев А.Т. Основные принципы внешнего зондирования ионосферы. Сайт ИЗМИРАН. Архивировано из первоисточника 30 ноября 2015 г.
2. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / М.: Наука, 1978. – 342 с.
3. Hagg, E.L., Hewens, E.J., Nelms, G.L. The interpretation of topside sounder ionograms / Proceedings of the IEEE, vol.57, issue, 6, pp. 949–960.
4. Хагг Е., Хьюэнс Е., Нелмс Дж. Интерпретация ионограмм внешнего зондирования. Зондирование ионосферы сверху./ Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. Т.67, № 6, – перевод с английского под ред. М.Н. Фаткулина. - М.: Мир, 1969. – с. 106–118.

THE RESONANCES, WHAT CAN BE OBSERVED ON THE TOPSIDE SOUNDER IONOGRAMS AT DIFFERENT HEIGHTS OF SATELLITE

N.G. Kotonayeva, E.S. Perminova

This article concludes the numerical analyses of frequencies at which can be observed resonances on the topside sounder ionograms at heights of satellite from 500 to 25000 km. It is considered gyro-magnetic resonance, plasma resonance for O- and X – waves and upper hybrid resonance.

KEYWORDS: IONOSPHERE, TOPSIDE SOUNDER, RESONANCES, GYROFREQUENCY.