

Численное моделирование параметров Шумановского резонанса при солнечных вспышках различных классов

Е.С. Гончаров^{1,3}, А.Н. Ляхов², Т.В. Лосева²

¹Центр фундаментальных и прикладных исследований, ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

²Институт динамики геосфер РАН

³Московский физико-технический институт (государственный университет)

В данной работе описывается построение программного модуля для расчета параметров резонанса в сферической полости Земля-ионосфера методом конечных элементов в трехмерной постановке. В случае невозмущенной ионосферы, так называемый, Шумановский резонанс рассчитывался с использованием двух различных моделей D-слоя. Результат показывает хорошее согласие с экспериментом. Также, с помощью одной из моделей получены параметры резонанса при солнечных вспышках различных классов. На основе этих данных выявлена логарифмическая зависимость собственных частот от интенсивности солнечной вспышки.

ВВЕДЕНИЕ

В области сверхнизких частот (5-40 Гц) распространение электромагнитных волн происходит специфическим образом. Благодаря тому, что длина волны соизмерима с радиусом Земли, в СНЧ диапазоне могут наблюдаться глобальные резонансы, когда частота колебаний совпадает с собственной частотой резонатора, образованного сферической полостью между Землей и ионосферой. Так называемые, Шумановские колебания образуют систему стоячих волн, охватывающих весь земной шар, поэтому характеристики СНЧ колебаний, наблюдаемые в любом пункте, зависят от состояния ионосферы во всех точках. Следовательно, изучение резонансных колебаний позволило бы определять глобальные параметры нижней ионосферы, характеризующие ее состояние в целом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуемый резонатор представляет собой полость между двумя концентрическими сферами радиусами $R_{earth} = 6370$ км (Земля) и $R_{ion} = 6470$ км (верхняя границы D-слоя ионосферы). Таким образом, толщина волновода составляет $H = R_{ion} - R_{earth} = 100$ км.

Поиск собственных частот резонатора реализуется в пакете COMSOL Multiphysics[®] за счет решения методом конечных элементов волнового уравнения (1), полученного из системы уравнений Максвелла. В результате расчета получают комплексные значения частот (2). При построении моделей для изучения Шумановского резонанса критерием корректности обычно является совпадение набора рассчитанных собственных частот f_n , а так же их добротностей Q_n (3) с экспериментальными значениями.

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\tilde{f}_n = f_n + i\delta \quad (2)$$

$$Q_n = \frac{f_n}{2\delta} \quad (3)$$

В табл.1 представлены значения частот, рассчитанных для идеального, полого проводника. Полученные частоты, а так же кратность их вырождения $(2n+1)$, где n – номер частоты) совпадают с теоретическими значениями для идеального сферического проводника [1]:

$$f_n = 7,5\sqrt{n(n+1)}. \quad (4)$$

Однако, реальные частоты резонатора Земля-ионосфера отличаются от теоретических значений. Это связано с тем фактом, что поверхность Земли и граница ионосферы не являются идеальными проводниками, кроме того, ионосфера представляет собой многокомпонентную магнитоактивную плазму, неоднородную как в вертикальном, так и в поперечном направлении.

Электронная проводимость D-слоя рассчитывалась в приближении низких частот:

$$\sigma(h) = \frac{e^2 N_e \nu_{\text{эфф}}}{m_e (\omega^2 + \nu_{\text{эфф}}^2)} \approx \frac{e^2 N_e}{\nu_{\text{эфф}} m_e}, \quad (5)$$

где h [км] – высота над поверхностью Земли, m_e – заряд электрона, $\nu_{\text{эфф}}$ – эффективная частота соударений, N_e – электронная концентрация. Распределение электронной концентрации N_e и эффективных частот соударений в D-слое ионосферы для сравнения получены по двум моделям:

1) Общепринятое двухпараметрическое экспоненциальное приближение [2]:

$$N_e(h) = 78,57 \cdot \nu_{\text{эфф}}(h) \cdot \exp(\beta(h - H_p)) \quad (6)$$

$$\nu_{\text{эфф}}(h) = 1,86 \cdot 10^{11} \exp(-0.15h). \quad (7)$$

Параметры H_p и β рассчитываются по эмпирической модели [3]:

$$H_p = 74,37 - 8,087 \cos \chi + 5,779 \cos \theta + 1,213 \cos \varphi - 0,0044 \cdot X_4 - 6,035 \cdot X_5, \quad (8)$$

$$\beta = 0,5349 - 0,1658 \cos \chi - 0,0854 \cos \theta + 0,1296 \cdot X_5, \quad (9)$$

где χ – солнечный зенитный угол, θ – географическая широта, $\varphi = 2\pi \frac{m-0,5}{12}$ – учет сезонных вариаций (m – номер месяца), X_4 – количество солнечных пятен, X_5 – магнитная активность.

2) плазмохимическая 22-компонентная модель нижних слоев ионосферы, разработанная в Институте динамики геосфер РАН.

Приведено сравнение дневных и ночных профилей электронной концентрации, рассчитанных по двум моделям (рис.1). Наблюдается абсолютное количественное и качественное расхождение профилей ночной стороны Земли. Профили дневной стороны совпадают только на высотах 70-100 км.

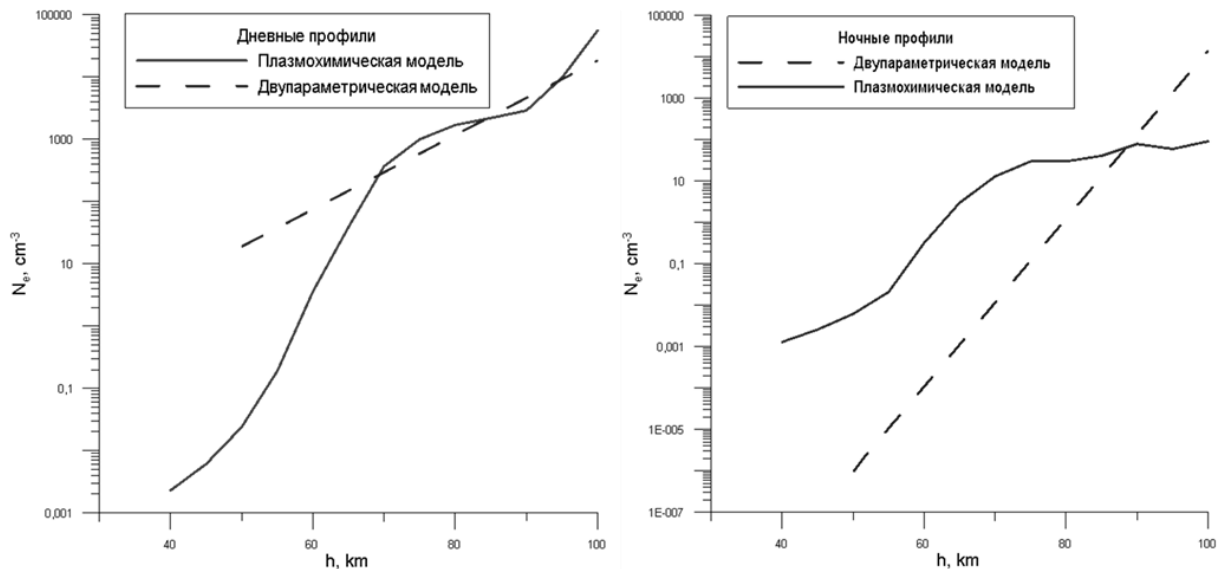


Рис.1. Графики сравнения профилей электронных концентраций по двум моделям: для дневной стороны Земли (слева), для ночной стороны Земли (справа).

ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ

Так как толщина полости волновода мала по сравнению с радиусом Земли ($H \ll R_{earth}$), сетку необходимо строить специфическим способом. Таким образом, строилась неравномерная сетка (рис.2) с помощью набора граничных слоев. В результате, разбиение составило 350000 элементов.

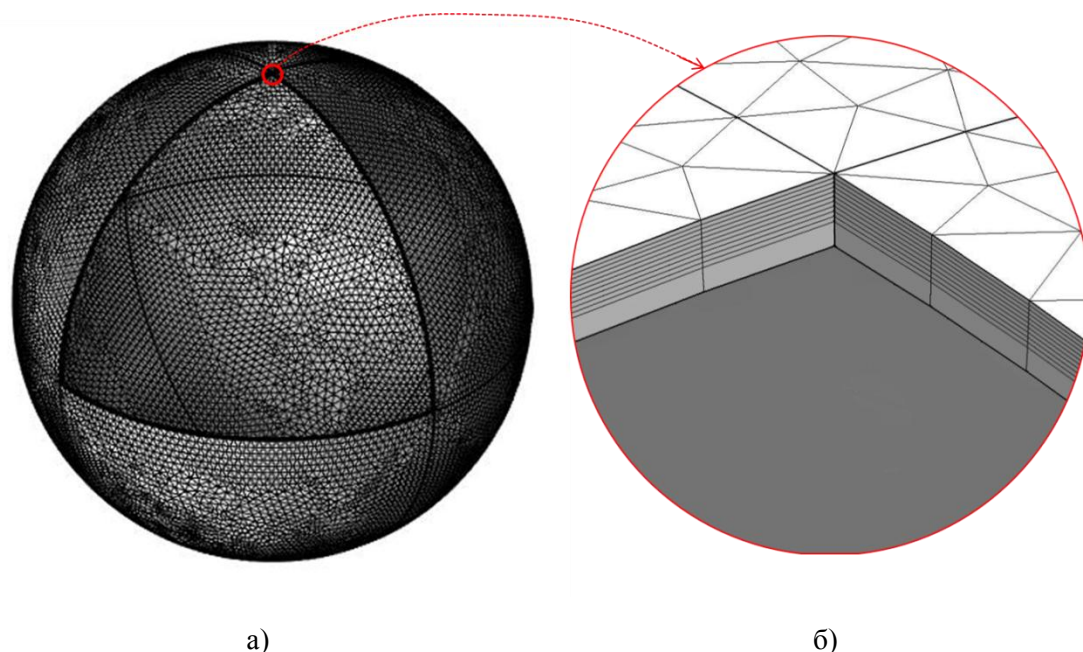


Рис.2 а) Схема расчетной сетки волновода, б) детальное изображение разбиения полости

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты проводились в пакете COMSOL Multiphysics® при помощи решателя MUMPS, на 28 ядерном компьютере с объемом ОЗУ 256 Гб. Получены параметры Шумановского резонанса по двум моделям D-слоя при отсутствии ионосферных возмущений. Как видно из табл. 1, плазмохимическая модель D-слоя дает собственные частоты и добротности, близкие к эксперименту, в то время как двухпараметрическая модель позволяет получить лишь приблизительную оценку.

Таблица 1

Номер собственной частоты	I	II	III	IV	V
Частоты полого резонатора с идеально проводящими стенками, Гц	10,5	18,2	25,7	33,2	40,6
Частоты, полученные по двухпараметрической модели, Гц	8,6	15,1	21,6	28,0	34,5
Частоты, полученные по плазмохимической модели, Гц	7,7	13,7	19,6	25,6	31,5
Экспериментальные значения частот [2], Гц	7,8	13,8	19,7	25,7	31,7
Добротности, полученные по двухпараметрической модели	9,1	9,6	10,2	10,0	10,2
Добротности полученные по плазмохимической модели	6,3	6,5	6,6	6,5	6,5
Экспериментальные значения добротностей [2]	4,6	6,0	6,6	6,8	6,9

Дальнейшие расчеты проводились с использованием плазмохимической модели. Воздействие солнечных рентгеновских вспышек на нижнюю ионосферу рассчитывалось по 22-х компонентной плазмохимической модели ионосферы, использующей измерения рентгеновских потоков на спутнике «GOES-15» (рис.3). В табл.2 приведено соответствие между потоком солнечного рентгена и классом вспышки.

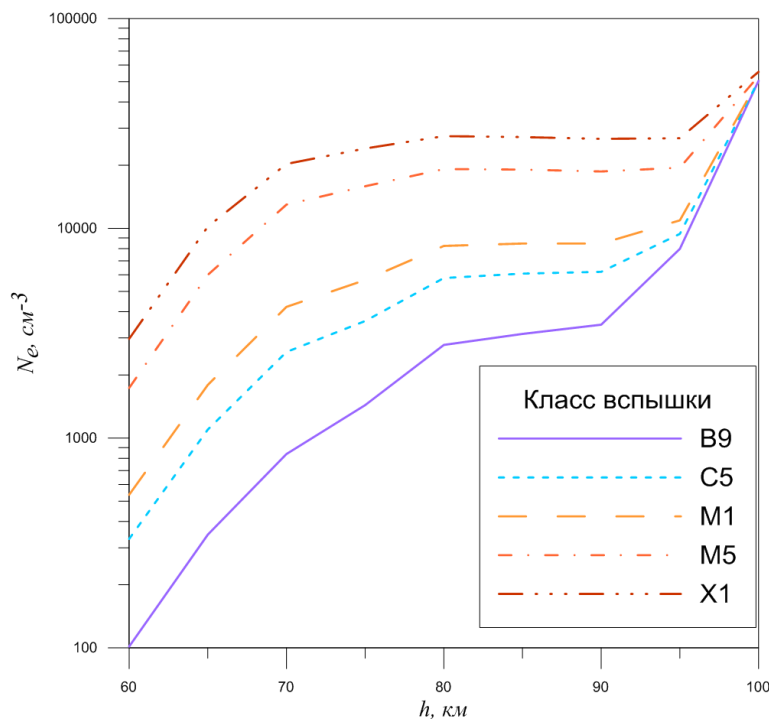


Рис.3 График профилей электронных концентраций полученных по плазмохимической модели для вспышек различных классов

Таблица 2

Класс вспышки	B9	C5	M1	M5	X1	X5
Поток рентгена, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$9 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$

Проведена серия расчетов резонансных параметров для солнечных вспышек различных классов. Результаты показали монотонный рост собственных частот резонатора с увеличением потока рентгена (рис.4). Как видно, изменения собственных частот, можно с хорошей точностью аппроксимировать логарифмической зависимостью:

$$\Delta f_n \sim \log(N). \quad (2)$$

Однако даже при очень мощных солнечных вспышках рост собственных частот составляет не более 5%, аналогичная тенденция наблюдается для добротностей.

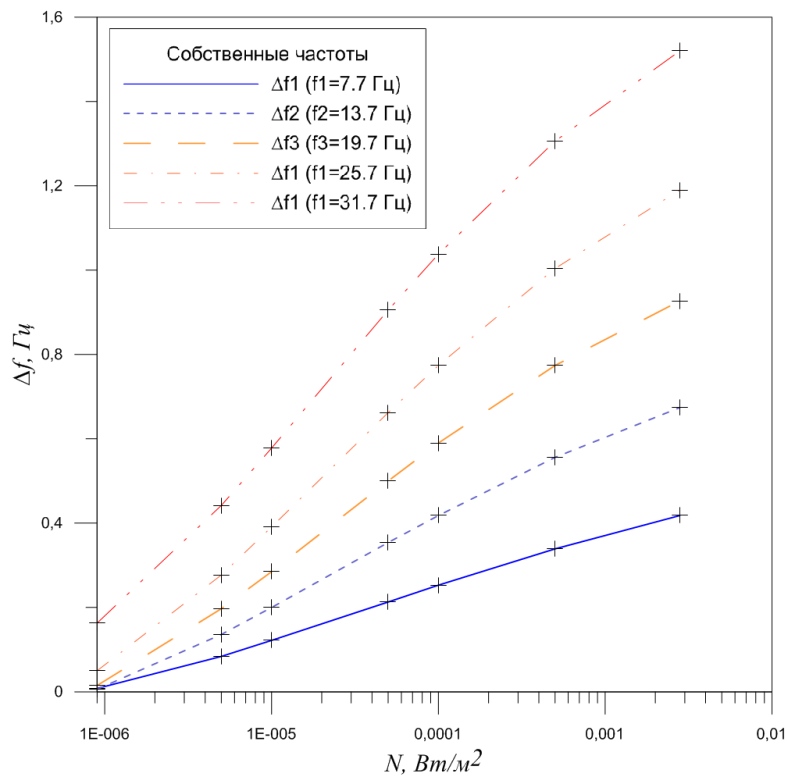


Рис.4 График зависимости изменения собственных частот резонатора от потока солнечного рентгена

ВЫВОДЫ

По итогам данной работы, для изучения резонанса Шумана создан программный модуль в системе COMSOL Multiphysics® для расчета собственных частот резонатора, образованного сферической полостью Земля-ионосфера, в трехмерной постановке. Проведены расчеты параметров резонансных частот для невозмущенной ионосферы, согласующиеся с экспериментом, а так же расчеты при вспышках различных классов. На основе полученных данных выявлена логарифмическая зависимость собственных частот от интенсивности солнечных вспышек.

Список литературы

1. Schumann, W.O.Z. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist // Zeitschrift und Naturforschung. 1952. V.7a, С. 149-154.
2. Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for LVF radio waves. - Tech. Note 300, - Boulder, Colorado. – NBS. – 1964.
3. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера. Киев: Наукова думка, 1977. 200 с.
4. Ferguson J.A.: Ionospheric profiles for predicting nighttime VLF/LF propagation. -Tech. Rep. 530, -San Diego, California, -NOSC, 1980.