

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК НА ПАРАМЕТРЫ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА**

***Ю.В. Поклад<sup>1</sup>, Б.Г. Гаврилов<sup>1</sup>, В.М. Ермак<sup>1</sup>, И.А. Ряховский<sup>1</sup>,  
Е.С. Гончаров<sup>1,2</sup>, А.Н. Ляхов<sup>1</sup>, Т.В. Лосева<sup>1</sup>, Ю.В. Корсунская<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт динамики геосфер Российской академии наук  
<sup>2</sup>ВНИИА им. Духова, Москва

В работе представлены результаты мониторинга собственных частот Шумановского резонатора в ГФО «Михнево» во время солнечных рентгеновских вспышек X-класса в сентябре 2017 года. Две вспышки (X8.3 и X9.4) имели близкую продолжительность, различаясь по энергии в 2 раза. Сдвиг собственных частот резонатора был зарегистрирован только в одном случае. Полученные результаты и их сравнение с теоретическими моделями показали необходимость учета в прогностических моделях не только балла (мощности) вспышки, но и ее интегральной энергетики.

### **Введение**

В средней атмосфере Земли существует неоднородный волновод, образованный проводящей поверхностью Земли и нижней ионосферой. Естественным источником электромагнитной энергии для накачки волновода являются разряды молний. Теоретические оценки, выполненные В.О. Шуманом [Shumann, 1952] для случая идеально проводящих границ, предсказали существование стоячих электромагнитных колебаний на частотах 10.6, 18.4, 26.0, 35.5 и 41.1 Гц. Наличие неоднородной нижней ионосферы приводит к снижению собственных частот до величин 7.8, 14.1, 20.3, 26.3 и 32.5 Гц [Madden and Thomson, 1965]. Существование таких колебаний было быстро подтверждено экспериментально, и в последние десятилетия было опубли-

ковано большое количество экспериментальных и теоретических работ по изучению свойств Шумановского резонатора. Было установлено, что значения собственных частот зависят от характеристик источника (глобальной грозовой активности), расстояния от приемника до источника и, что представляет наибольший интерес, от пространственного распределения электронной концентрации и проводимости нижней ионосферы. В предположении постоянной мощности источника вариации Шумановских частот можно использовать для определения осредненного профиля проводимости нижней ионосферы [Tran and Polk, 1979a,b; Chand et al., 2009]. Глобальность Шумановского резонатора позволяет использовать результаты наблюдений для анализа отклика нижней ионосферы и средней атмосферы на солнечные рентгеновские вспышки [Roldugin et al., 2004], протонные солнечные события [Roldugin et al., 2001, 2003] и даже на сильные землетрясения [Hayakawa et al., 2008]

В рамках развиваемой в ИДГ РАН идеи «геофизической вертикали» измерений параметров верхних геосфер в ГФО «Михнево» в 2017 году начато определение параметров Шумановского резонатора. Экспериментальные исследования подкреплены теоретическими разработками ИДГ РАН в области численных моделей нижней ионосферы и распространения электромагнитных волн КНЧ диапазона. Из возможных механизмов возмущений нижней ионосферы мы рассматриваем в данной работе только отклик на рентгеновскую солнечную вспышку. В предыдущих работах [Roldugin et al., 2004; Chand et al., 2009] основной упор делался на связь изменения собственных частот с баллом (мощностью) вспышки, то есть исследования в КНЧ диапазоне продолжали оставаться в рамках парадигмы моделей нижней ионосферы и ее ионизации рентгеновским излучением, разработанной ранее для задач распространения СДВ-ДВ радиоволн [Palit et al., 2013; Shmitter, 2013]. В наших исследованиях [Корсунская, 2015, 2016] было показано, что такой подход слишком узок и не учитывает целый ряд важных физических процессов. Ранее теоретические модели ИДГ РАН были успешно верифицированы в задаче прогноза распространения КВ-радиоволн [Ponomarchuk et al., 2015; Пономарчук и др., 2016]. Однако в случае КВ диапазона важно только интегральное затухание в нижней ионосфере, в то время как в Шумановском диапазоне частот становится значимым высотный (и пространственный) профиль проводимости.

В данной работе представлены экспериментальные результаты регистрации собственных частот Шумановских резонансов в ГФО «Михнево» во время последовательности рентгеновских солнечных вспышек в сентябре 2017 года и результаты численных расчетов по трехмерной пространственно-неоднородной модели Шумановского резонатора [Гончаров и др., 2017], использующей плазмохимическую модель D-слоя ионосферы и ионизации рентгеновским излучением разработки ИДГ РАН [Кудрявцев, 2008; Кудрявцев и др., 2009; Стрелков, 2012, 2014; Корсунская и др., 2013].

### Условия наблюдений и результаты

В ГФО «Михнево» в составе радиофизического комплекса с 2010 г. ведется мониторинг магнитного поля в диапазоне 0.001 Гц–30 кГц [Поклад и др., 2015, Гаврилов и др., 2015] с использованием магнитометров MFS-06 и MFS-07 фирмы «Metronix». Оси магнитометров ориентированы в направлениях магнитный север-юг (компонента  $H_x$ ) и магнитный восток-запад (компонента  $H_y$ ). Сигнал оцифровывается с частотой 256 Гц многоканальным 24-х разрядным регистратором ADU-07.

Из первичных данных, после проведения спектрального анализа быстрым Фурье-преобразованием (БПФ), определяются собственные частоты, добротности и амплитуды первых четырех мод Шумановского резонатора по стандартной методике [Rosenberg, 2004] фитирования спектральной формы полиномом высокого порядка. Данные в графической и цифровой форме доступны на сайте ГФО «Михнево» ([http://idg-comp.chph.ras.ru/~mikhnevo/metronix/METRONIX\\_FULL/SHUMAN/](http://idg-comp.chph.ras.ru/~mikhnevo/metronix/METRONIX_FULL/SHUMAN/)).

В сентябре 2017 года произошли 2 рентгеновских вспышки X-класса. Вспышка класса X9.4 произошла 6 сентября около 12 часов UT. Вспышка класса X8.3 – 10 сентября около 1600UT. В качестве характеристики вспышки будем использовать не только ее балл (максимально наблюдаемый поток излучения в Вт/м<sup>2</sup>), но и интегральную энергию в Дж/м<sup>2</sup>. Вспышка 06.09 наблюдалась с 11:56:23UT до 13:38:00UT (по уровню 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup>), интегральная энергетика составила 0.45 Дж/м<sup>2</sup> в диапазоне 0.5–4 А и 1.41 Дж/м<sup>2</sup> в диапазоне 1–8 А соответственно. На уровне 2 · 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup> вспышка продолжалась с 11:56:50UT до 12:18:51UT с энергетикой 0.28 и 0.68 Дж/м<sup>2</sup> в диапазонах 0.5–4 и 1–8 А соответственно. Вспышка 10.09 наблюдалась с 15:54:19UT до 17:26:08UT (по уровню 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup>) с энергетикой 0.6 Дж/м<sup>2</sup> в диапазоне 0.5–4 А и 1.94 Дж/м<sup>2</sup> в диапазоне 1–8 А. На уровне 2 · 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup> вспышка длилась с 15:55:49UT до 16:52:16UT, ее энергетика составляла 0.54 и 1.65 Дж/м<sup>2</sup> в диапазонах 0.5–4 и 1–8 А соответственно.

Таким образом по уровню 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup> обе вспышки имели примерно одинаковую длительность – 104 и 92 минуты соответственно. Первая вспышка имела более крутой фронт и, не смотря на большую амплитуду, ее энергетика была в 1.35 раза меньше. По уровню 2 · 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup> первая вспышка была короче второй – 22 минуты и 56.5 минут соответственно, а ее энергия была почти в 2 раза меньше в диапазоне 0.5–4 А и в 2.4 раза меньше в диапазоне 1–8 А.

Ближние баллы и продолжительность вспышек по уровню 10<sup>-4</sup> Вт/м<sup>2</sup> (переход в X класс) проявили себя в параметрах Шумановского резонанса совершенно разным образом (рис. 1). Для первой вспышки отклонения собственных частот остались на уровне шумов, а вот вторая вспышка продемонстрировала четкое нарастание собственной частоты по каналу измерений Y-компоненты магнитного поля на 0.2 Гц для первой моды Шумана, на 0.5 Гц для второй моды и около 1 Гц для третьей моды. Глобальность резонатора позволяет исключить местные эффекты и сделать вывод именно о разнице в отклике нижней ионосферы и средней атмосферы на поток рентгеновского излучения.

Результаты численных расчетов Шумановского резонатора для условий солнечных вспышек различных классов предсказали монотонный рост собственных частот с увеличением потока рентгеновского излучения (рис. 2). Для используемых моделей ионизации и плазмохимических процессов в нижней ионосфере расчетные изменения собственных частот линейно зависят от потока рентгеновского излучения:  $\Delta f_n = A + B \log_{10}(W)$ , где  $W$  – поток рентгеновского излучения [Вт/м<sup>2</sup>], измеренный на спутнике GOES в диапазоне длин волн 0.5–8 А. Расчетные значения коэффициентов представлены в Таблице.

Для описанных выше двух солнечных вспышек расчетные величины  $\Delta f_n$  ( $n = 1...3$ ) составляют 0.3, 0.5 и 0.7 Гц соответственно, что находится в хорошем согласии с результатами, полученными во время второй вспышки. Этот результат является еще одним доказательством возможности использования измерений Шумановских резонансов для верификации моделей нижней ионосферы [Гончаров и др., 2017].

Расхождение с данными первой вспышки подтверждает необходимость включения в расчет либо реальной динамики высотного профиля ионизации, расщип-

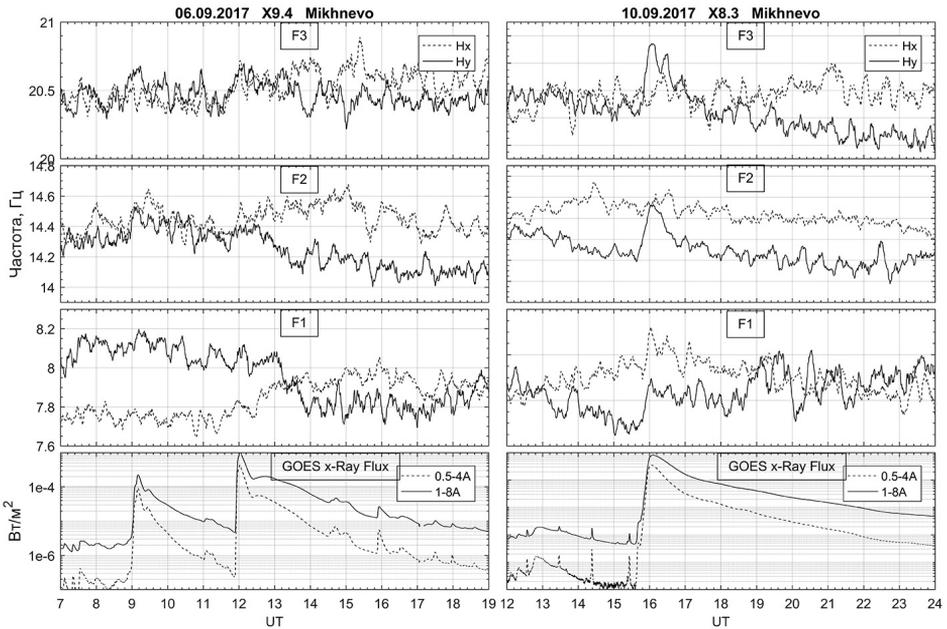
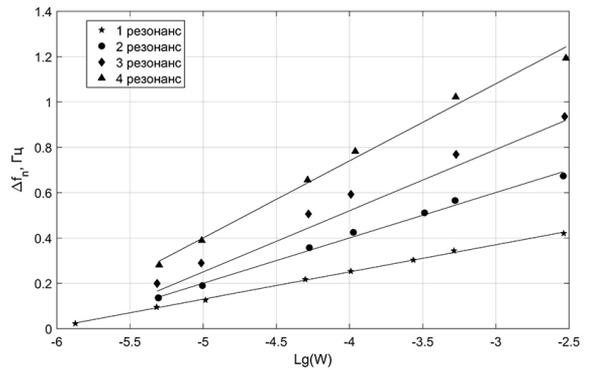


Рис. 1. Потoki рентгеновского излучения и частоты первых трех Шумановских резонансов

Рис. 2. Расчетный сдвиг первых четырех частот Шумановского резонатора в зависимости от интенсивности потока рентгеновского излучения



Таблица

№ частоты	1	2	3	4
А	0.73	1.2	1.6	2.1
Б	0.12	0.2	0.27	0.34

тываемой по измеренным потокам рентгеновского излучения на ИСЗ GOES (что является очень затратным по вычислительным ресурсам процессом), либо адаптации использованных ранее в модели отклика нижней ионосферы типовых временных паттернов солнечных вспышек для учета не только мощности, но и интегральной энергетики. Разработанные для КВ диапазона «шаблоны» рентгеновских вспышек доказали ранее свою эффективность в части расчета интегрального поглощения, но для задач, связанных с тонкой структурой нижней ионосферы зависимость только от мощности вспышки является недостаточной.

## Заключение

Представленные экспериментальные данные и результаты численных расчетов позволяют сформулировать гипотезу о необходимости учета интегральной энергии солнечной рентгеновской вспышки наравне с ее мощностью в оценках воздействия на нижнюю ионосферу. Существующие модели нижней ионосферы оперируют только мощностью (баллом) вспышки. Этот вывод необходимо учесть в работах по прогнозу условий СДВ-ДВ радиосвязи и в обратных задачах определения параметров нижней ионосферы из данных радиомониторинга.

*Исследования проводились в рамках Гос. задания (проект № 0146-2014-0002).*

## Литература

*Гаврилов Б.Г., Д.В. Егоров, В.М. Ермак, И.Э. Маркович, Ю.В. Поклад, В.А. Рыбаков, И.А. Ряховский, Яким В.В.* Среднеширотные эффекты магнитной бури 17 марта 2015 г. // *Динамические процессы в геосферах. Выпуск 7: сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, с. 145–157. 2015.*

*Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Ляхов А.Н., Пензин М.С., Романова Е.Б., Тацилин А.В.* Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн // *Известия высших учебных заведений, Физика. Т. 59. № 12(2). 2016. С. 70–73.*

*Корсунская Ю.А., Стрелков А.С.* Характеристики фотодиссоционных реакций в E и D-слоях ионосферы // *Динамические процессы в геосферах: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : 2013. С. 234–243.*

*Корсунская Ю.А.* Влияние рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения Солнца на ионосферу Земли и другие процессы в геосферах. I. Экспериментальные данные // *Динамические процессы в геосферах Сборник научных трудов ИДГ РАН М. : ГЕОС. 2015. С. 122–132.*

*Корсунская Ю.А., Стрелков А.С.* Влияние рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения Солнца на ионосферу Земли и другие процессы в геосферах. II. Перенос фотонов // *Динамические процессы в геосферах. Вып. 8: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : 2016. С. 149–160.*

*Кудрявцев В.П.* Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в D области ионосферы // *Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2008. С. 203–218.*

*Кудрявцев В.П., Васильев Д.А.* Влияние метеорологических условий в D-области ионосферы на её аэрномические параметры // *Проблемы взаимодействующих геосфер: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2009. С. 322–332.*

*Поклад Ю.В., В.А. Рыбаков, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, А.В. Крашенинников, И.А. Ряховский, Соловьев С.П.* Влияние солнечных рентгеновских вспышек на изменения атмосферного электрического поля и прохождение волн СДВ диапазона. // *Динамические процессы в геосферах. Вып. 7: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2015, с. 161–167.*

*Стрелков А.С.* Вторичное электронообразование в E- и D- слоях ионосферы в процессе ионизации жестким ультрафиолетовым рентгеновским излучением Солнца // *Динамические процессы в геосферах: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2012. С. 130–139.*

Стрелков А.С. Электронно- и ионно- образование электронным ударом на высотах D-, и E-слоев ионосферы // Динамические процессы в геосферах. Вып. 6: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2014. С. 25–34.

Chand, R., M. Israil, and J. Rai. Schumann resonance frequency variations observed in magnetotelluric data recorded from Garhwal Himalayan region India // Ann. Geophys., 27, P. 3497–3507, 2009.

Hayakawa, M., Nickolaenko, A.P., Sekiguchi, M., Yamashita, K., Ida, Y., and Yano, M. Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Moshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1309–1316, 2008.

Madden, T. and Thompson, W. Low frequency electromagnetic oscillations of the Earth-ionosphere cavity, Rev. Geophys., 3, 211–254, 1965. Palit, S., T. Basak, S.K. Mondal, S. Pal, and S.K. Chakrabarti, Modeling of very low frequency (VLF) radio wave signal profile due to solar flares using the GEANT4 Monte Carlo simulation coupled with ionospheric chemistry // Atmos. Chem. Phys., 13, 9159–9168, 2013.

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Lyakhov A.N., Romanova E.B., Tashchilin A.V. The modeling of HF radio wave propagation characteristics during the periods of solar flares // Proc. SPIE. 2015. 96805F. DOI: 10.1117/12.2203591.

Roldugin, V.C., Maltsev, Y.P., Petrova G.A., and Vasiljev, A.N. Decrease of the first Schumann resonance frequency during solar proton events // J. Geophys. Res., 106, 18555–18562, 2001.

Roldugin, V.C., Maltsev, Y.P., Vasiljev, A.N., Shvets, A.V., and Nikolaenko, A.P. Changes of Schumann resonance parameters during the solar proton event of 14 July, 2000 // J. Geophys. Res., 108, 1103, doi:10.1029/2002JA009495, 2003.

Roldugin, V.C., Maltsev, Y.P., Vasiljev, A.N., Schokotov, A.Y., and Belyajev, G.G. Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts // J. Geophys. Res., 109, A01216, doi:10.1029/2003JA010019, 2004.

Rosenberg L. 2004: Data processing methodology of the electric and magnetic components of the Schumann resonances at Modra observatory. Acta Astron. et Geophys. Univ. Comeniana, XXV, P. 1–8.

Schumann, W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist, Z. Naturforsch., 7a, 149–154, 1952.

Shmitter, E.D. Modeling solar flare induced lower ionosphere changes using VLF/LF transmitter amplitude and phase observations at a midlatitude site // Ann. Geophys., 31, 765–773, 2013.

Tran, A. and Polk, C. Schumann resonances and electrical conductivity of the atmosphere and lower ionosphere-I. Effects of conductivity at various altitudes on resonance frequencies and Attenuation // J. Atmos. Terr. Phys., 41, 1241–1248, 1979a.

Tran, A. and Polk, C. Schumann resonances and electrical conductivity of the atmosphere and lower ionosphere-II. Evaluation of the conductivity profiles from experimental Schumann resonance data // J. Atmos. Terr. Phys., 41, 1249–1261, 1979b.