

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.028

ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ ВО ВРЕМЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ВСПЫШКИ X8.2 КЛАССА 10 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, И.А. Ряховский

ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия
E-mails: poklad@mail.ru, boris.gavrilov34@gmail.com, ryakhovskiy88@yandex.ru

Аннотация

Солнечные рентгеновские вспышки приводят к увеличению электронной концентрации в нижней ионосфере, которая является верхней стенкой волновода, в котором возбуждаются Шумановские резонансы (ШР). В работе использовались экспериментальные данные полученные в обсерватории «Михнево» ИДГ РАН. Представлены результаты исследования зависимости вариаций частот первых трех мод ШР от потока рентгеновского излучения в различных спектральных диапазонах. Показано, что изменение частоты ШР линейно зависит от логарифма потока рентгеновского излучения в диапазоне 0.01–0.3 нм.

Введение

Шумановские резонансы (ШР) представляют собой постоянно существующее в земной атмосфере электромагнитное излучение (ЭМИ), спектр которого характеризуется наличием ярко выраженных и достаточно устойчивых частотных максимумов. В 1952 г. W.O. Schuman [*Schumann*, 1952] теоретически предсказал существование резонансных мод на частотах близких к 8, 14, 20 ... Гц, возникающих в результате интерференции низкочастотного ЭМИ в волноводе Земля-ионосфера. Существует множество работ, посвященных этому явлению [*Sentman*, 1995]. Вследствие своей глобальной природы, SR могут надежно регистрироваться в любом регионе на поверхности Земли [*Sentman and Fraser*, 1991; *Price*, 2004] и являются индикатором глобальной грозовой активности на планете [*Heckman et al.*, 1998], так как точные значения частоты пиков спектра ШР связаны с пространственно-временным распределением и интенсивностью гроз [*Nikolaenko et al.*, 1998].

Сигналы SR, возбуждаемые грозowymi разрядами, распространяются в волноводе Земля – ионосфера и несут информацию как об источниках, так и о параметрах распространения электромагнитного излучения Гц диапазона, определяемых свойствами верхней стенки волновода – D областью ионосферы. Это означает, что сильные гелиогеофизические возмущения, такие как, солнечные вспышки, магнитные бури, высыпания высокоэнергетических частиц, приводящие к изменению состояния нижней ионосферы, могут оказывать влияние на параметры ШР [*Schlegel and Fullekrug*, 1999; *Satori et al.*, 2005].

Экспериментальные результаты и обработка данных

Геофизическая обсерватория «Михнево» ИДГ РАН расположена примерно в 100 км к югу от Москвы (54.96N, 37.76E). Обсерватория располагается на значительном удалении от крупных населенных пунктов и промышленных объектов. С конца 2011 года в ней ведется непрерывная регистрация электромагнитных сигналов в КНЧ/ОНЧ диапазоне. В низкочастотном диапазоне в качестве датчиков используются индукционные магнитометры MFS-06 (фирмы Metronix), ориентированные в направлении магнитный Север-Юг и Запад-Восток. Для геофизической обсерватории «Михнево» местное магнитное поле имеет восточное магнитное склонение величиной в 9 градусов. Регистрация ведется на 10 канальный 24-разрядный логгер ADU-07 с частотой оцифровки 256 Гц. Временная привязка осуществляется средствами GPS с точностью 30 нс. Аппаратура размещена в лесу, на расстоянии около 500 м от ближайших источников промышленной сети. Магнитометры MFS-06 имеют крайне низкий собственный уровень шумов.

Низкий уровень промышленных шумов в ГФО «Михнево», высокая чувствительность и широкий динамический диапазон аппаратуры позволяют принимать сверхслабые сигналы. Все исходные данные за период с 2011 по н.в. хранятся в виде волновых форм на сервере ИДГ РАН. Это позволяет использовать различные методы обработки сигналов.

Пример частотного спектра в диапазоне частот от 0 до 50 Гц, полученного при обработке суточной записи сигнала магнитного поля по компонентам H_x и H_y за 10 сентября 2017 г представлена на рисунке 1 (верхняя и средняя панели). На нем хорошо прослеживаются 5–6 первых Шумановских резонансов. После 16 часов в диапазоне 1–15 Гц хорошо видны характерные «восходящие» максимумы, связанные с ионосферным

альвеновским резонатором. Начиная с 18 часов они начинают перекрывать первую моду Шумановского резонатора.

Одними из основных помех при определении параметров Шумановских резонансов являются близкие сферика – сигналы от грозных разрядов. Т.к. спектр сферика является широкополосным и присутствует в том числе и на Шумановских частотах, то он является помехой при определении параметров Шумановских резонансов. Их характерная длительность единицы – десятки миллисекунд. На рис. 1 (нижняя панель) показан амплитудный спектр вариаций магнитного поля в диапазоне до 50 Гц с 9:50 до 10:30 UT. близкие сферика видны в виде ярких вертикальных линий.

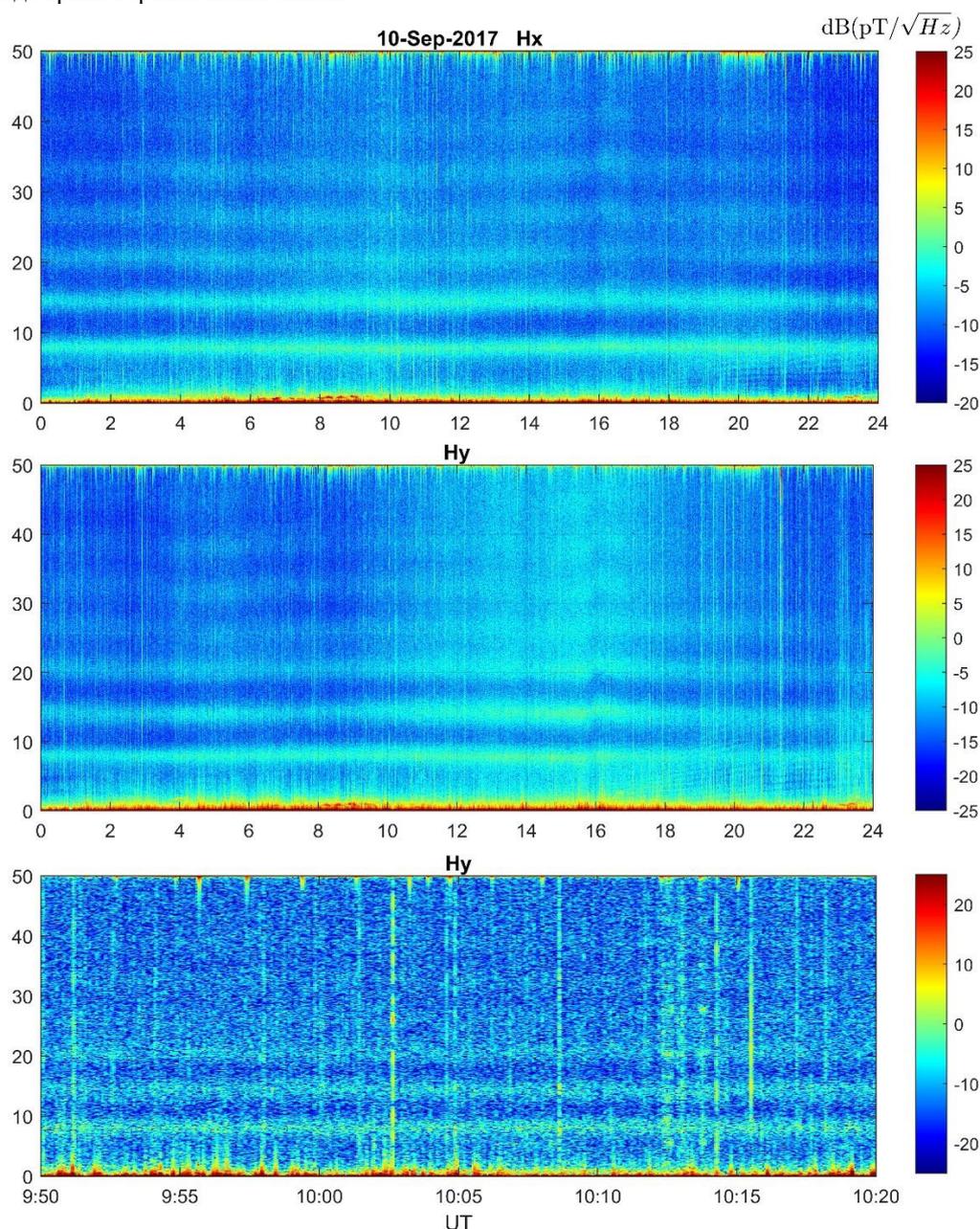


Рисунок 1. Суточная запись вариации ЭМИ в диапазоне частот от 0 до 50 Гц, зарегистрированного в ГФО «Михнево» 10.09.2017 по двум компонентам (верхняя и средняя панели), запись вариации ЭМИ в диапазоне частот от 0 до 50 Гц, зарегистрированного в ГФО «Михнево» 10.09.2017 в период с 09:50 до 10:30 UT (нижняя панель).

Обычно, для восстановления параметров Шумановских резонансов, успешно используется функции Лоренца [Sentman, 1987; Roldugin et al., 2003, Rodriguez-Camacho et al., 2018]. Для минимизации влияния сигналов от грозных разрядов и других помех, нами был разработан новый алгоритм расчета параметров Шумановских резонансов, результаты применения работы которого могут быть показаны на примере обработки записи компоненты H_y магнитного поля за 10.09.2017 г. В нашем алгоритме мы электромагнитный

спектр фитируем полиномом 4-й степени и исключаем из дальнейшего анализа спектры, искаженные помехами.

На рис. 2 красной кривой показан временной ход амплитуды (верхняя панель) и частоты (нижняя панель) 1-го Шумановского резонанса 10.06.2017 г., полученный с помощью нашей методики. Синим цветом показаны приведены значения этих параметров, полученные при 300-секундном усреднении спектральных данных, и аппроксимированные функцией Лоренца [Rodriguez-Camacho et al., 2018]. При этом на графике частоты ШР после 18 часов на синей кривой наблюдается нарастание шума, которое связано с тем, что запись вариации частоты первого и частично второго ШР искажена влиянием «наползают» сигналов на частоте ионосферного Альвеновского резонатора (рис. 1). Использование нашей методики позволило корректно восстановить амплитудно - частотные характеристики первого ШР за это промежуток времени.

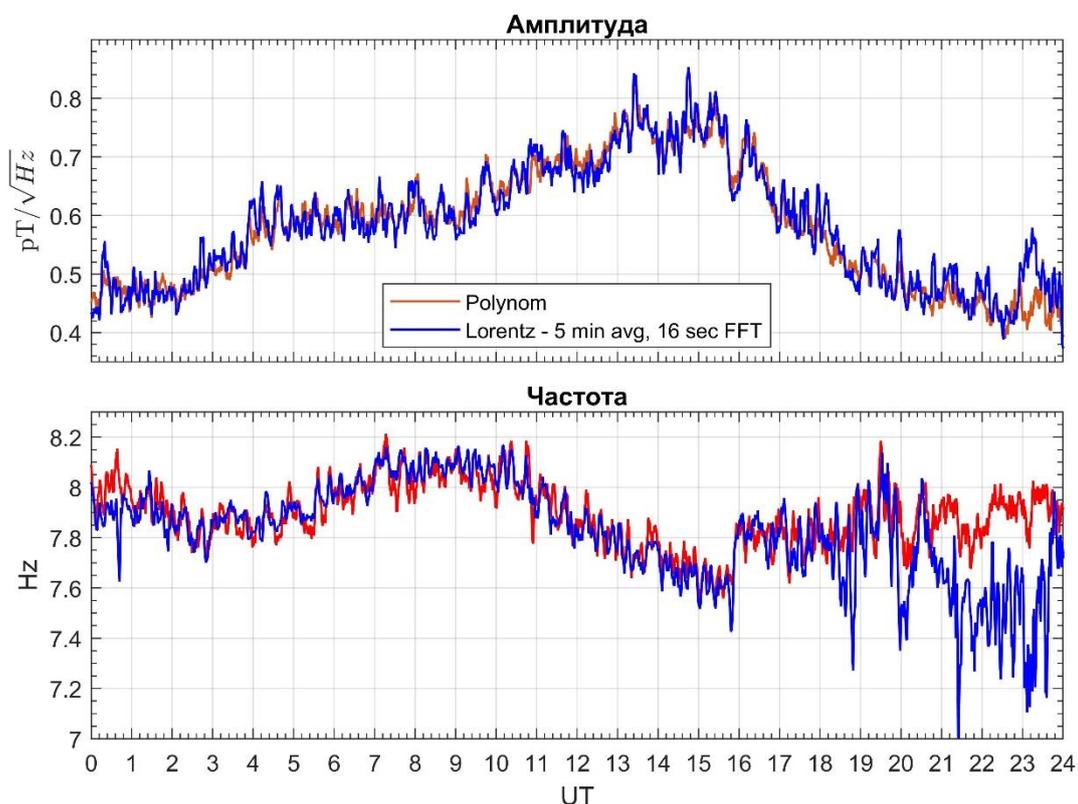


Рисунок 2. Верхняя панель - временной ход амплитуды 1-го ШР за 10.06.2017 г., рассчитанный с использованием функций Лоренца (синяя кривая) и с использованием нашей методики (красная кривая), нижняя панель - временной ход частоты 1-го ШР за 10.06.2017 г., рассчитанный с использованием функций Лоренца (синяя кривая) и с использованием нашей методики (красная кривая).

На рис. 3 показаны зависимости вариаций частоты Шумановских резонансов от логарифма потока излучения в различных спектральных диапазонах. Сплошными линиями показаны зависимости для переднего фронта вспышки. За начало фронта принималась точка, в которой поток излучения составлял 0.01 от максимального в этом же спектральном диапазоне. Длительность переднего фронта вспышки составляла от 10.6 минут в диапазоне 0.01-0.2 нм до 18 минут в диапазоне 0.1-0.8 нм, что превышает временное окно расчета параметров Шумановских резонансов, которое составляло 5 минут. Пунктиром показаны зависимости для заднего фронта вспышки. Для диапазона 0.01-0.2 нм за окончание фронта принималась точка, в которой поток излучения падал до 0.01 от максимального, т.е. 17:10 UT. Для остальных диапазонов окончанием вспышки считался момент времени 18:00 UT.

Из рис. 3 видно, на переднем фронте вспышки вариации частоты Шумановских резонаторов линейно зависят от потока излучения. Для диапазонов 0.01-0.2 нм и 0.01-0.3 нм коэффициенты регрессии на заднем фронте вспышки близки к тем, что получаются на переднем. Это позволяет сделать вывод, что для расчета воздействия солнечных вспышек на параметры Шумановского резонатора определяющим является поток рентгеновского излучения в диапазоне до 0.2-0.3 нм.

Предложенный в настоящей работе подход к исследованию реакции сигналов ШР на геофизические возмущения, включающий эффективный метод фильтрации помех, связанных с грозowymi атмосфериками и

другими шумовыми источниками, позволил исследовать реакцию шумановского резонатора на широкий спектр ионосферных возмущений. Дальнейшее развитие и применение этой методики позволит исследовать реакцию Шумановского резонатора и на другие быстропротекающие гелиогеофизические возмущения.

Работа выполнена по госконтракту 122032900175-6.

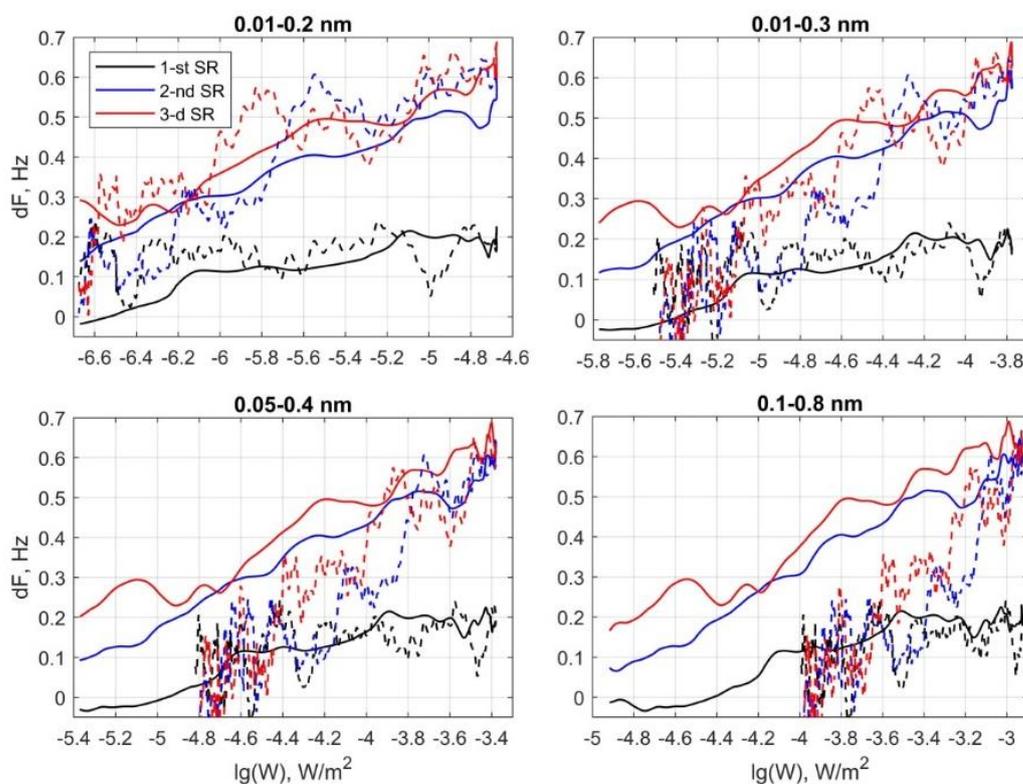


Рисунок 3. Зависимости вариаций частот первых трех Шумановских резонансов от логарифма потока излучения в различных спектральных диапазонах.

Литература

- Heckman, S.J., Williams, E., & Boldi, B. (1998). Total global lightning inferred from schumann resonance measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103 (D24), 31775-31779. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/98JD02648>, <https://doi.org/10.1029/98JD02648>
- Nickolaenko, A.P., Sa'tori, G., Zieger, B., Rabinowicz, L.M., & Kudintseva, I.G. (1998). Parameters of global thunderstorm activity deduced from the long-term schumann resonance records. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60, 387-399.
- Price, C., & Melnikov, A. (2004). Diurnal, seasonal and inter-annual variations in the schumann resonance parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66 (13-14), 1179-1185. doi:10.1016/j.jastp.2004.05.004
- Rodr'iguez-Camacho, J., Fornieles, J., Carri'o'n, M.C., Port'ı, J.A., Toledo-Redondo, S., & Salinas, A. (2018, December). On the Need of a Unified Methodology for Processing Schumann Resonance Measurements. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 123 (23), 13,277-13,290. doi:10.1029/2018JD029462
- Satori, G., Williams, E., & Mushtak, V. (2005, 04). Response of the Earth-ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 553-562. doi:10.1016/j.jastp.2004.12.006
- Schumann, W.O. (1952, February). U"ber die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosph"arenh"ulle umgeben ist. *Zeitschrift Naturforschung Teil A*, 7 (2), 149-154. doi:299 10.1515/zna-1952-0202
- Schlegel, K., & Fullekrug, M. (1999). Schumann resonance parameter changes during high-energy particle precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 10,111-10,118.
- Sentman, D.D. (1995). Schumann resonance spectra in a two-scale-height Earth ionosphere cavity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101 (D5), 9479-9487. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95JD03301>
- Sentman, D.D., & Fraser, B.J. (1991). Simultaneous observations of Schumann resonances in California and Australia: Evidence for intensity modulation by the local height of the D region. *Journal of Geophysical Research*, 96, 15,973-15,984.