Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 245–247.

УДК 550.3
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-245
ORCID: 0009-0007-1418-8111

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЧАСТОТ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

К.А. Зенин[1], Ю.В. Поклад[1]

[1]Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия, zenin.ka@idg.ras.ru

DETERMINING THE IONOSPHERIC RESPONSE TO SOLAR FLARES FROM SCHUMANN RESONANCE FREQUENCIES VARIATIONS

K.A. Zenin[1], Yu.V. Poklad[1]

[1]Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, zenin.ka@idg.ras.ru

Аннотация. Шумановские резонансы возникают вследствие интерференции электромагнитных волн в диапазоне крайне низких частот (КНЧ) и являются одним из надежных индикаторов состояния ионосферы. Изменения параметров этих резонансов позволяют определять реакцию ионосферы на внезапные ионосферные возмущения (SID), вызванные, например, солнечными вспышками. В работе представлены результаты количественного анализа воздействия на ионосферу нескольких сотен солнечных вспышек M- и X-классов, произошедших за последние 15 лет, а также предпринята попытка оценить параметры ионосферы по этим данным.

Ключевые слова: ионосфера, КНЧ, шумановские резонансы, солнечные вспышки, рентгеновское излучение.

Abstract. Schumann resonances arise from the interference of extremely low-frequency (ELF) range electromagnetic waves and are one of the reliable indicators of the state of the ionosphere. Changes in the parameters of these resonances make it possible to determine the ionospheric response to sudden ionospheric disturbances (SIDs), e.g., solar flares. This paper presents the results of a quantitative analysis of the impact of several hundred M- and X-class solar flares over the past 15 years on the ionosphere, as well as an attempt to estimate ionospheric parameters from these data.

Keywords: ionosphere, ELF, Schumann resonances, solar flares, X-ray radiation.

ВВЕДЕНИЕ

Шумановские резонансы (ШР) — электромагнитные колебания в полости Земля — ионосфера с частотами, близкими к 8, 14, 20, … Гц [Nickolaenko, Hayakawa, 2002]. Существование таких колебаний предсказал Шуман в 1952 г [Schumann, 1952a; Schumann, 1952b]. Эти колебания возбуждаются грозовыми разрядами, происходящими на планете каждую секунду [Clayton, Polk, 1976; Heckman et al., 1998; Ogawa et al., 1969; Prácser et al., 2019] и могут быть достоверно обнаружены в любой точке земной поверхности [Sentman, Fraser, 1991]. Частоты шумановских резонансов определяются параметрами нижней ионосферы Земли, в частности, высотой ее границы над поверхностью. При изменении параметров ионосферы изменяются и частоты резонансов.

Солнечные вспышки представляют собой взрывы в атмосфере Солнца, вызванные перестройкой магнитных полей. Они сопровождаются интенсивным излучением в рентгеновском диапазоне, которое на 3–4 порядка превышает уровень излучения в обычных условиях. Этот скачок в интенсивности изменяет параметры ионосферы [Mitra, 1974; Sátori et al., 2005; Schlegel, Füllekrug, 1999]. В частности, была показана зависимость роста резонансной частоты от интенсивности излучения в диапазоне 0.01–0.2 нм [Poklad et al., 2022].

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДОЛОГИЯ

Данные электромагнитных колебаний получены в Геофизической обсерватории Института динамики геосфер РАН в Михнево в 100 км южнее Москвы (54.96° N, 37.76° E), где установлены два магнитометра, измеряющие компоненты магнитного поля Земли с высоким временным разрешением [Ryakhovskii и др., 2021]. Один магнитометр ориентирован в направлении запад—восток (ЗВ), другой — север—юг (СЮ). Параметры резонансов (частота, амплитуда, добротность) рассчитывались по записям магнитного поля с помощью классической аппроксимации лоренцианами [Goncharov, Lyakhov, Losseva, 2022; Poklad и др., 2022; Price, Melnikov, 2004; Roldugin и др., 2003], причем получается два набора параметров из-за различий в направлении магнитометров. Набор, связанный с направлением СЮ, условимся называть компонентой *X*, а с направлением ЗВ — компонентой *Y*. Однако для последующего анализа использовались не абсолютные значения параметров, а их вариации. Они рассчитывались как отклонения от среднего тренда, который, в свою очередь, аппроксимировался параболой на промежутках 2 ч до и 2 ч после солнечной вспышки [Poklad и др., 2022], исключая из расчета промежутки других вспышек.

Данные об интенсивности рентгеновского излучения солнечных вспышек получены из архивов спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) — американских геостационарных метеорологических спутников [https://www.ncei.noaa.gov/data/]. Эти спутники осуществляют непрерывный мониторинг солнечной активности и рентгеновского излучения

с помощью бортовых приборов XRS (X-Ray Sensor). Диапазоны измерений рентгеновского излучения — 0.05–0.4 нм (A-канал) и 0.1–0.8 нм (B-канал).

Для анализа был выбран диапазон 0.01–0.2 нм, так как именно в нем излучение достигает D-слоя и ионизирует его [Ratcliffe, 1972]. Для расчета интенсивности в этом диапазоне сначала рассчитывалась эффективная яркостная температура в приближении экспоненциальной функции спектральной плотности [Mitra, 1974], а затем через нее находилась искомая интенсивность с помощью той же экспоненциальной функции.

Для каждой вспышки для первых трех мод вычислялись максимальная вариация частот ШР во время вспышки, время отклика (время между максимумом интенсивности и максимумом вариации), крутизна роста вариации во время вспышки и ее ошибка R^2 и соотношение сигнал/шум для максимальной вариации. При этом анализировались только те моды события, у которых соотношение сигнал/шум > 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА

В работе проанализирован ряд вспышек M- и X-классов (мощные и сверхмощные вспышки) за 2010–2023 гг.. Общее количество проанализированных вспышек превышает несколько сотен. Соотношение между интенсивностью и энергией вспышек в диапазоне 0.01–0.2 нм показано на рис. 1. Видно, что, несмотря на различие вспышек по соотношению энергии и интенсивности, они сосредоточены в определенной полосе, причем нижний край полосы — короткие и мощные вспышки, а верхний — длительные вспышки с большой энергией.

С учетом этого для анализа похожих вспышек был создан фильтр, который мог произвольно отбирать либо короткие (соотношение энергии и интенсивности меньше $2.5 \cdot 10^5$; ниже красной прямой), либо долгие вспышки (соотношение энергии и интенсивности больше $7.5 \cdot 10^5$; выше зеленой прямой). Применялся также дополнительный фильтр по отношению сигнал/шум, который оставлял только события с сигнал/шум > 3. Далее для отобранных событий исследовались зависимости максимальной вариации и времени отклика от интенсивности (в случае коротких вспышек) и от энергии (в случае долгих вспышек) в диапазоне 0.01–0.2 нм. Для крутизны роста вариации вместо указанных выше двух фильтров использовался фильтр по ошибке R^2: отбирались вспышки с $R^2 > 0.9$.

Описанные выше процедуры применялись к разным компонентам и разным модам и дали примерно согласующиеся наблюдения, которые показаны на рис. 2 для 1-й моды *Y*-компоненты. Для двух правых панелей мы определили визуальное отсутствие тренда. Тренды для различных мод и компонент оказались общими, они даны в табл. 1.

Можно заключить, что время отклика и крутизна роста вариации не имеют прямой зависимости ни от интенсивности, ни от энергии и в среднем скорость роста вариаций при любой вспышке одинакова, как и время, за которое достигаются наибольшие вариации. Из этого можно сделать предположение, что во время солнечных вспышек ионосфера дополнительно ионизируется с постоянной скоростью.

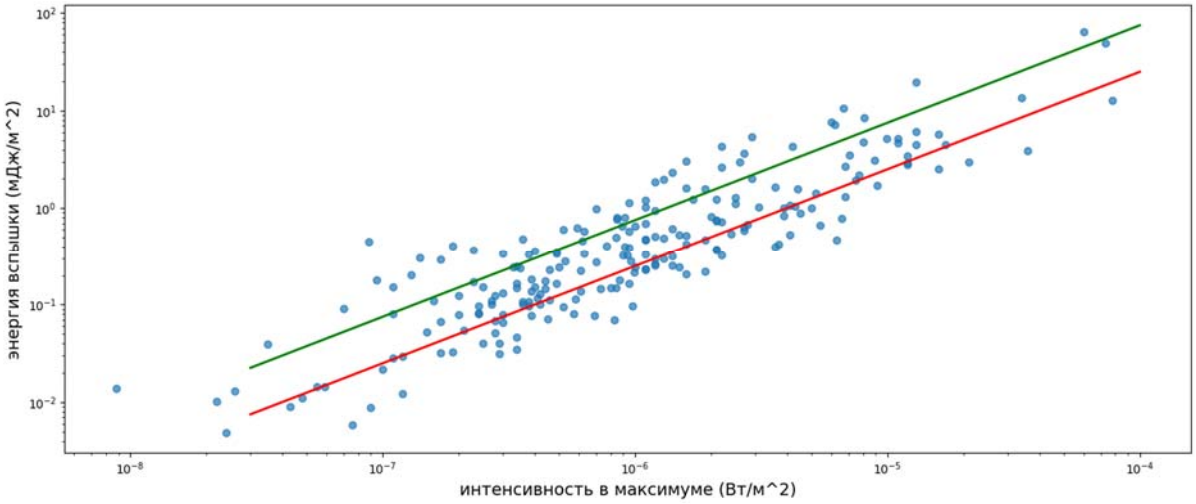

Рис. 1. Соотношение интенсивности и энергии вспышек

Таблица 1. Корреляция параметров с интенсивностью и энергией

Параметр	Интенсивность	Энергия
Максимальная вариация	Слабая	Слабая
Время отклика	Отсутствует	Отсутствует
Крутизна роста вариации	Отсутствует	Отсутствует

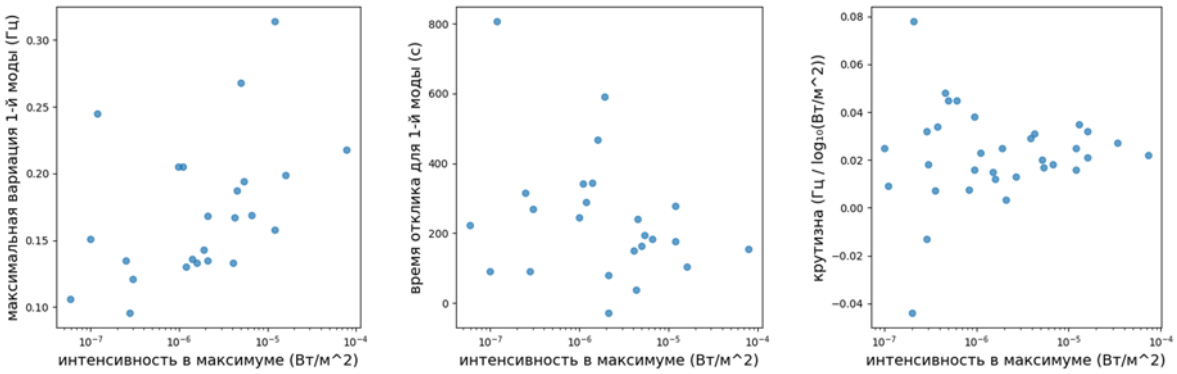

Рис. 2. Зависимости максимальной вариации, времени отклика и крутизны от интенсивности для 1-й моды *Y*-компоненты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обычно исследования реакции ионосферы на внезапные ионосферные возмущения представляют собой детальный анализ одного или нескольких событий. В данной работе был сделан акцент на количественный анализ большого числа событий: нескольких сотен солнечных вспышек M- и X-классов. Для большинства вспышек были определены различные параметры, связанные с шумановскими резонансами и проанализированы их зависимости друг от друга.

Максимальное значение вариации частоты ШР для всех мод показало зависимость от класса вспышки: чем выше класс, тем в среднем больше вариация, однако корреляция слабая. Для времени отклика и крутизны роста вариации корреляции выявлено не было, что позволяет предположить, что скорость дополнительной ионизации ионосферы во время вспышек постоянна.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ 122032900175-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Clayton M.D., Polk Ch. Diurnal variation and absolute intensity of world-wide lightning activity, September 1970 to May 1971 // Electrical Processes in Atmospheres / под ред. H. Dolezalek, R. Reiter, H. E. Landsberg. Heidelberg: Steinkopff, 1976. C. 440–449.

Goncharov E.S., Lyakhov A.N., Losseva T.V. Long-term Schumann resonance dynamics based on horizontal magnetic field data at Mikhnevo Observatory during 2016–2020 // Radio Sci. 2022. V. 57. N 5. P. e2021RS007366.

Heckman S.J., Williams E., Boldi B. Total global lightning inferred from Schumann resonance measurements // J. Geophys. Res. Atmospheres. 1998. V. 103. N D24. P. 31775–31779.

Mitra A. P. Ionospheric Effects of Solar Flares. Dordrecht: Springer Netherlands, 1974.

Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Resonances in the Earth — Ionosphere Cavity. Springer Science & Business Media, 2002. 400 p.

Ogawa T., Tanaka Y., Yasuhara M. Schumann Resonances and worldwide thunderstorm activity // J. Geomagnetism and Geoelectricity. 1969. V. 21. N 1. P. 447–452.

Poklad Y.V. et al. Investigation of the reaction of Schumann resonances to short transient geophysical events under the influence of atmospheric electromagnetic noise // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2022. V. 127. N 16. P. e2022JD036820.

Prácser E. et al. Reconstruction of Global Lightning Activity Based on Schumann Resonance Measurements: Model Description and Synthetic Tests // 2019.

Price C., Melnikov A. Diurnal, seasonal and inter-annual variations in the Schumann resonance parameters // J. Atmospheric Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66. N 13–14. P. 1179–1185.

Ratcliffe J.A. An Introduction to Ionosphere and Magnetosphere. CUP Archive, 1972. 280 p.

Roldugin V.C. et al. Changes of Schumann resonance parameters during the solar proton event of 14 July 2000 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2003. V. 108. N A3. P. 2002JA009495.

Ryakhovskii I.A. et al. The state and dynamics of the ionosphere from synchronous records of ULF/VLF and HF/VHF radio signals at Geophysical Observatory “Mikhnevo” // Izv. Phys. Solid Earth. 2021. V. 57. N 5. P. 718–730.

Sátori G., Williams E., Mushtak V. Response of the Earth—ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation // J. Atmospheric Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. N 6. P. 553–562.

Schlegel K., Füllekrug M. Schumann resonance parameter changes during high-energy particle precipitation // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1999. V. 104. N A5. P. 10111–10118.

Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist // Z. Für Naturforschung A. 1952a. V. 7. N 2. P. 149–154.

Schumann W.O. Über die Dämpfung der elektromagnetischen Eigenschwingungen des Systems Erde — Luft — Ionosphäre // Z. Für Naturforschung A. 1952b. V. 7. N 3–4. P. 250–252.

Sentman D.D., Fraser B.J. Simultaneous observations of Schumann resonances in California and Australia: Evidence for intensity modulation by the local height of the D region // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1991. V. 96. N A9. P. 15973–15984.

URL: https://www.ncei.noaa.gov/data/ (дата обращения 28.05.2026).