

УДК 551.510.535

ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРОТОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ НА АМПЛИТУДУ ОНЧ СИГНАЛОВ

© 2023 г. Б. Г. Гаврилов^{1, *}, И. А. Ряховский¹, Ю. В. Поклад¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: boris.gavrilov34@gmail.com

Анализ и сравнение эффектов и механизмов воздействия на D, E области ионосферы рентгеновского излучения Солнца и высыпаний заряженных частиц – цель данной работы. В статье исследуются среднеширотные эффекты, которые не получили достаточного освещения в научной литературе. Анализируется изменение параметров радиосигналов, принимаемых в геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» от европейских ОНЧ передатчиков, для ряда событий в сентябре 2017 года, когда наблюдались рентгеновская вспышка класса X8.2 и последующее протонное высыпание. Оба явления приводят к росту концентрации электронов в нижней ионосфере, но различаются по воздействию на параметры радиосигналов. Воздействие рентгеновского излучения, приводящее к росту амплитуды радиосигналов, наблюдается только в дневное время; воздействие протонных высыпаний проявляется в виде ночного снижения амплитуды.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, протонные высыпания, ОНЧ, нижняя ионосфера.

Для цитирования: Гаврилов Б.Г., Ряховский И.А., Поклад Ю.В. Воздействие солнечного рентгеновского излучения и протонных высыпаний на амплитуду ОНЧ сигналов // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 2. С. 81–88. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_81

Введение

Известно, что на состояние и динамику нижней ионосферы оказывают влияние многие геофизические факторы, среди которых наиболее существенными являются: рентгеновское излучение Солнца, магнитные и ионосферные бури, атмосферные возмущения, вызванные падением метеоритов, извержения вулканов, мощные землетрясения [Kumar, Kumar, 2018; Adushkin et al., 2007; Gavrilov et al., 2017; Porova et al., 2013; Gavrilov et al., 2019; Спивак, Рябова, 2019]. Высыпания заряженных частиц, которые приводят к дополнительной ионизации E-слоя ионосферы, понижению высоты отражения ОНЧ радиосигналов, изменению их фазы и снижению амплитуды, особенно в ночное время, [Lynn, 2013; Kumar, Kumar, 2014; Foster et al., 2016] – являются еще одним важным агентом возмущений нижней ионосферы. Эффект возмущения высокоширотной нижней ионосферы при солнечных протонных событиях исследован достаточно подробно [Westerlund et al., 1969; Cotton, Smith, 1991]. В тоже время, данных по пространственно-временному распределению потоков выпадающих электронов и протонов на средних широтах недостаточно.

Наиболее эффективным методом изучения возмущений нижней ионосферы является анализ амплитуды и фазы очень низкочастотных (ОНЧ, 3–30 кГц) сигналов сверх длинноволновых (СДВ) радиопередатчиков [Wait, Spies, 1964], так как электромагнитное излучение этого диапазона частот распространяется в волноводе Земля – ионосфера и гелиогеофизические возмущения, оказывающие влияние на состояние нижней ионосферы, приводят к изменению параметров ОНЧ сигнала. В настоящей работе была сделана попытка на основании экспериментальных данных по приему сигналов СДВ радиостанций в геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (МИК) [Ryakhovskii, 2021] выявить характерные типы воздействия солнечных вспышек и протонных высыпаний на параметры ОНЧ сигналов. Наиболее благоприятными условиями для такого исследования является ситуация, когда вспышка рентгеновского излучения наблюдается в дневное время (значительная часть трассы

сигнала освещена Солнцем), а эффекты высыпаний высокоэнергетичных частиц наиболее заметны ночью поскольку их легко отличить от эффектов воздействия жесткого излучения Солнца. Эффект был рассмотрен на трассах разной ориентации и расположения для солнечных протонных событий и солнечных вспышек, произошедших в период с 10 по 13 сентября 2017 г.

Наблюдения

В геофизической обсерватории «Михнево» (54.96° С.Ш., 37.76° В.Д.) ведутся систематические исследования связи параметров радиосигналов с геофизическими возмущениями путем мониторинга сигналов ОНЧ радиостанций. Расположение обсерватории МІК и передатчиков, сигналы которых использованы в работе, показаны на рис. 1.

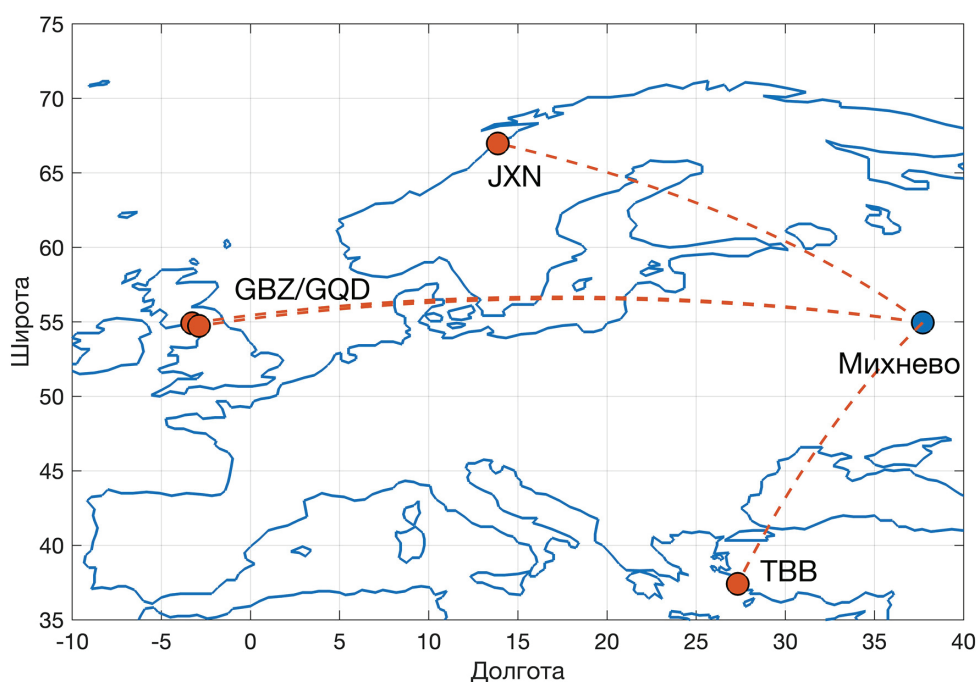


Рис. 1. Схема расположения ОНЧ передатчиков JXN, GBZ, GQD, TBB и геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН

В работе использовались амплитуды радиосигналов, принимаемых от ОНЧ передатчиков JXN, GBZ, GQD и TBB (табл. 1).

Таблица 1.

Основные характеристики ОНЧ передатчиков

Станции	Частоты	Местоположение	Широта	Долгота
JXN	16 400	Novik, Norway	66.98° С.Ш.	13.87° В.Д.
GBZ	19580	Anthorn, UK	54.91° С.Ш.	-3.28° В.Д.
GQD	22100	Skelton, UK	54.73° С.Ш.	-2.88° В.Д.
TBB	26700	Bafa, Turkey	37.41° С.Ш.	27.32° В.Д.

Данные по потокам протонов и рентгеновского излучения (данные спутника GOES) взяты из [Logachev et al., 2022], <https://www.ncei.noaa.gov/data/goes-space-environment-monitor/access/avg/2017/09/goes15/netcdf/> и [<https://www.ncei.noaa.gov/data/goes-space-environment-monitor/access/full/2017/09/goes15/>]. Анализ влияния протонных высыпаний на параметры радиосигналов проводился путем сравнения данных в спокойных и возмущенных условиях.

Результаты

Высыпание заряженных частиц может приводить к изменению высотного профиля электронной концентрации в нижней ионосфере. 10 сентября 2017 г., начиная с 16:10 UT на спутнике GOES, были зарегистрированы протонные высыпания в высокоэнергичных каналах 165 и 433 МэВ (рис. 2а). Максимальное возмущение было зарегистрировано в 22:25 UT. Повышенное значение

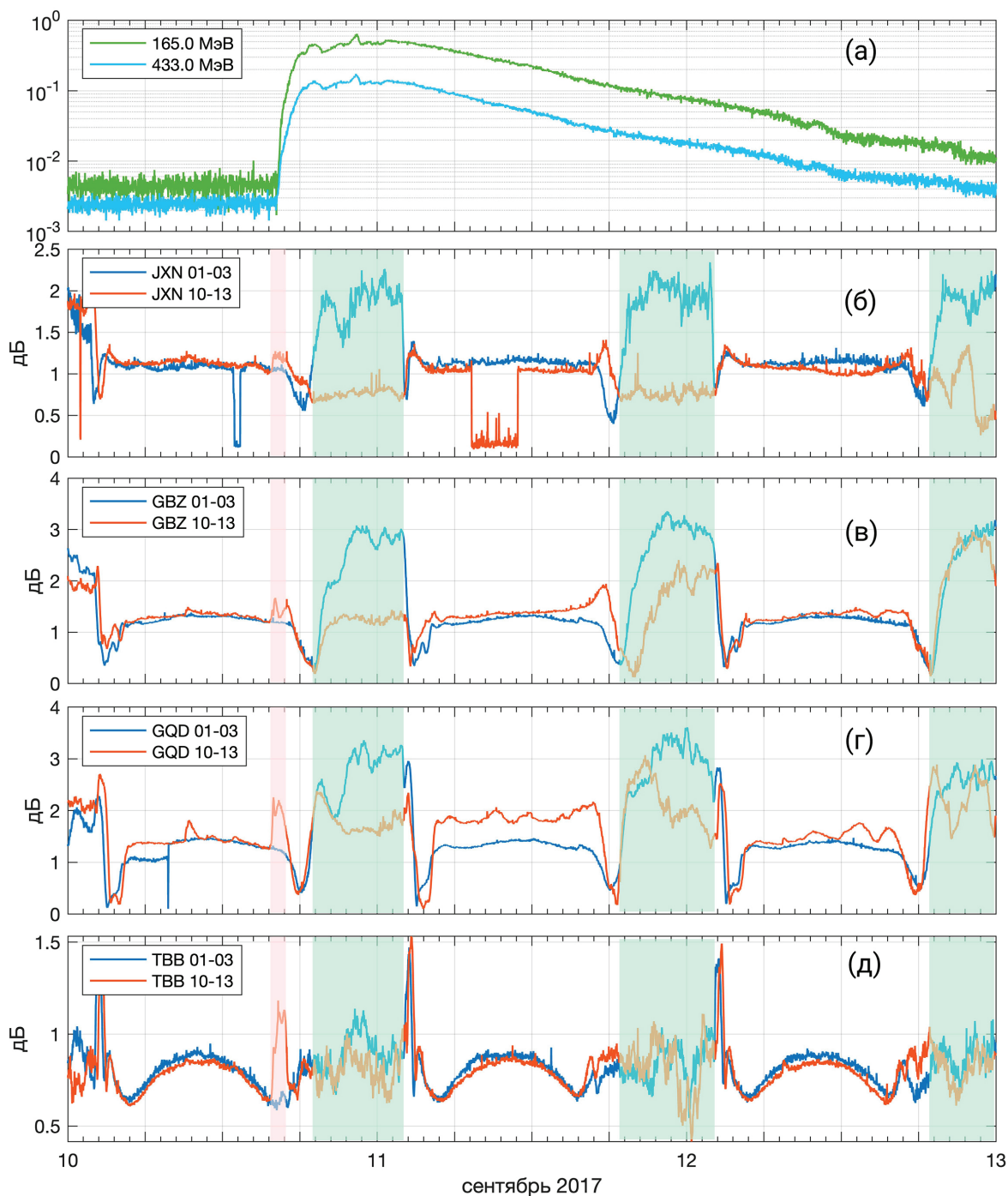


Рис. 2. Вариации амплитуды сигналов, зарегистрированных в МИК от передатчиков JXN, GBZ, GQD и TBB во время протонных высыпаний. Поток протонов, зарегистрированный на спутнике GOES в каналах 165 и 433 МэВ (рис. 2а). Амплитуда сигналов от передатчиков JXN (рис. 2б), GBZ (рис. 2в), GQD (рис. 2г) и TBB (рис. 2д) в возмущенные дни в период с 00 UT 10 сентября до 00 UT 13 сентября (красные кривые) и в невозмущенный период с 00 UT 01.09.2017 по 00 UT 04.09.2017 (синие кривые)

потока протонов наблюдалось до 13 сентября 2017 г. На рис. 2б–д красными кривыми представлены результаты измерений амплитуд сигналов, зарегистрированных в МІК от передатчиков JXN (рис. 2б), GBZ (рис. 2в), GQD (рис. 2г) и TBB (рис. 2д) в возмущенные дни в период с 00 UT 10 сентября до 00 UT 13 сентября 2017 г.; синими кривыми представлены амплитудные вариации для этих станций в невозмущенный период (с 00 UT 01.09.2017 г. по 00 UT 04.09.2017 г.).

Из рис. 2 видно, что во время протонных высыпаний в ночные часы (выделены зелеными прямоугольниками) на сигналах от станций JXN, GBZ и GQD наблюдалось уменьшение амплитуды сигналов до ~ 2 дБ. Эффект уменьшения амплитуды в ночные часы на этих трассах может быть вызван появлением дополнительного источника ионизации ионосферы, что приводит к росту поглощения радиосигнала. Отсутствие этого эффекта на трассе TBB – МІК может быть связано с тем, что поток протонов на этой трассе, расположенной существенно южнее трасс JXN, GBZ и GQD (рис. 1), был существенно меньше.

В дневные часы существенного отличия в поведении амплитуд во время протонных высыпаний относительно спокойных дней на всех трассах выявлено не было, что может быть обусловлено незначительностью влияния протонных высыпаний на ионизацию нижней ионосферы в сравнении с прямым солнечным излучением.

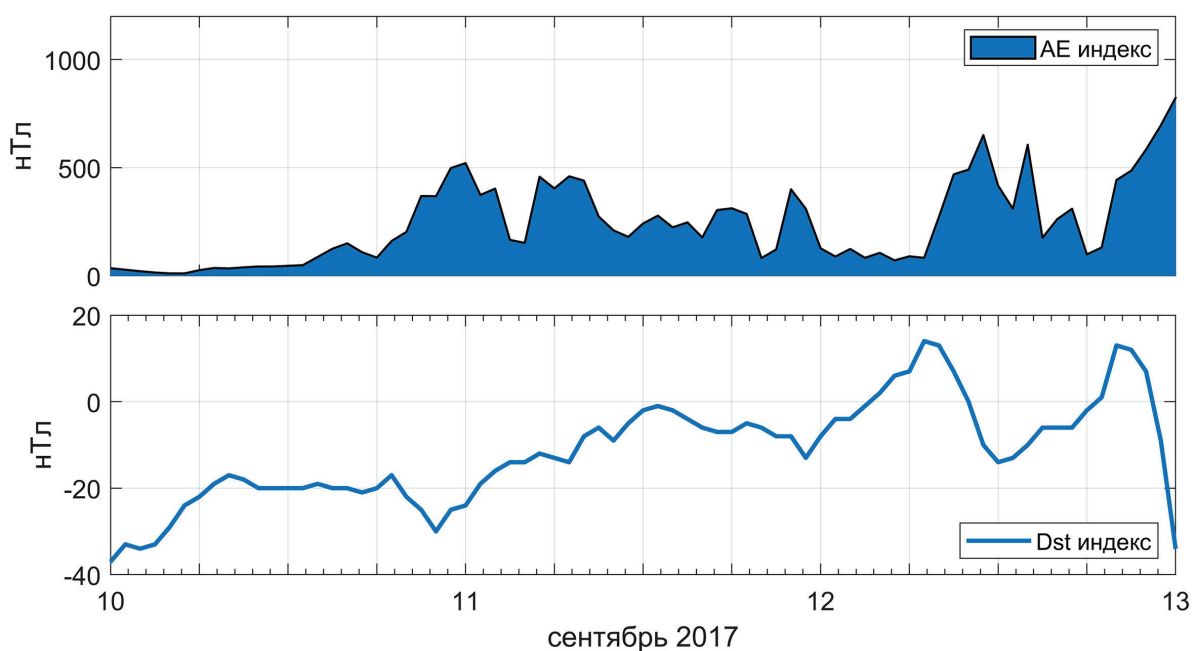


Рис. 3. Вариации индексов авроральной и геомагнитной активности AE (верхняя панель) и Dst (нижняя панель) за период 10–13.09.2017 г.

[Lynn, 2013] исследовал связь возмущений амплитуды ОНЧ радиосигналов с магнитными бурями, в том числе в ситуациях, когда трассы ОНЧ сигналов заведомо находились на широтах, где высыпания не наблюдались. Изменения в концентрации электронов как в верхней, так и в нижней ионосфере связываются в этом случае с воздействием экваториального ветра, вызванного авроральным джоулевым нагревом и изменениями в химическом составе нейтральной атмосферы. Для исключения возможности проявления этих эффектов, связанных с магнитными бурями, на рис. 3 показаны графики вариаций индексов AE и Dst за период 10–13.09.2017 г., когда наблюдались наиболее сильные возмущения амплитуды сигналов. На рис. 3 видно, что рассматриваемый период можно отнести к магнитоспокойным дням, и выявленные в этот период возмущения амплитуды ОНЧ сигналов не могли быть вызваны эффектами, связанными с изменением глобальной геомагнитной активности. 10 сентября

2017 г. в 15:35 UT до начала протонных высыпаний спутником GOES была зарегистрирована солнечная рентгеновская вспышка класса X8.2 по двум каналам 0.05–0.4 и 0.1–0.8 нм (верхняя панель, рис. 4). Максимум излучения зарегистрирован в 16:06 UT. На рис. 26-д время вспышки отмечено розовым прямоугольником. Можно видеть, что на всех трассах вспышка вызвала рост амплитуды сигнала.

На рис. 4 показан более подробно график изменения потока рентгеновского излучения, зарегистрированного на спутнике GOES, вместе с графиками относительных изменений амплитуды сигналов на рассматриваемых трассах. Вспышка вызвала рост амплитуды ОНЧ сигналов на всех трассах в диапазоне от 0.2 до 1 дБ. Рост амплитуды сигнала вызван резким изменением профиля электронной ионизации на верхней стенке волновода.

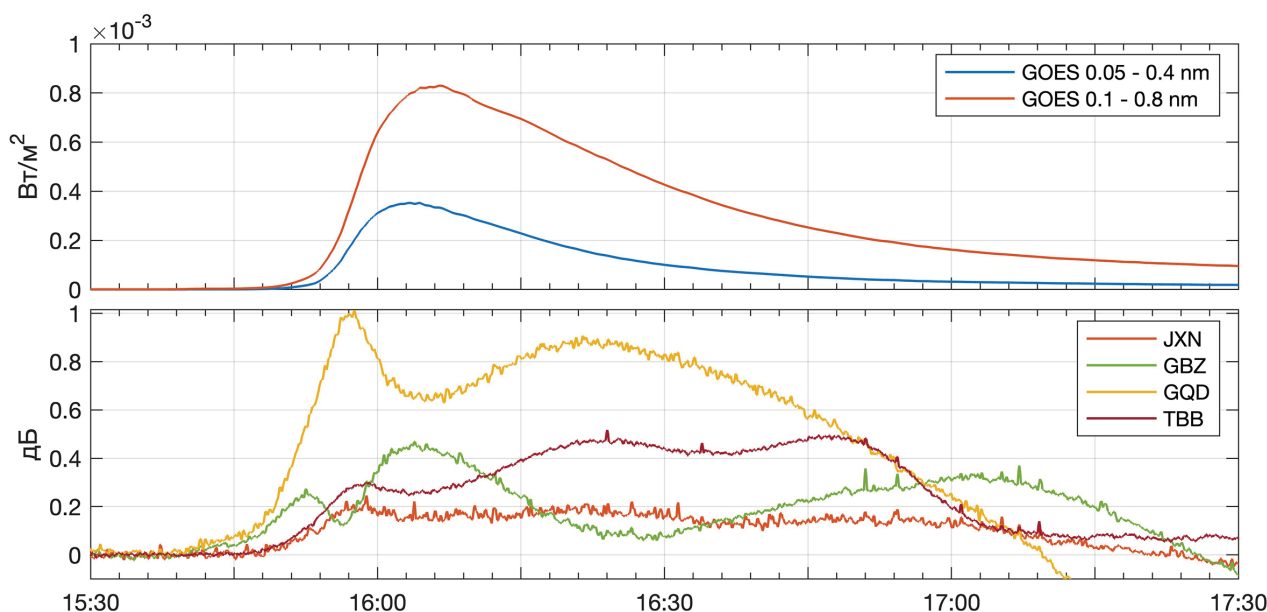


Рис. 4. Поток рентгеновского излучения по данным спутника GOES 10 сентября 2017 г. (верхняя панель), относительное изменение амплитуды сигналов на трассах JXN, GBZ, GQD и TBB (нижняя панель)

Обсуждение и выводы

Данные по измерению амплитуд сигналов ОНЧ передатчиков в геофизической обсерватории «Михнево» были использованы для сравнения воздействия рентгеновского излучения и высыпания протонов в среднеширотной зоне. Для анализа были выбраны события, произошедшие в период времени, когда последовательно наблюдались два мощных геофизических явления: вспышка класса X8.2, при которой максимум потока рентгена наблюдался днем, в 16 UT, и последующее протонное высыпание, продолжавшееся с 10 по 13 сентября 2017 г.

В ночные часы в период с 10 по 13 сентября 2017 г. на трех (JXN, GQD и GBZ – МІК) из четырех выбранных для анализа трассах ОНЧ сигналов с разной пространственной ориентацией и положением наблюдалось значимое снижение амплитуды. На более южной трассе TBB – МІК существенных изменений в поведении амплитуды в ночные часы выявлено не было. Данный факт свидетельствует об относительно локальном воздействии (полярные и частично средние широты) протонных высыпаний. Отсутствие существенного отличия в поведении амплитуд во время протонных высыпаний относительно спокойных дней на всех трассах в дневное время может быть обусловлено незначительным влиянием протонных высыпаний на ионизацию нижней ионосферы в сравнении с прямым солнечным излучением.

Интенсивный поток рентгеновского излучения во время солнечной вспышки X8.2 (10.09.2017 г.) вызвал синхронный рост амплитуды на всех рассматриваемых трассах, находившихся в момент вспышки в освещенной зоне.

Наблюдение в рамках одного события на одних среднеширотных трассах в течение ограниченного времени как эффекта изменения амплитуды сигнала, связанного с ростом электронной концентрации в D-слое ионосферы, вызванного потоком рентгеновского излучения в дневное время, так и снижение амплитуды ОНЧ сигналов в ночное время, вызванное повышением электронной концентрации и ростом поглощения радиосигнала в E-слое ионосферы, представляется важным для интерпретации возмущений волнового поля Земли – нижней ионосферы, в котором распространяются ОНЧ радиоволны, и совершенствования прогностических моделей ионосферных процессов.

Финансирование работы

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

Благодарности

Результаты получены с использованием оборудования УНУ «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/310424/>).

Список литературы

- Спивак А.А., Рябова С.А. Вариации электрических характеристик приземной атмосферы в периоды магнитных бурь // Динамические процессы в геосферах сб. научн тр. ИДГ РАН. Вып. 11. М. : Графитекс, 2019. С. 142–150. <https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.38627>
- Adushkin V.V., Gavrilov B.G., Gorelyi K.I., Rybnov Y.S., Kharlamov V.A. Geophysical effects of the March 29, 2006, solar eclipse // Doklady Earth Sciences. 2007. No 417(2). С. 1393–1397. DOI: 10.1134/S1028334X07090218.
- Cotton P.D., Smith A.J. Signature of Burst Particle Precipitation on VLF Signals Propagating in the Antarctic Earth-Ionosphere Waveguide // Journal of Geophysical Research. Vol. 96. No A11. P. 19.375–19.387.
- Foster J.C., Erickson P.J., Baker D.N., Jaynes A.N., Mishin E.V., Fennel J.F. et al. Observations of the impenetrable barrier, the plasmopause, and the VLF bubble during the 17 March 2015 storm // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2016. No 121. P. 5537–5548. <https://doi.org/10.1002/2016JA022509>
- Gavrilov B.G., Zetser Yu.I., Lyakhov A.N., Poklad Yu.V. and Ryakhovskii I.A. Spatiotemporal Distributions of the Electron Density in the Ionosphere by Records of the Total Electron Content and Phase of VLF Radio Signals // Geomagnetism and Aeronomy. 2017, Vol. 57. No 4. P. 461–470. DOI: 10.1134/S0016793217040065.
- Gavrilov B.G., Zetser Yu.I., Lyakhov A.N., Poklad Yu.V. and Ryakhovskii I.A. Correlated Disturbances of the Upper and Lower Ionosphere from Synchronous Measurements of Parameters of GNSS Signals and VLF Radio Signals // Cosmic Research. 2019. Vol. 57. No 1. P. 36–43. DOI: 10.1134/S0010952519010039
- Kumar A., Kumar S. Solar flare effects on D region ionosphere using VLF measurements during low and high solar activity phases of solar cycle 24 // Earth, Planets and Space. 2018. No 70. P. 29. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8>
- Kumar A., Kumar S. Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum. Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum // Earth, Planets and Space. 2014. No 66. P. 76. DOI:10.1186/1880-5981-66-76.
- Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vlasova N.A., Ginzburg E.A., Daibog E.I., Ishkov V.N., Lazutin L.L., Nguyen M.D., Surova G.M., Yakovchouk O.S. CATALOG of Solar Proton Events in the 24th Cycle of Solar Activity (2009–2019), Moscow. 2022. https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru
- Lynn K.J.W. A relationship between solar proton events, ionospheric uplift observed at VLF and negative ionospheric storms // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. No 105–106. P. 61–65.
- Popova O., Jenniskens P. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // Science. 2013. DOI:10.1126/science.1242642.
- Ryakhovskii I.A., Gavrilov B.G., Poklad Y.V., Bekker S.Z., & Ermak V.M. The State and Dynamics of the Ionosphere from Synchronous Records of ULF/VLF and HF/VHF Radio Signals at Geophysical Observatory «Mikhnevo» // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2021. No 57 (5). P. 718–730. DOI: 10.1134/S1069351321050177.
- Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. National Bureau of

Standards. 1964. Tech. Note 300. U.S. Department of Commerce.

Westerlund S., Reder F.H., Abom C. Absorption events on VLF transmissions // Planetary and Space Science. 1969. No 17. P. 1329–1374.

EFFECT OF SOLAR X-RAY RADIATION AND PROTON PRECIPITATIONS ON THE AMPLITUDE OF VLF SIGNALS

© 2023 B. G. Gavrilov^{1, *}, I. A. Ryakhovsky¹, Yu. V. Poklad¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: boris.gavrilov34@gmail.com*

The paper aims to analyze and compare the effects and mechanisms of influence on the D and E regions of the ionosphere of the Sun's X-ray radiation and charged particle precipitations. The work investigates mid-latitude effects, which have not received sufficient coverage in the scientific literature. We analyze changes in the parameters of radio signals received at the IDG RAS Mikhnevo Observatory from European VLF transmitters for a series of events in September 2017, when an X8.2-class X-ray flare and subsequent proton precipitation were observed. Both events lead to an increase in the electron density in the lower ionosphere, but differ in their impact on radio signal parameters. The impact of X-ray radiation leading to an increase in the amplitude of radio signals is observed only in the daytime. The impact of proton rashes is manifested as a nighttime decrease in amplitude.

Keywords: X-rays, proton precipitation, VLF, lower ionosphere.