

УДК 550.388.2

ЗАВИСИМОСТЬ ВОЗМУЩЕНИЙ *D*-ОБЛАСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

© 2022 г. Б. Г. Гаврилов¹, *, Ю. В. Поклад¹, **, И. А. Ряховский¹, ***, В. М. Ермак¹

¹Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

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

**e-mail: poklad@mail.ru

***e-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.08.2021 г.

После доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Экспериментально исследована зависимость возмущений электронной плотности *D*-области среднеширотной ионосферы во время солнечных вспышек от спектрального состава рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от 0.01 до 0.4 нм, т.е. за пределами диапазона измерений спутника GOES. Для этого были рассчитаны вариации яркостной температуры излучения 6 вспышек 2014–2017 гг. и определен состав их излучения. Показано, что несмотря на то, что в диапазоне длин волн 0.01–0.2 нм находится лишь несколько процентов полной энергии излучения вспышки, именно жесткие компоненты являются основным фактором, приводящим к изменению высоты отражения радиоволн ОНЧ-диапазона. Показано, что эффективность воздействия солнечных вспышек существенно зависит от предыдущей солнечной активности не только для вспышек класса С, но и для мощных вспышек класса М и Х.

DOI: 10.31857/S0016794022020080

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что во время солнечных вспышек основным источником возмущений является рентгеновское излучение. Проникая в нижнюю ионосферу, оно вызывает изменение величины и распределения электронной концентрации [Mitra, 1974], влияя на распространение радиосигналов ОНЧ-диапазона (3–30 кГц) в волноводе, образованном поверхностью Земли и *D*-областью ионосферы. Изменения параметров (амплитуды и фазы) сигналов радиопередатчиков, работающих в этом диапазоне частот, сигналов естественных источников (разрядов молний) [Sumner et al., 1998] и ионосферное радиоизлучение в экспериментах по искусственной модификации ионосферы (нагревных экспериментах) [Гаврилов и др., 2015] могут быть измерены и использованы для диагностики изменений профиля электронной плотности в *D*-области ионосферы.

Имеется обширная литература, посвященная анализу результатов таких измерений на трассах различной длины и ориентации в разных широтных диапазонах [см., например, Cohen et al., 2018, Moore et al., 2007 и ссылки в этих работах]. Для

анализа связи возмущений нижней ионосферы с параметрами солнечных вспышек используются данные регистрации рентгеновского излучения геостационарными спутниками NOAA GOES (<https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>). Известно, [см., например, Kumar and Kumar, 2018; Raulin et al., 2006], что рост электронной концентрации в *D*-области пропорционален энергии рентгеновского излучения, а для вспышек одного класса величина возмущений существенно зависит от периода солнечной активности, ориентации и длины трассы распространения радиосигнала. Характер изменений амплитуды и фазы сигнала может быть сложным, в ряде случаев знакопеременным, и отличаться для разных вспышек [Kolarski and Grubor, 2014, Гаврилов и др., 2019].

Существующие теоретические модели (см., например, [Friedrich et al., 2001]) с определенными ограничениями описывают состояние *D*-области в различных гелиогеофизических условиях. Ferguson [1995], Wait and Spies [1964] предложили использовать для описания распределения электронной концентрации в *D*-области параметры h' (км) – эффективная высота отражения радиосиг-

Таблица 1. Основные параметры вспышек

Дата	Класс	Время начала, UT	Время максимума потока 0.1–0.8 нм, UT
10.06.2014 г.	X2.2	11:38:24	11:42:05
06.09.2017 г.	X2.2	08:59:24	09:10:27
06.09.2017 г.	X9.3	11:53:24	12:02:14
07.09.2017 г.	M7.3	10:13:12	10:15:47
07.09.2017 г.	X1.3	14:21:00	14:36:33
10.09.2017 г.	X8.3	15:44:30	16:06:30

нала и β (км^{-1}) – скорость увеличения электронной концентрации с высотой:

$$Ne(z) = 1.43 \times 10^7 \times \exp(\beta - 0.15)(z - h') \exp(-0.15h') \quad (1)$$

Эта двухпараметрическая модель используется многими исследователями для восстановления профилей электронной концентрации. Измерение амплитуды и фазы сигналов от СДВ-станций и их анализ с использованием программного комплекса LWPC [Ferguson, 1995], позволяют определять параметры h' и β нижней ионосферы и рассчитывать амплитуду и фазу сигнала в точке приема в зависимости от его частоты, координат передатчика и высотного профиля электронной концентрации на трассе распространения [McRae and Thomson, 2004; Thomson et al., 2005].

Одной из проблем исследования состояния возмущенной ионосферы по сигналам удаленных радиостанций является учет различий ионосферных параметров как между различными трассами, так и по длине одной трассы. В работе [Гаврилов и др., 2019] предложена методика определения параметров h' и β в рамках модели Фергюссона–Уайта по данным одновременной регистрации амплитуд и относительных фаз сигналов радиостанций, работающих на разных частотах, но расположенных на малом по сравнению с длиной трассы расстоянии друг от друга. Использование двухчастотной трассы позволило разрешить одну из основных проблем, возникающих при восстановлении параметров возмущенной рентгеновскими вспышками нижней ионосферы: неопределенность состояния ионосферы перед вспышкой. Описанная в публикации [Гаврилов и др., 2019] методика позволяет непосредственно по данным измерений восстанавливать параметры предвспышечной ионосферы без использования данных статистических эмпирических моделей, как это делается, например, в работах [Thomson, 2005; Basak and Chakrabarti, 2013].

В работе [Гаврилов и др., 2020] исследовалось состояние и динамика среднеширотной нижней ионосферы при вспышках различной мощности, длительности и спектрального состава, произошедших в период с 2014 по 2017 г. Было показано,

что вне зависимости от начальных условий, зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от энергии выходит на единый тренд начиная с энергии ~ 0.04 – 0.07 МДж/см². В то же время, величина возмущений может существенно отличаться даже тогда, когда они вызваны вспышками одного энергетического класса. В ряде случаев вспышки М-класса приводили к большему изменению эффективной высоты отражения ОНЧ-радиоволн, чем более мощные вспышки X-класса.

Естественно было предположить, что разница в их воздействии может быть связана с различным спектральным составом излучения вспышек. Целью настоящей работы является определение спектрального состава рентгеновского излучения солнечных вспышек и оценка его влияния на состояние и динамику нижней среднеширотной ионосферы.

2. ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В работе используются экспериментальные данные, полученные в Геофизической обсерватории Института динамики геосфер РАН Михнево, расположенной в 80 км на юг от г. Москвы в точке с координатами (54.9° N, 37.8° E). Радиофизический комплекс обсерватории позволяет принимать сигналы от СДВ-станций, расположенных по всему миру.

Для анализа параметров ионосферы во время солнечных вспышек использовались данные регистрации ОНЧ-радиосигналов, распространяющихся по трассе длиной ~ 2500 км от двух СДВ-передатчиков: GQD (22100 Гц, 54.732° N, 2.883° E) и GBZ (19580 Гц, 54.912° N, 3.278° E), расположенных в Великобритании на расстоянии 32 км друг от друга. Для анализа экспериментальных данных были выбраны 6 рентгеновских вспышек М- и X-классов, произошедших в 2014–2017 гг. Их основные параметры приведены в табл. 1.

На спутнике GOES поток рентгеновского излучения измеряется в 2 спектральных диапазонах: 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм. Для детального анализа спектрального состава излучения выбранных вспышек, в том числе за пределами диапазона из-

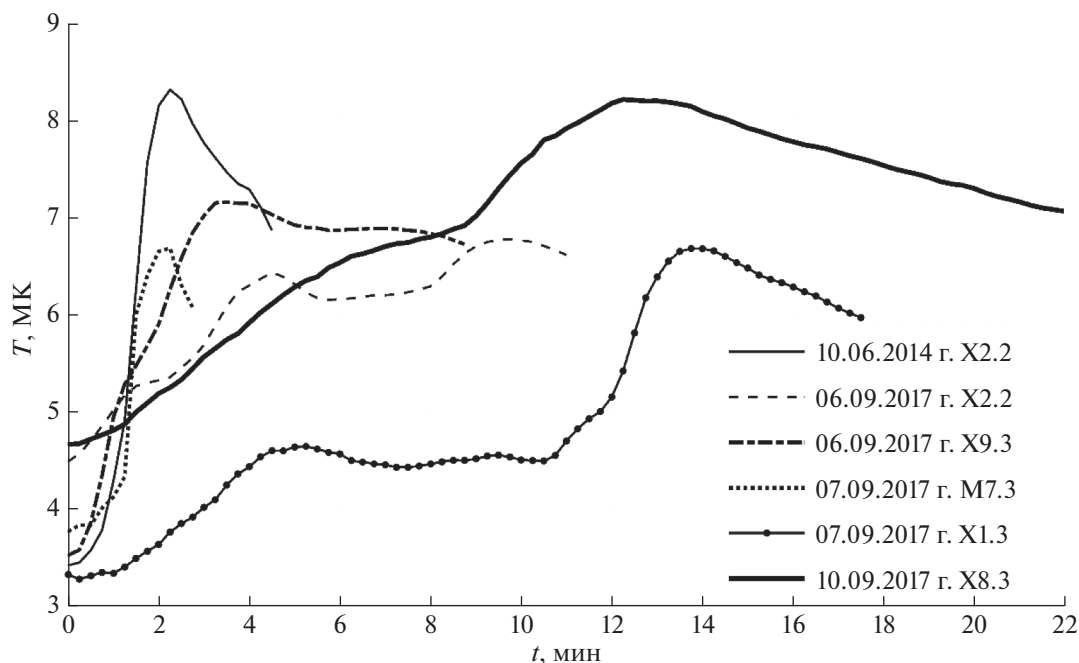


Рис. 1. Временная зависимость изменения яркостной температуры солнечных рентгеновских вспышек M- и X-класса за 2014–2017 гг.

мерений спутником GOES, в предположении, что солнечное излучение близко по своим параметрам к излучению абсолютно черного тела, была оценена яркостная температура для каждой вспышки. Это позволило рассчитать поток излучения вспышек в диапазоне длин волн 0.01–0.2 и 0.2–0.4 нм и оценить роль жесткой части излучения в воздействии на профиль электронной концентрации нижней ионосферы.

Согласно закону Планка, излучение абсолютно черного тела

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (2)$$

где $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Дж с; h – постоянная Планка; c – скорость света; k – постоянная Больцмана; λ – длина волны; T – температура черного тела. Яркостные температуры источника (Солнца) были рассчитаны с использованием выражения

$$\frac{\int_{0.1}^{0.8} I(\lambda, T) d\lambda}{\int_{0.05}^{0.4} I(\lambda, T) d\lambda} = \frac{F_2}{F_1}, \quad (3)$$

где F_1 – поток излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм, а F_2 – в диапазоне 0.1–0.8 нм.

На рис. 1 приведен график изменения во времени яркостной температуры излучения для всех

шести рассматриваемых вспышек, рассчитанной по формуле (3). Можно видеть, что вспышки существенно отличаются как по величине яркостной температуры, так и по характеру ее изменения во времени.

С использованием полученных значений яркостной температуры вспышек был рассчитан поток излучения в диапазонах 0.01–0.2 и 0.2–0.4 нм. Энергия вычислялась интегрированием потока рентгеновского излучения в соответствующем спектральном диапазоне по формуле (2), нормированного на значение зенитного угла Солнца на середине трассы распространения радиосигнала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 показаны зависимости эффективной высоты отражения h' от энергии рентгеновского излучения в диапазонах длин волн 0.01–0.2 нм и 0.2–0.4 нм. Излучение в диапазоне длин волн <0.2 нм существенно сильнее воздействует на параметры нижней ионосферы, чем излучение с длиной волны >0.2 нм, несмотря на то, что для характерных яркостных температур вспышек 3.5–7 МК в диапазоне длин волн 0.01–0.2 нм содержится лишь несколько процентов от энергии в диапазоне 0.2–0.4 нм. Именно жесткое излучение является главным фактором, приводящим к изменению высоты эффективного отражения ОНЧ-радиосигналов.

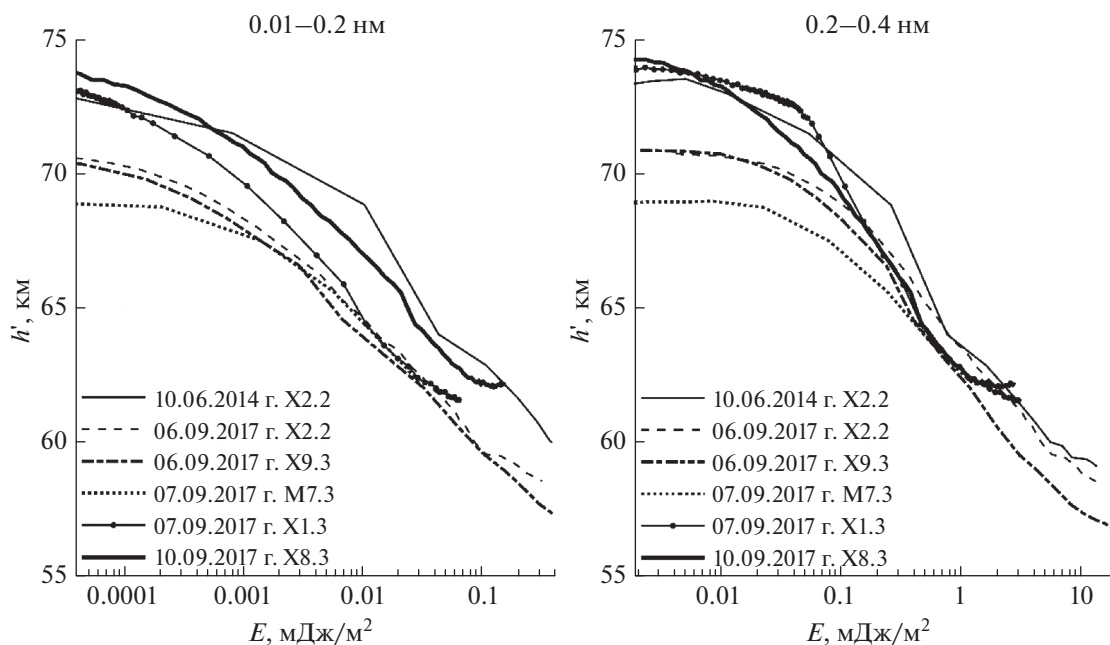


Рис. 2. Зависимость эффективной высоты отражения h' от энергии рентгеновского излучения в диапазонах 0.01–0.2 нм (левая панель) и 0.2–0.4 нм (правая панель).

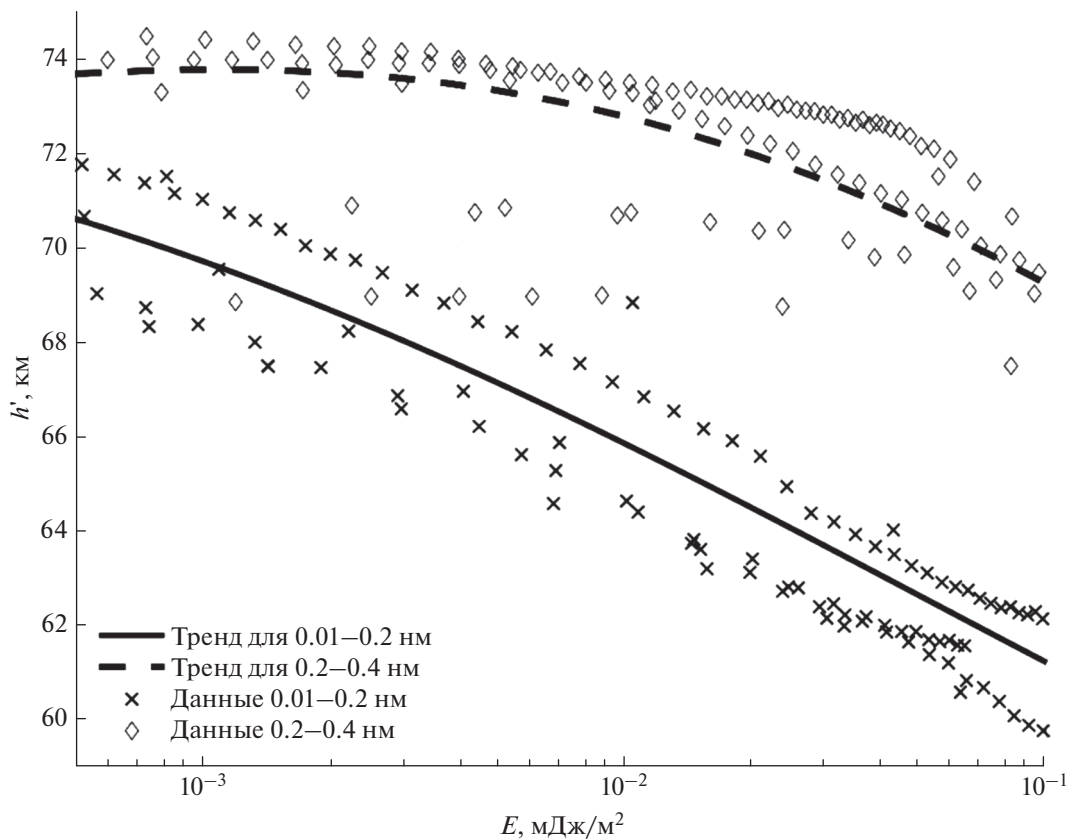


Рис. 3. Сопоставление воздействия на эффективную высоту отражения h' энергии рентгеновского излучения в диапазонах 0.01–0.2 нм и 0.2–0.4 нм для диапазона энергии излучения 0.001–0.1 мДж/м².

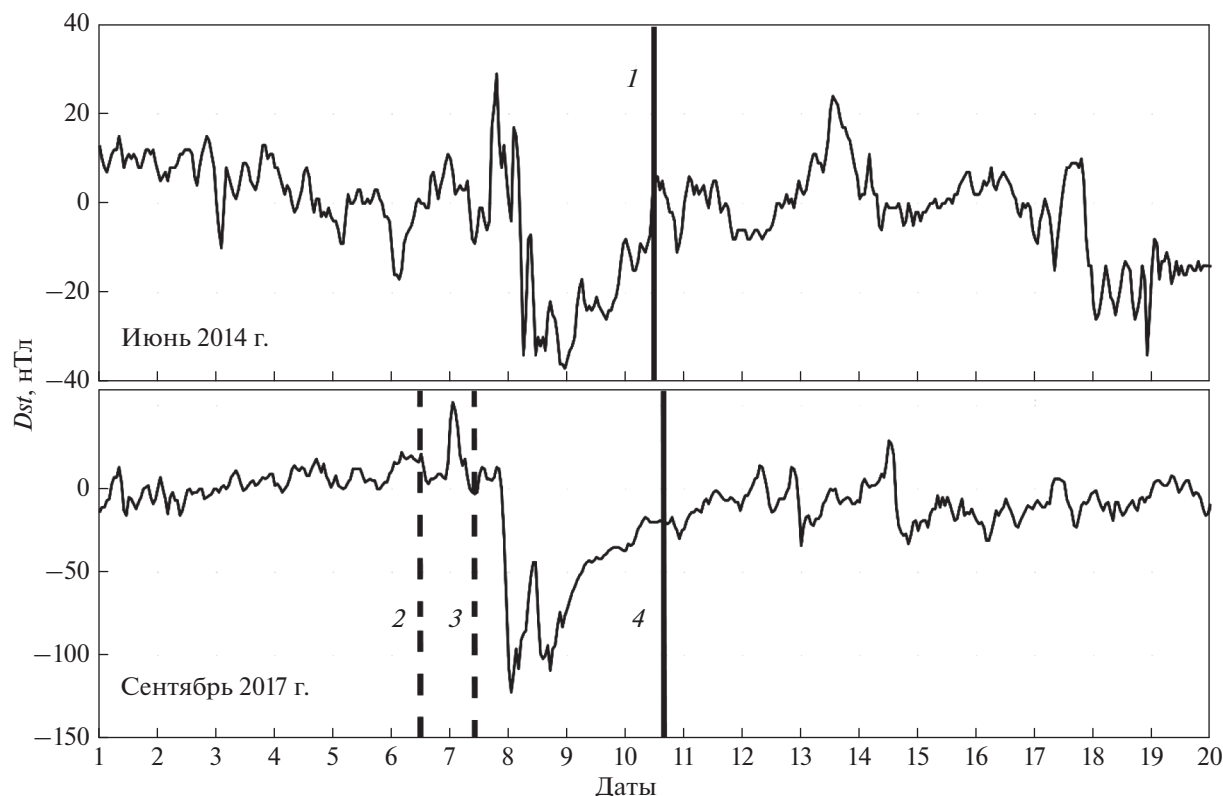


Рис. 4. Dst -индекс 06.2014 г. и 09.2017 г. (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstac/index.html>). Вертикальными линиями показаны вспышки 10.06.2014 г. (1), 06.09.2017 г. (2), 07.09.2017 г. (3) и 10.09.2017 г. (4).

Особенно наглядно это можно увидеть на рис. 3, где показан результат сопоставления данных по воздействию на эффективную высоту отражения H' рентгеновского излучения в диапазонах длин волн 0.01–0.2 и 0.2–0.4 нм для одного диапазона энергии излучения: от 0.001 до 0.1 мДж/м².

Эффективная высота отражения при воздействии более жесткого излучения на 3–7 км меньше, чем при воздействии длинноволнового излучения. Общий характер зависимости h' от энергии близок. В то же время из рис. 2 видно, что кривые зависимости высоты отражения h' от энергии излучения для вспышек 10.06.2014 г. (X2.2) и 10.09.2017 г. (X8.2) лежат правее кривых для вспышек 6–7 сентября 2017 г. (M7.3–X9.3). Это означает, при одинаковой энергии излучения изменение высоты отражения для вспышек 10.06.2014 г. и 10.09.2017 г. оказалось меньше, т.е. эффективность излучения оказалась ниже, чем для вспышек 6–7 сентября 2017 г.

Такое поведение кривых может быть связано с несколькими причинами. Возможно, что полный спектр электромагнитного излучения для этих вспышек был различным. Другим фактором, который мог оказать влияние на реакцию нижней ионосферы, могло быть различие в плотности атмосферы в те дни, когда наблюдались солнечные

вспышки. Снижение эффекта ионизации нижней ионосферы может быть связано с увеличением поглощения рентгеновского излучения вследствие увеличения плотности атмосферы на высотах больших, чем эффективная высота отражения на момент начала вспышки.

Отметим, что вспышкам 10.06.2014 г. и 10.09.2017 г. предшествовали дни высокой геомагнитной активности. На рис. 4 показано изменение Dst -индекса в июне 2014 г. и сентябре 2017 г. Вспышки 6 и 7 сентября 2017 г. наблюдались в спокойных гелиогеофизических условиях.

Связь величины возмущений, вызванных рентгеновскими вспышками с фоновой солнечной активностью, была ранее показана в работах [Raulin et al., 2006; Pacini and Raulin, 2006], но только для тех изменений в ионосфере, которые вызваны вспышками низкого рентгеновского класса C. Для более мощных вспышек этот эффект не был обнаружен. Наши результаты показывают, воздействие вспышек M- и X-классов также отличается для периодов высокой и низкой солнечной активности. Увеличение плотности атмосферы на высотах выше 75 км, вызванное увеличением солнечной активности, вероятно, приводит к снижению эффекта вспышек независимо от их энергии.

4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что использование для оценки энергии рентгеновской вспышки яркостной температуры солнечного излучения позволяет детально исследовать влияние жесткости рентгеновского излучения на ионизацию нижней ионосферы. Несмотря на то, что в диапазоне длин волн 0.01–0.2 нм лежит лишь несколько процентов от энергии в диапазоне 0.2–0.4 нм, именно жесткое излучение является главным фактором, приводящим к изменению высоты эффективного отражения.

Использование для оценки эффектов солнечных вспышек данных по изменению параметров ОНЧ-радиоизлучения на двухчастотной трассе, дополненное исследованием яркостной температуры рентгеновского излучения, является эффективным инструментом изучения состояния и динамики нижней ионосферы в различных гелиогеофизических условиях и может использоваться для получения надежных экспериментальных данных для верификации теоретических моделей ионосферы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А17-117112350014-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Ермак В.М. Удаленная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения, вызванного экспериментами по искусственной модификации ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 5. № 4. С. 466–472. 2015.
<https://doi.org/10.7868/S0016794015040045>
- Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Поклад Ю.В., Ряховский И.А. Оценка изменений параметров среднеширотной нижней ионосферы, вызванных солнечной вспышкой 10 сентября 2017 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 5. С. 628–634. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019050043>
- Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А., Ряховский И.А. Восстановление параметров среднеширотной нижней ионосферы при солнечных вспышках М- и X-классов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 6. С. 762–768. 2020.
<https://doi.org/10.31857/S0016794020060048>
- Basak T., Chakrabarti S.K. Effective recombination coefficient and solar zenith angle effects on low-latitude D-re-

gion ionosphere evaluated from VLF signal amplitude and its time delay during X-ray solar flares // *Astrophys. Space Sci.* V. 348. P. 315–326. 2013.

<https://doi.org/10.1007/s10509-013-1597-9>

– Cohen M., Said R., Paschal E., McCormick J., Gross N., Thompson L., Higginson-Rollins M., Inan U., Chang J. Broadband longwave radio remote sensing instrumentation // *Rev. Scientific Instruments.* V. 89. 094501. 2018.
<https://doi.org/10.1063/1.5041419>

– Cummer S., Inan U., Bell T. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospheric // *Radio Sci.* V. 33. P. 1781–1792. 1998.

– Ferguson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // *Radio Sci.* V. 30. № 3. P. 775–782. 1995.
<https://doi.org/10.1029/94RS03190>

– Friedrich M., Pilgram R., Torkar K. A novel concept for empirical D-region modelling // *Adv. Space Res.* V. 27. № 1. P. 5–12. 2001.

– Kolarski A., Grubor D. Sensing the Earth's low ionosphere during solar flares using VLF signals and GOES solar X-ray data // *Adv. Space Res.* V. 53. P. 1595–1602. 2014.

– 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.* V. 70. № 29. 2018.

<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8>

– McRae W.M., Thomson N.R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 66. P. 77–87. 2004.

– Mitra A.P. Ionospheric effects of solar flares. Norwell, Mass.: D. Reidel Publishing Company. 307 p. 1974.

– Moore R.C., Inan U.S., Bell T.F., Kennedy E.J. ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of 4400 km // *J. Geophys. Res.* V. 112. A05309. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006JA012063>

– Pacini A.A., Raulin J.P. Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: A solar cycle phase dependence // *J. Geophys. Res.* V. 111. A09301. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011613>

– Raulin J., Pacini A., Kaufmann P., Correia E., Martinez M. On the detectability of solar X-ray flares using very low frequency sudden phase anomalies // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 68. P. 1029–1035. 2006.

– Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A. Large solar flares and their ionospheric D-region enhancements // *J. Geophys. Res.* V. 110. A06306. 2005.

– Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves // *NBS Tech. Note.* P. 300. 1964.