

УДК 550.388.2

## ОЦЕНКА ИОНИЗАЦИИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X КЛАССА ПО ДАННЫМ ОНЧ-НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 г. И. А. Ряховский<sup>1</sup>, \*, Ю. В. Поклад<sup>1</sup>, \*\*, Б. Г. Гаврилов<sup>1</sup>, \*\*\*

<sup>1</sup>Института динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН), Москва, Россия

\*e-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru

\*\*e-mail: poklad@mail.ru

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

Поступила в редакцию 17.11.2022 г.

После доработки 28.11.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Представлены результаты анализа данных измерений амплитуд и фаз сигналов СДВ-передатчиков GQD (19.6 кГц) и GBZ (22.1 кГц) в obs. ИДГ РАН Михнево с целью оценки воздействия солнечных вспышек X 2.2 и X 1.5 10.06.2014 г. на электронную концентрацию в нижней ионосфере. По данным измерения потока рентгеновского излучения спутником GOES на длинах волн 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм был рассчитан поток излучения в более жестких спектральных диапазонах 0.01–0.3, 0.01–0.26 и 0.01–0.22 нм. Это позволило определить скорости ионизации и спектральные диапазоны излучения, оказавшие наибольшее влияние на динамику электронной концентрации. Показано, что, если длительность переднего фронта существенно меньше характерного времени рекомбинации, изменение профиля электронной концентрации в нижней ионосфере на фронте вспышки линейно связано с изменением потока рентгеновского излучения.

DOI: 10.31857/S0016794022600648, EDN: PLAMRF

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное излучение в широком диапазоне частот, вызванное солнечными вспышками различного класса, оказывает существенное влияние на высотный профиль электронной концентрации всей ионосферы. Наиболее трудной для экспериментального и теоретического исследования является D-область ионосферы. Во время солнечных вспышек поток рентгеновского излучения Солнца проникает в D-область и увеличивает концентрацию электронов в несколько раз за счет дополнительной ионизации [Mitra, 1974; Kumar and Kumar, 2018]. Результаты многочисленных исследований показали, что изменения электронной концентрации в нижней ионосфере оказывают влияние на параметры электромагнитных сигналов ОНЧ-диапазона, распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера [Thomson, 2010; Thomson et al., 2011]. Анализ вариаций амплитудно-фазовых характеристик ОНЧ-сигналов позволяет исследовать состояние и динамику нижней ионосферы во время воздействия рентгеновского излучения вспышки [Gavrilov et al., 2020; Bekker et al., 2021, 2022].

В работе [Gavrilov et al., 2020] была апробирована методика восстановления параметров

ионосферы в рамках двухпараметрической модели Фергюсона–Уайта [Ferguson, 1995] по данным измерений параметров радиосигналов на двухчастотной среднеширотной СДВ трассе GQD/GBZ–Михнево. В рамках этой модели высотный профиль электронной концентрации задается уравнением:

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

где  $h'$  (км) – эффективная высота отражения радиосигнала и  $\beta$  (км<sup>–1</sup>) – скорость увеличения электронной концентрации (см<sup>–3</sup>) с высотой. Использование двухчастотной трассы позволило оценивать не только динамику ионосферы во время вспышки, но и ее состояние перед вспышкой.

Основными процессами, оказывающими влияние на состояние и динамику ионосферы (без учета процессов диффузии и дрейфа плазмы) являются ионизация нейтральных компонент и рекомбинация заряженных частиц. В работе представлены результаты оценки ионизации нижней ионосферы во время солнечных вспышек X 2.2 и X 1.5 класса, произошедших 10.06.2014 г.

## 2. ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

С 2014 г. в ГФО Михнево (54°57' N, 37°46' E) ведется мониторинг амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ-радиостанций, расположенных по всему миру [Ryakhovskii et al., 2021]. Регистрация сигналов выполняется высокочастотным измерительным комплексом Metronix-ADU07 на горизонтальные магнитные антенны, ориентированные в направлениях Север–Юг и Восток–Запад. Полученные волновые формы вариаций магнитного поля с частотой оцифровки 128 кГц позволяют исследовать временной ход амплитуды и относительной фазы сигналов на частотах СДВ-передатчиков с шагом 1 с.

В данной работе использовались данные, полученные в ГФО Михнево во время солнечной вспышки класса X2.2, произошедшей 10.06.2014 г. в 11:40 UT. Результаты регистрации потока рентгеновского излучения на спутнике GOES (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full/>) в диапазонах длин волн 0.1–0.8 нм и 0.05–0.4 нм представлены на рис. 1. Особенности этой вспышки являются крутой передний фронт и малая длительность. Для диапазона 0.1–0.8 нм время нарастания потока от уровня 0.1 до максимального значения составило 2 мин, а полная длительность вспышки по уровню 0.1 от максимума составила 7.5 мин. Для диапазона излучения 0.05–0.4 нм эти значения составили 1.5 мин и 5.5 мин соответственно. На том же рисунке показаны результаты регистрации амплитуды и фазы сигналов передатчиков GQD и GBZ в ГФО Михнево.

Использование методики, описанной в работе [Gavrilov et al., 2020], позволило оценить временной ход электронной концентрации во время вспышки на разных высотах. Результаты расчетов концентрации  $N_e$  во время вспышки с использованием модели Фергюсона–Уайта для высот 52, 56, 60, 64, 68 и 72 км представлены на рис. 2.

Высотный профиль, описываемый уравнением (1), является экспоненциальным. Возникает вопрос о границах применимости этого профиля для оценки электронных концентраций. Модель Фергюсона–Уайта является радиофизической и строилась на основе данных о распространении СДВ-радиосигналов. То есть модель корректно описывает диапазон концентраций электронов, который влияет на параметры отражения радиоволн на этих частотах. В нашем анализе мы использовали диапазон концентраций от  $10 \text{ см}^{-3}$  до  $3500 \text{ см}^{-3}$ . Этот диапазон отмечен на рис. 2 горизонтальными штриховыми линиями. Меньшие концентрации электронов не оказывают влияния на параметры электромагнитной волны СДВ-диапазона, а при более высоких значениях концентрации электронов радиоволны ОНЧ-диапазона испытывают полное отражение. Так как на высотах

68 и 72 км концентрации  $N_e$  во время вспышки значительно превышают величину  $3500 \text{ см}^{-3}$ , в настоящей работе мы ограничились анализом данных для диапазона высот 52–64 км.

Изменения электронной концентрации в ионосфере во время солнечных вспышек может быть описано уравнением неразрывности в общем виде [Nina et al., 2018]:

$$\frac{dN_e(h,t)}{dt} = G(h,t) - L(h,t), \quad G(h,t) = K_i I, \quad (2)$$

где  $G(h,t)$  и  $L(h,t)$  – скорости ионизации и потерь электронов соответственно. Скорость ионизации  $G(h,t)$  в свою очередь определяется потоком излучения  $I$  с коэффициентом пропорциональности  $K_i$ .

Для расчета потока ионизирующего излучения использовались данные спутника GOES в спектральных диапазонах 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм. В предположении, что источник излучения при рентгеновской вспышке является черным телом [Levine et al., 2019; Gavrilov et al., 2022], его спектральная плотность подчиняется закону Планка:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda k T}\right) - 1}, \quad (3)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\lambda$  – длина волны;  $T$  – температура черного тела. Тогда использование данных измерений потока излучения спутником GOES позволяет оценить яркостную температуру ( $T$ ) источника, т.е. такую температуру, для которой выполняется условие:

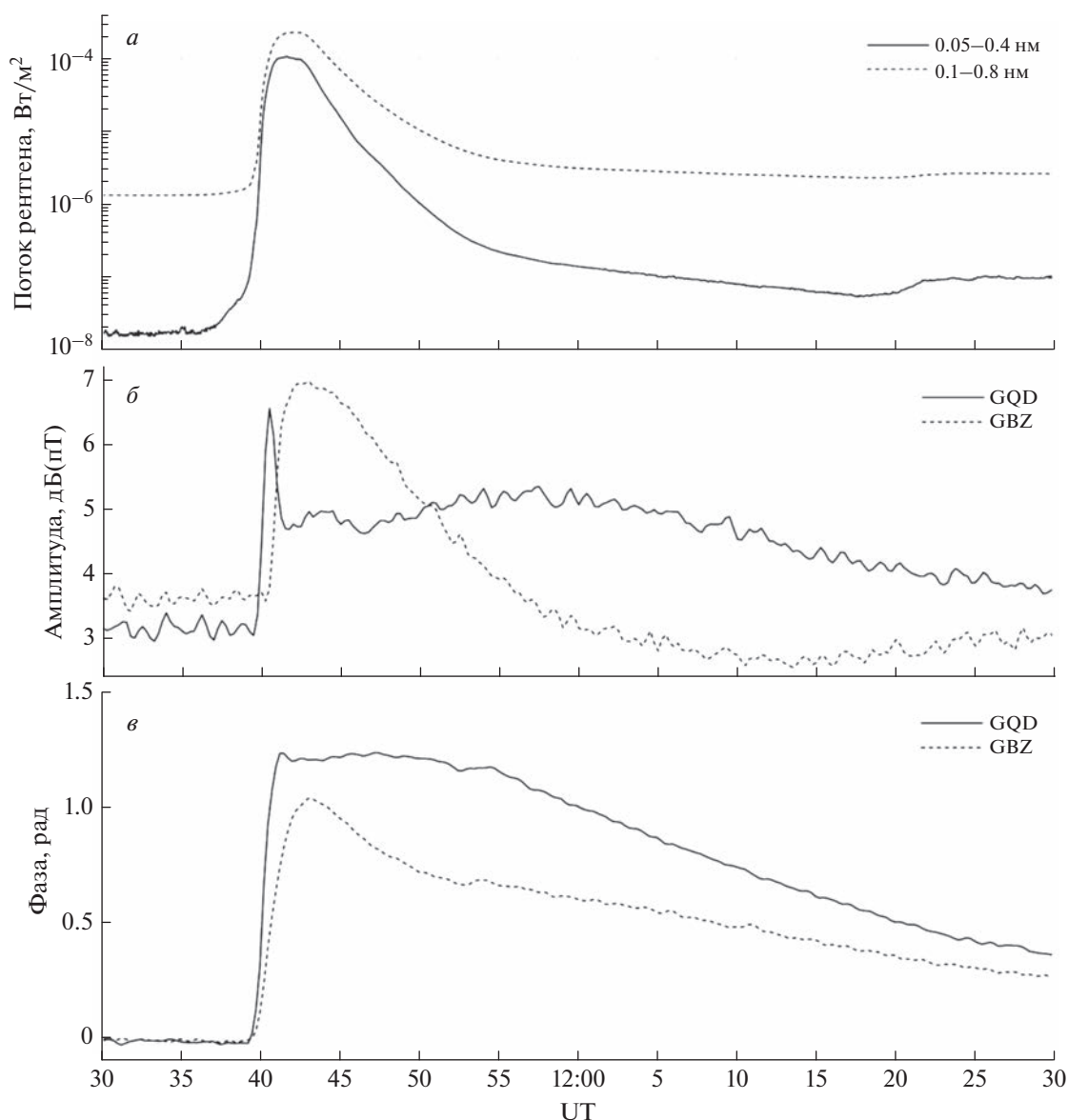
$$\frac{\int_{0.1}^{0.8} I(\lambda, T) d\lambda}{\int_{0.05}^{0.4} I(\lambda, T) d\lambda} = \frac{F_2}{F_1}, \quad (4)$$

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

Использование найденной яркостной температуры дало возможность рассчитать потоки излучения в других спектральных диапазонах. На рис. 3 показаны потоки рентгеновского излучения, зарегистрированные спутником GOES во время вспышки X 2.2. 10.06.2014 г. в 11:40 UTC в диапазонах 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм, а также рассчитанные потоки излучения для диапазонов длин волн 0.01–0.3, 0.01–0.26 и 0.01–0.22 нм.

Отметим, что с уменьшением верхней границы диапазона, поток падает, а крутизна переднего и заднего фронтов нарастает.

Из рис. 1 видно, что спустя 50 мин после начала вспышки амплитуда и фаза сигналов не вернулась к предвспышечному состоянию. Учитывая, что характерные времена рекомбинационных про-



**Рис. 1.** Поток рентгеновского излучения по данным спутника GOES в диапазоне 0.1–0.8 нм (пунктирная линия) и 0.05–0.4 нм (сплошная линия) (а); амплитуды сигналов от ст. GBZ (сплошная линия) и GQD (пунктирная линия) (б); фазы сигналов от ст. GBZ (сплошная линия) и GQD (пунктирная линия), зарегистрированных в ГФО Михнево во время солнечной вспышки X2.2 10.06.2014 г. (в).

цессов существенно больше времени нарастания фронта, для оценки изменения концентрации электронов на переднем фронте вспышки уравнение (2) можно свести к виду

$$\frac{dNe(h,t)}{dt} = K_i(h,\lambda) I(\lambda,t). \quad (5)$$

Проинтегрировав его по времени, получим:

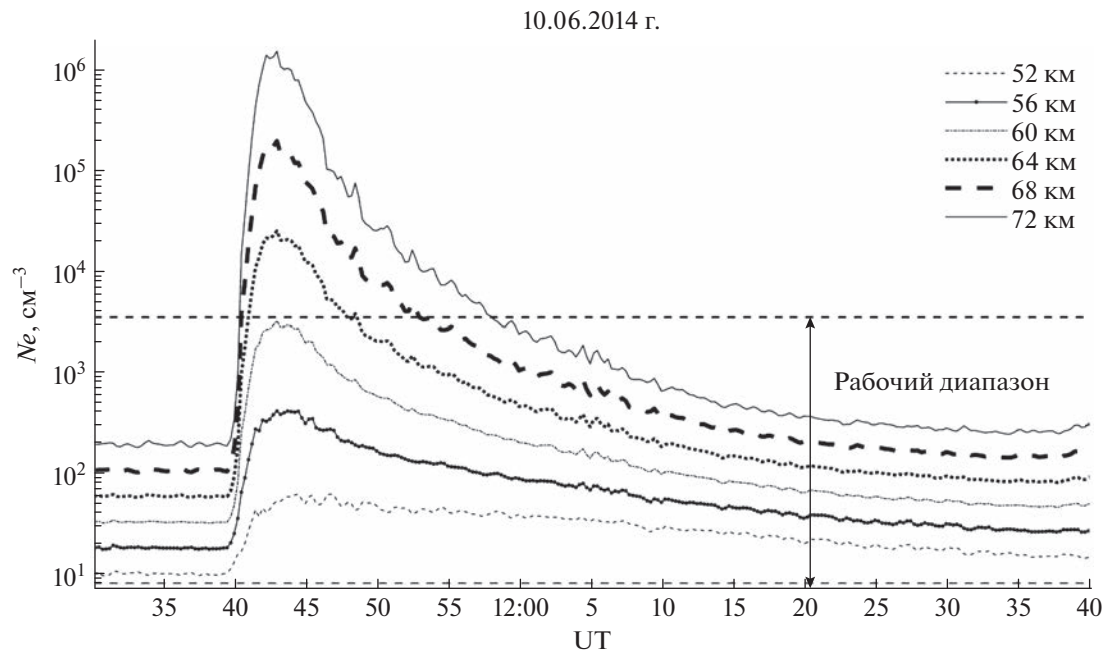
$$Ne(h,t) = K_i(h,\lambda) E(\lambda,t), \quad (6)$$

где  $E$  – энергия излучения. Таким образом, на переднем фронте короткой вспышки концентрация электронов должна быть пропорциональна энергии излучения.

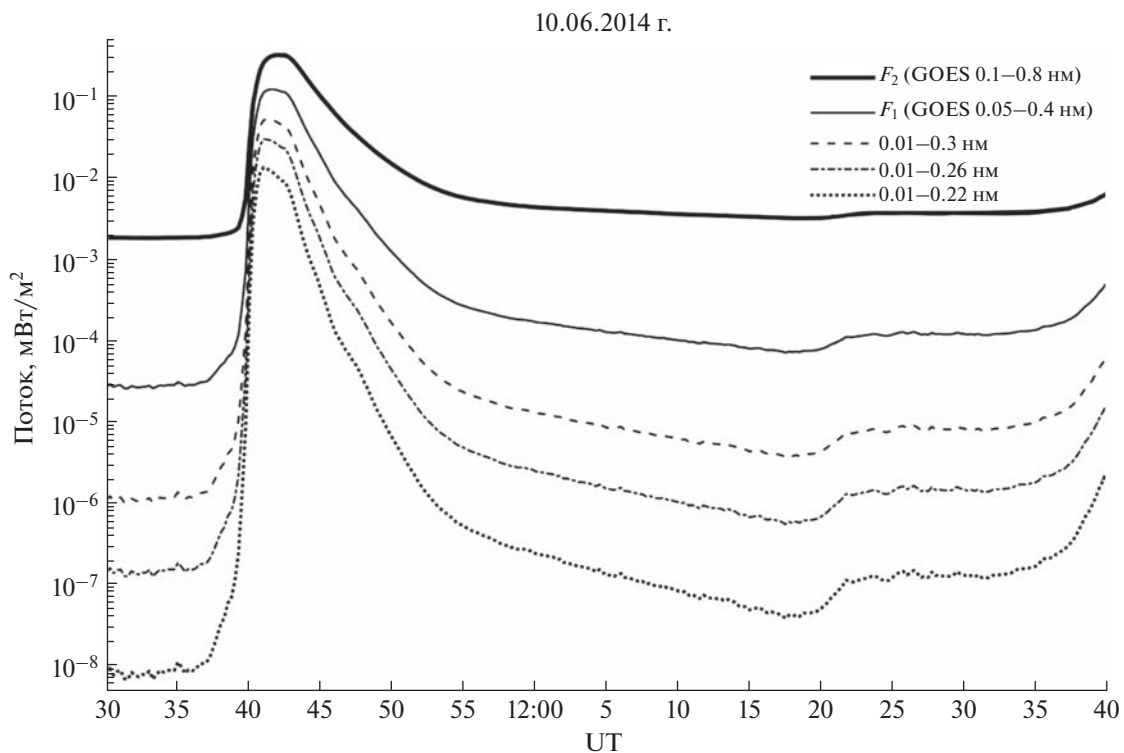
На рис. 4 показаны зависимости концентраций  $Ne(h,t)$ , рассчитанных по модели Фергюсона–Уайта (уравнение (1)) от энергий  $E(\lambda,t)$  рентгеновского излучения на высотах 52, 56, 60 и 64 км в различных спектральных диапазонах. При расчетах энергии излучения учитывалось значение зенитного угла Солнца.

Из рис. 4 видно, что зависимость электронных концентраций от энергии излучения на фронте вспышки близка к линейной, что соответствует модели, описываемой уравнением (6).

Дальнейшие расчеты проводились для спектральных диапазонов, в которых нижняя граница



**Рис. 2.** Динамика концентрации  $N_e$  на высотах 52, 56, 60, 64, 68 и 72 км во время солнечной вспышки X2.2 10.06.2014 г., рассчитанная по модели Фергюсона–Уайта.



**Рис. 3.** Поток рентгеновского излучения в различных спектральных диапазонах во время вспышки X2.2 10.06.2014 г.

составляла 0.01 нм, а верхняя граница менялась от 0.18 нм до 0.32 нм. Для каждого из этих спектральных диапазонов на высотах 52, 56, 60 и 64 км определялся коэффициент  $K_i(h, \lambda)$  в уравнении (6).

Для расчета коэффициента  $K_i(h, \lambda)$  брались точки от момента начала вспышки до момента достижения 95% от максимума потока излучения в спектральном диапазоне 0.05–0.4 нм. Результа-

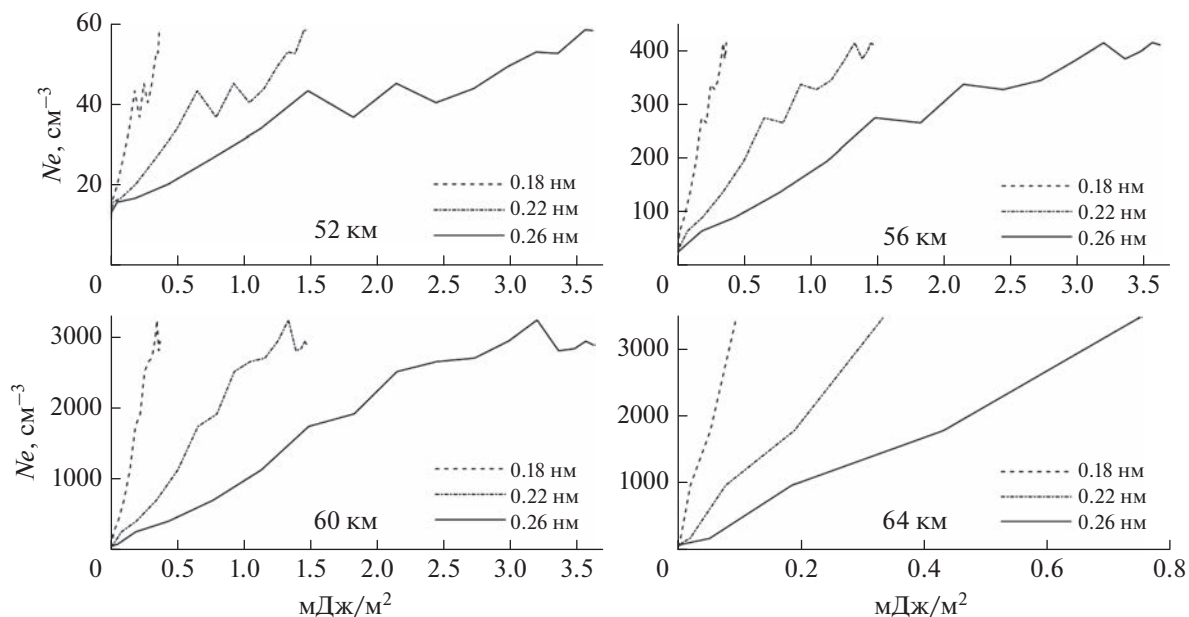


Рис. 4. Зависимости концентраций, рассчитанных по модели Фергюсона–Уайта (уравнение (1)) от энергий рентгеновского излучения на высотах 52, 56, 60 и 64 км.

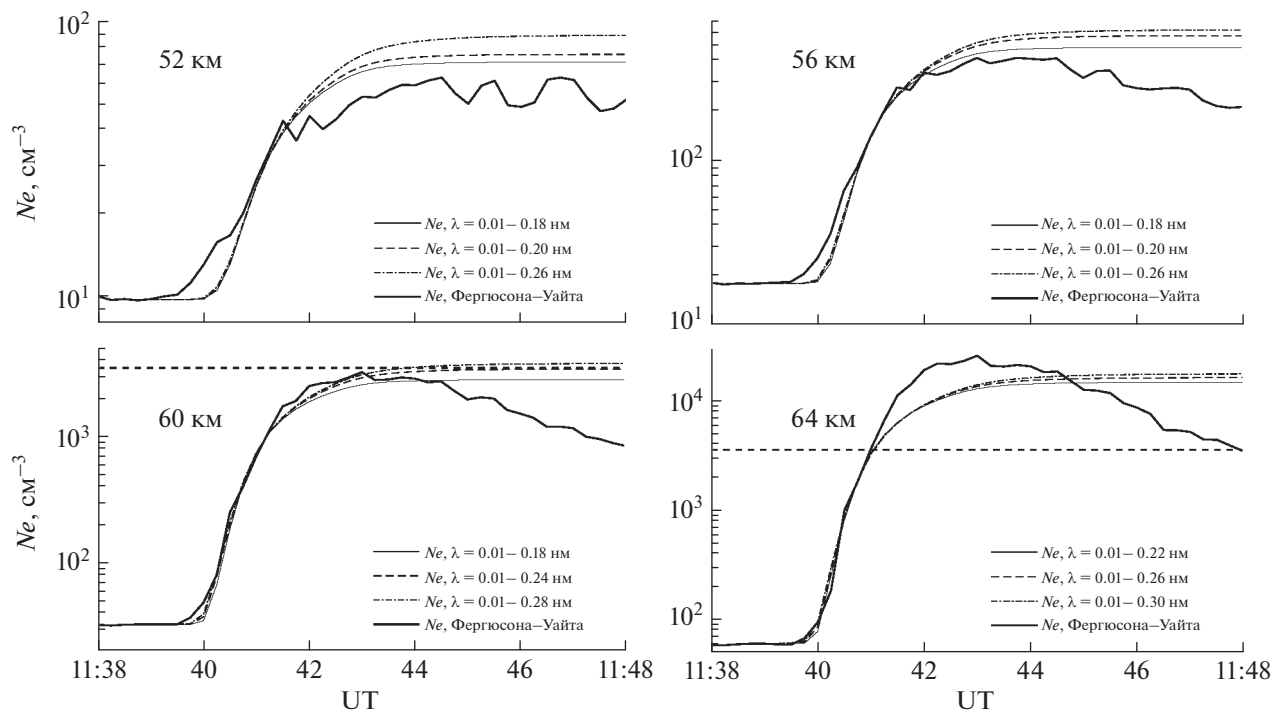
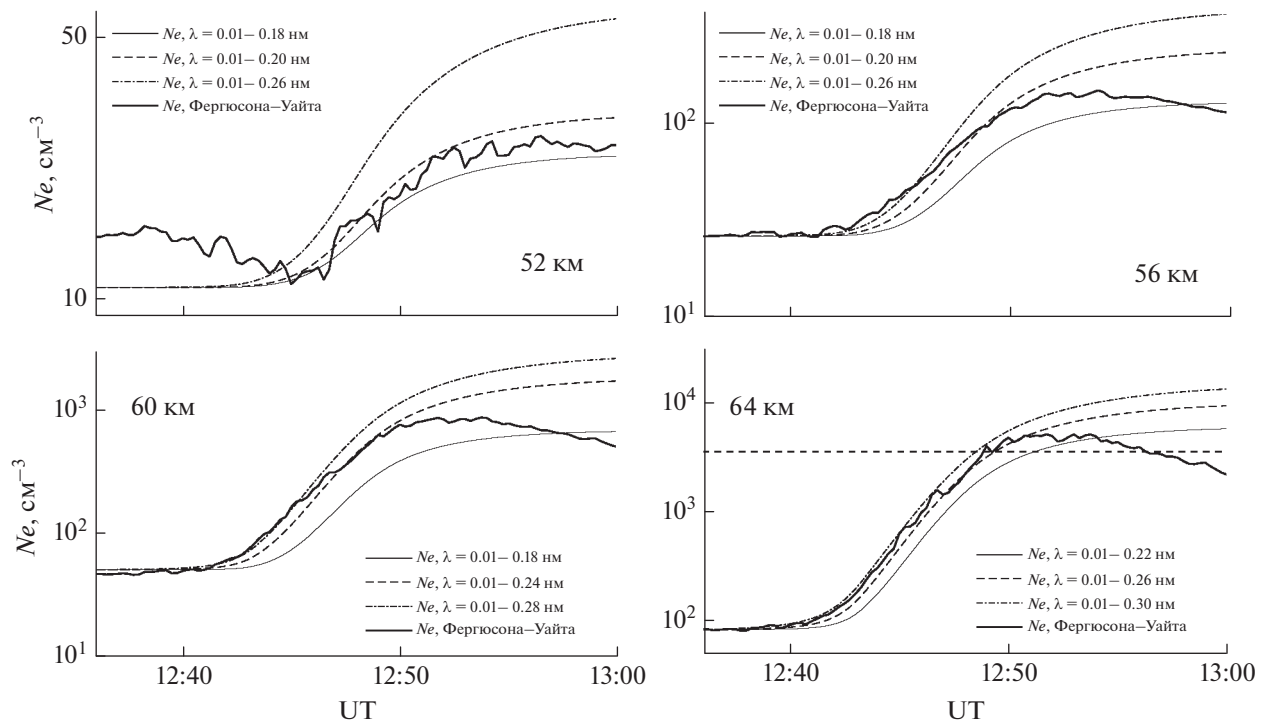


Рис. 5. Результаты расчета изменения концентрации электронов  $N_e$  (уравнение (6)) на фронте вспышки X 2.2 10.06.2014 г. на высотах 52, 56, 60 и 64 км в зависимости от потока рентгеновского излучения различной жесткости с использованием коэффициента, толстые кривые — концентрации  $N_e$ , рассчитанные по методике Фергюсона–Уайта (уравнение (1)) с использованием данных ОНЧ.

ты расчетов изменения концентрации электронов на различных высотах с использованием полученных значений коэффициентов  $K_i$  представлены на рис. 5. Здесь же для сравнения показаны данные расчета динамики  $N_e$  по методике Фергюсона–Уайта (уравнение (1)).

Видно, что для каждого диапазона энергии рентгеновского излучения можно подобрать значение коэффициента  $K_i(h, \lambda)$  в уравнении (6) так, чтобы полученная зависимость  $N_e(t)$  достоверно описывала ход электронной концентрации на данной высоте. В табл. 1 приведены результаты



**Рис. 6.** Результаты расчета изменения концентрации электронов  $N_e$  (уравнение (6)) на фронте вспышки X 1.5 10.06.2014 г. на высотах 52, 56, 60 и 64 км в зависимости от потока рентгеновского излучения различной жесткости с использованием коэффициента, толстые кривые — концентрации  $N_e$ , рассчитанные по методике Фергюсона–Уайта (1) с использованием данных ОНЧ.

оценки коэффициентов  $K_i(h, \lambda)$  для различных спектральных диапазонов на высотах 52, 56, 60 и 64 км.

Для того чтобы разрешить неопределенность, в подборе коэффициентов  $K_i(h, \lambda)$  и определить

какой спектральный диапазон играет основную роль на каждой высоте, мы провели такую же оценку для вспышки X1.5, которая произошла в этот же день в 12:50 UT. На рис. 6 показаны результаты расчета  $N_e$  на фронте вспышки X1.5 с использованием коэффициентов из таблицы

**Таблица 1.** Оценка коэффициентов ионизации нижней ионосферы для различных диапазонов рентгеновского излучения

| $h$ , км | $K_i(h, \lambda)$ | Диапазон излучения, нм |
|----------|-------------------|------------------------|
| 52       | $1.6 \times 10^5$ | 0.01–0.18              |
|          | $7.9 \times 10^4$ | 0.01–0.20              |
|          | $2.0 \times 10^4$ | 0.01–0.26              |
| 56       | $1.2 \times 10^6$ | 0.01–0.18              |
|          | $2.7 \times 10^5$ | 0.01–0.22              |
|          | $1.5 \times 10^5$ | 0.01–0.26              |
| 60       | $7.3 \times 10^6$ | 0.1–0.18               |
|          | $1.3 \times 10^6$ | 0.01–0.24              |
|          | $9.3 \times 10^5$ | 0.01–0.28              |
| 64       | $3.4 \times 10^7$ | 0.1–0.22               |
|          | $4.1 \times 10^6$ | 0.01–0.26              |
|          | $2.3 \times 10^6$ | 0.01–0.30              |

для каждого диапазона длин волн и значения  $N_e$ , рассчитанного по экспериментальным данным (уравнение (1)).

Видно, что для второй вспышки на каждой высоте один из спектральных диапазонов наиболее достоверно описывает ход электронной концентрации на фронте вспышки. В табл. 1 эти диапазоны и соответствующие коэффициенты выделены серым цветом.

Полученные результаты демонстрируют возможность экспериментальной оценки скоростей ионизации нижней ионосферы и определения спектральных диапазонов излучения, оказывающих наибольшее влияние на динамику электронной концентрации на различных высотах во время солнечных вспышек X класса.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование параметров электромагнитного излучения ОНЧ-диапазона является эффективным инструментом для оценки состояния и динамики нижней ионосферы в спокойных и возмущенных условиях.

Используемые в работе экспериментальные наблюдения на двухчастотной трассе GQD/GBZ—ГФО Михнево и модель Фергюсона—Уайта позволили оценить динамику  $N_e(h, t)$  в нижней ионосфере во время двух солнечных вспышек X 2.2 и X 1.5, произошедших 10.06.2014 г. [Gavrilov et al., 2022].

Использование данных измерения потока рентгеновского излучения спутником GOES в спектральных диапазонах 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм позволило оценить яркостную температуру источника (в предположении абсолютно черного тела) и динамику потоков рентгеновского излучения в более жестких спектральных диапазонах для этих двух вспышек.

Было показано, что если длительность переднего фронта существенно меньше характерного времени рекомбинации в нижней ионосфере, динамика профиля электронной концентрации на фронте вспышки будет линейно зависеть от потока рентгеновского излучения.

Комплексный анализ динамики  $N_e(h, t)$ , рассчитанной по модели Фергюсона—Уайта, и потоков рентгеновского излучения в различных диапазонах длин волн позволил оценить значения коэффициентов скоростей ионизации и определить спектральные диапазоны излучения, оказывающие наибольшее влияние на динамику электронной концентрации на различных высотах нижней ионосферы для вспышек X 2.2 и X 1.5 10.06.2014 г.

Представленная в работе методика может быть использована для оценки скоростей ионизации нижней ионосферы во время солнечных вспышек разных энергетических классов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 22-77-00051).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bekker S.Z., Ryakhovsky I.A., Korsunskaya J.A. Modeling of the lower ionosphere during solar X-ray flares of different classes // J. Geophys. Res. — Space. V. 126. № 2. e2020-JA028767. 2021.  
<https://doi.org/10.1029/2020JA028767>
- Bekker S.Z., Kozlov S.I., Kudryavcev V.P. Comparison and verification of the different schemes for the ionization-recombination cycle of the ionospheric D-region // J. Geophys. Res. — Space. V. 127. N 10. e2022JA030579. 2022.  
<https://doi.org/10.1029/2022JA030579>
- 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>
- Gavrilov B.G., Ermak V.M., Lyakhov A.N., Poklad Y.V., Rybakov V.A., Ryakhovsky I.A. Reconstruction of the parameters of the lower midlatitude ionosphere in M- and X-class solar flares // Geomagn. Aeronomy. V. 60. № 6. P. 747–753. 2020.  
<https://doi.org/10.1134/S0016793220060043>
- Gavrilov B.G., Poklad Y.V., Ryakhovsky I.A., Ermak V.M. Dependence of D-region perturbations of the midlatitude ionosphere on the spectral composition of the X-ray radiation of solar flares according to experimental data // Geomagn. Aeronomy. V. 62. № 1–2. P. 98–103. 2022.  
<https://doi.org/10.1134/S0016793222020086>
- 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 Space. V. 70. № 1. Art. № 29. 2018.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8>
- Levine E.V., Sultan P.J., Teig L.J. A parameterized model of X-ray solar flare effects on the lower ionosphere and HF propagation // Radio Sci. V. 54. № 2. P. 168–180. 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2018RS006666>
- Mitra A.P. Ionospheric effects of solar flares. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 307 p. 1974.  
<https://doi.org/10.1007/978-94-010-2231-6>
- Nina A., Čadež V.M., Bajčetić J., Mitrović S.T., Popović L.Č. Analysis of the relationship between the Solar X-ray radiation intensity and the D-region electron density using satellite and ground-based radio data // Sol. Phys. V. 293. № 4. Art. № 64. 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1279-4>
- 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” // Izv., Phys. Solid Earth. V. 57. № 5. P. 718–730. 2021.  
<https://doi.org/10.1134/S1069351321050177>
- Thomson N.R. Daytime tropical D region parameters from short path VLF phase and amplitude // J. Geophys. Res. — Space. V. 115. A09313. 2010.  
<https://doi.org/10.1029/2010JA015355>
- Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A. Daytime D region parameters from long-path VLF phase and amplitude // J. Geophys. Res. — Space. V. 116. A11305. 2011.  
<https://doi.org/10.1029/2011JA016910>