

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА РЕНТГЕНОВСКИЕ ВСПЫШКИ 6 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

С.З. Беккер

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия  
susanna.bekker@gmail.com

## SIMULATION OF RESPONSE OF THE LOWER IONOSPHERE TO THE SEPTEMBER 6, 2017 X-RAY FLARES

S.Z. Bekker

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia  
susanna.bekker@gmail.com

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты расчета отклика параметров нижней ионосферы на рентгеновские вспышки X-класса 6 сентября 2017 г. Для расчета использована плазмохимическая модель, учитывающая ключевые процессы, протекающие в нижней ионосфере. Рентгеновская составляющая скорости ионизации получена с использованием данных потока излучения, измеренных спутником GOES. Проведена верификация результатов расчета пространственно-временной динамики концентрации электронов по данным наземных радиофизических измерений, полученных в ГФО Михнево с помощью трех СДВ-передатчиков. Экспериментальные данные продемонстрировали достаточно хорошие прогностические возможности построенной модели.

**Ключевые слова:** моделирование ионосферы, концентрация электронов, ионизация нижней ионосферы, рентгеновские вспышки, распространение СДВ.

**Abstract.** This paper presents the results of calculating the response of parameters of the lower ionosphere to X-ray flares that occurred on September 6, 2017. For the calculation, a plasma-chemical model was used, which takes into account the key processes occurring in the lower ionosphere. The X-ray component of the ionization rate was calculated using radiation flux data measured by the GOES satellite. We verified the results of calculating the spatiotemporal dynamics of the electron concentration according to the data of ground-based radiophysical measurements obtained by three VLF-transmitters at GPO Mikhnevo. The experimental data demonstrated rather good predictive capabilities of the constructed model.

**Keywords:** ionospheric modeling, electron concentration, ionization of the lower ionosphere, X-ray flares, VLF propagation.

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что к настоящему моменту накоплено большое количество теоретических оценок и экспериментальных данных о состоянии нижней ионосферы в различных гелиогеофизических условиях, точность прогноза поведения ее параметров все еще невысока, особенно во время возмущений различной мощности.

Шестого сентября 2017 г. произошли последовательно две рентгеновские вспышки X-класса: X2.2 (09:10 UT) и X9.3 (12:02 UT), последняя из которых оказалась самой мощной в 24-м цикле солнечной активности [Гаврилов и др., 2018]. Резкий рост рентгеновского и ультрафиолетового излучения привел к существенным вариациям концентраций заряженных составляющих в верхней и нижней ионосфере.

Цель настоящего исследования — с помощью плазмохимической модели D-области оценить отклик параметров нижней ионосферы на рентгеновские вспышки 6 сентября 2017 г., и провести верификацию полученных результатов по данным наземных радиофизических измерений, полученных в ГФО Михнево от трех европейских СДВ-передатчиков.

### ОЦЕНКА ОТКЛИКА ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА РЕНТГЕНОВСКИЕ ВСПЫШКИ

Использованная в данной работе плазмохимическая модель основана на работе [Кудрявцев, Романюха, 1995]. Она включает в рассмотрение все ключевые процессы, протекающие в нижней ионосфере:

прилипание электронов в тройных соударениях, фотоотлипание и отлипание при соударениях, преобразование положительных и отрицательных ионов, ионную и диссоциативную рекомбинации. Расчет ионизации в УФ- и рентгеновском диапазонах был произведен с использованием реальных данных потока солнечного излучения со спутника GOES по методике, описанной в [Корсунская, 2019]. Измеренный спутником GOES 6 сентября 2017 г. поток излучения показан на рис. 1 для диапазонов длин волн 0.05–0.4 и 0.1–0.8 нм.

Температура и концентрация нейтральных составляющих среды, являющиеся входными параметрами модели, оценивались по многолетним измерениям спутника AURA. Высотные профили параметров атмосферы были получены путем усреднения значений, соответствующих следующим гелиогеофизическим условиям: индекс  $F10.7 > 100$ , зенитный угол  $\theta < 80^\circ$ , широта  $30^\circ < \varphi < 60^\circ$ , долгота  $0^\circ < \lambda < 90^\circ$ , осенние месяцы.

На рис. 2 представлена рассчитанная динамика высотного профиля концентрации электронов  $N_e$  над ГФО Михнево ( $55^\circ$  N,  $38^\circ$  E) во время двух рентгеновских вспышек X-класса. Во время вспышки X9.3, максимум ионизации которой пришелся на 12:02 UT, самый большой относительный рост  $N_e$  произошел на высоте 65 км. На этой высоте  $N_e$  за 7 мин возросла более чем в 50 раз и составила  $8.8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

### ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для верификации полученных результатов были использованы данные наземных радиофизических

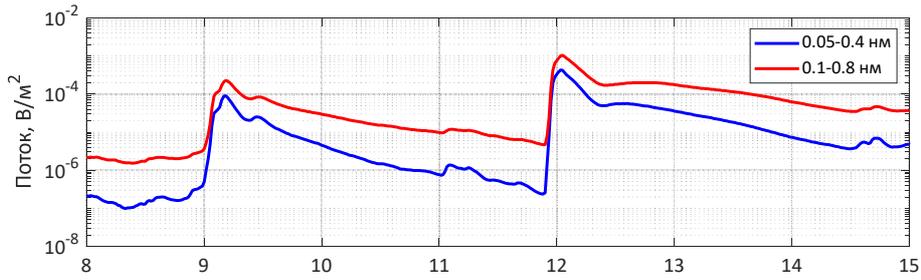


Рис. 1. Поток излучения со спутника GOES для 6 сентября 2017 г.

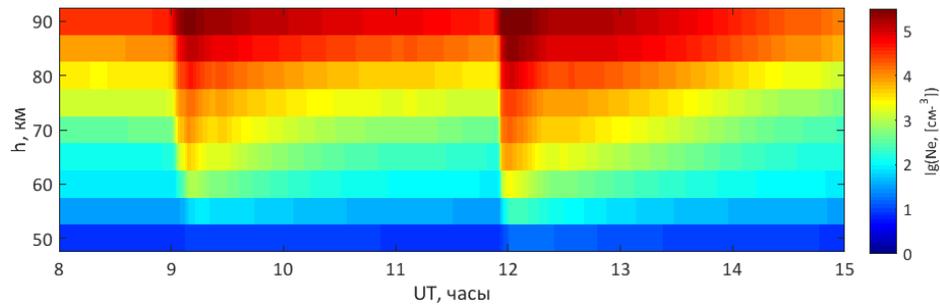


Рис. 2. Полученная динамика высотного профиля концентрации электронов и ионов во время рентгеновских вспышек 6 сентября 2017 г.

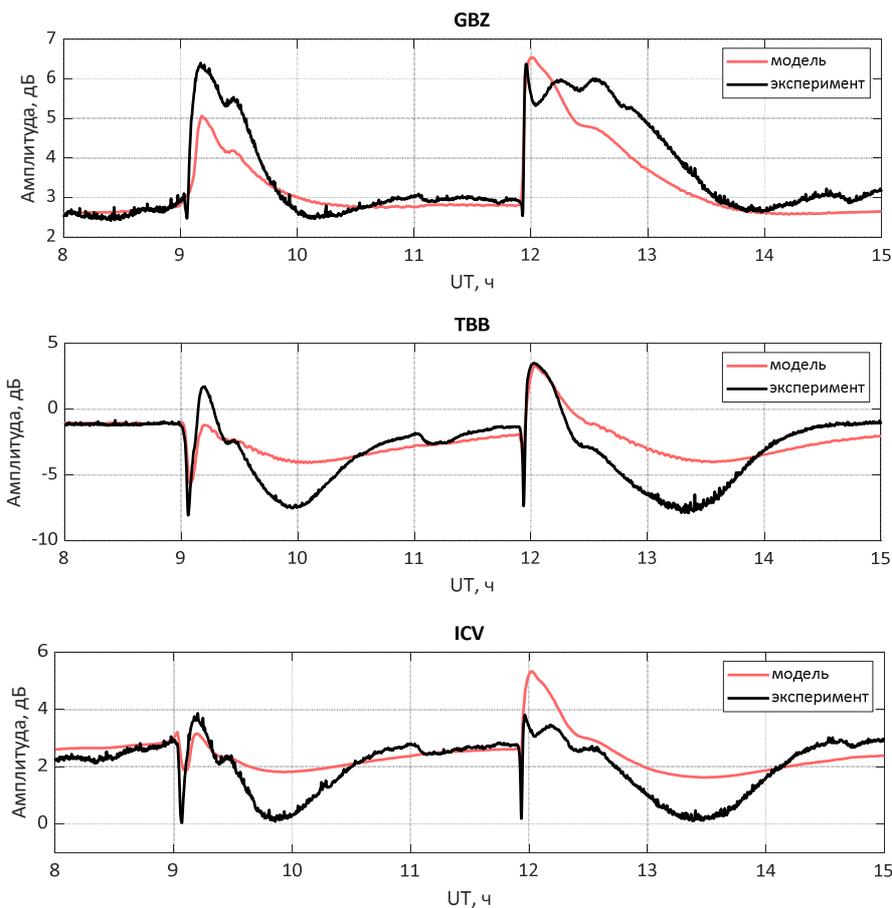


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные значения амплитуд сигналов СДВ-диапазона, полученные в ГФО Михнево с помощью передатчиков GBZ, TBB, ICV

измерений, полученные в ГФО Михнево с помощью трех европейских СДВ-передатчиков: GBZ, ICV, TBB (19.6, 20.3, 26.7 кГц соответственно). Стоит отметить, что верификация результатов возможна только ниже высоты отражения сигналов, которая

для данных частот в спокойных условиях составляет ~75 км.

Расчет амплитуды сигнала, прошедшего через смоделированную среду во время вспышек 6 сентября 2017 г., осуществлялся с использованием про-

граммы LWPC [Ferguson, 1998]. Результаты верификации показаны на рис. 3. Видно, что модель позволила качественно воспроизвести отклик параметров на вспышки X-класса на всех трех рассмотренных трассах, чего ранее не удавалось достичь с использованием более простой плазмохимической схемы ионизационно-рекомбинационного цикла даже во время более слабых рентгеновских вспышек [Bekker et al., 2021]. Стоит отметить и неплохое количественное согласие теоретических и экспериментальных кривых. В то же время, судя по полученным результатам, скорость релаксации среды является заниженной. Этот момент является предметом дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нижняя ионосфера Земли к настоящему моменту все еще является наименее изученной, поэтому исследование ее динамики как в спокойных условиях, так и под действием возмущений, остается крайне актуальным. Решение задач по моделированию отклика параметров нижней ионосферы на рентгеновские вспышки различной мощности и верификация полученных результатов необходимы для дальнейшего успешного прогноза состояния ионосферы в схожих гелиогеофизических условиях. В частности, корректное решение таких задач позволит повысить точность расчета радиофизических характеристик сигналов СДВ-диапазона, которые распространяются в волноводе Земля—ионосфера, верхней границей которого является D-область (50–90 км).

В результате данного исследования сделан вывод, что построенная плазмохимическая модель продемонстрировала неплохие прогностические способности для описания среды во время сильных возмущений и может быть использована для решения задач такого типа. Тем не менее, она требует дальнейшего уточнения, в первую очередь, в части процессов релаксации среды после сильных возмущений.

Работа выполнена в рамках Проекта РНФ № 21-77-00071.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гаврилов Б.Г., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В. и др. Геофизические эффекты солнечной вспышки 6 сентября 2017 г. *Труды XXIV международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. 2018. С. E33–E36.

Корсунская Ю.А. Эвристическая модель для восстановления рентгеновской части солнечного спектра по спутниковым данным в интересах геофизических приложений. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 89–101.

Кудрявцев В.П., Романюха Н.Ю. Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в средней атмосфере. *Математическое моделирование*. 1995. Т. 7, № 3. С. 3–18.

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 Phys.* 2021. Vol. 126, no. 2. e2020JA028767.

Ferguson J.A. Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications. Version 2.0., Technical document 3030. San Diego, CA: Space and Naval Warfare Systems Center. 1998.