Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 248–249.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-248
ORCID: 0009-0007-8383-1158

ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ АТМОСФЕРА-ИОНОСФЕРА

Д.В. Зинкин[1], В.В. Сурков[1], В.А. Пилипенко[1]

[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, zinkin.deniz@yandex.ru

EFFECT OF X-RAY AND ULTRAVIOLET RADIATION FROM SOLAR FLARES ON ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE ATMOSPHERE-IONOSPHERE SYSTEM

D.V. Zinkin[1], V.V. Surkov[1], V.A. Pilipenko[1]

[1]Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, zinkin.deniz@yandex.ru

Аннотация. В данной работе разработана теоретическая модель влияния рентгеновского и ультрафиолетового излучения от солнечных вспышек на свойства ионосферы Земли. Модель, оперируя данными со спутников SOHO и GOES, способна рассчитать скорость ионизации ионосферной плазмы, изменения концентрации электронов и проводимости нижней ионосферы. Также модель позволяет оценить вклад в изменение полного электронного содержания от рентгеновского и ультрафиолетового излучения солнечных вспышек.

Ключевые слова: солнечные вспышки, рентгеновское излучение, ультрафиолетовое излучение, ионосфера.

Abstract. In this study, we developed a theoretical model of the influence of X-ray and ultraviolet radiation from solar flares on the properties of the Earth's ionosphere. Using data from the SOHO and GOES satellites, the model is capable of calculating the ionization rate of the ionosphere plasma, changes in the electron concentration and in the conductivity of the lower ionosphere. Additionally, the model makes it possible to estimate the contribution of X-ray and ultraviolet radiation from solar flares to changes in the total electron content.

Keywords: solar flares, X-ray radiation, ultraviolet radiation, ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Значимую роль во взаимодействии Солнца и Земли играет влияние ультрафиолетового и рентгеновского излучения, возникающего во время солнечных вспышек [Лысенко А.Л. и др., 2020]. Эти потоки энергии пронизывают все уровни ионосферы и достигают даже стратосферы. Для изучения воздействия рентгеновского и ультрафиолетового излучения солнечных вспышек на ионосферу Земли были созданы упрощённые модели [Surkov, 2025], позволяющие рассчитать изменения концентраций электронов и ионов на разных высотах во время вспышек.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных для моделей использовались данные измерений ультрафиолетового излучения, полученные на борту космической станции SOHO, которая измеряет ультрафиолетовое излучение в диапазоне длин волн 26 – 34 нм. А данные измерений рентгеновского излучения были получены со спутников серии GOES, на которых установлены датчики, регистрирующие потоки мягкого рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн 0.5 – 4 Å и 1 – 8 Å. В качестве примера на рис. 1 и рис. 2 приведены запись интенсивности ультрафиолетового и рентгеновского излучения соответственно во время солнечной вспышки класса X9.0 3 октября 2024 г. На рисунках моменту времени t = 0 минут соответствует начало вспышки.

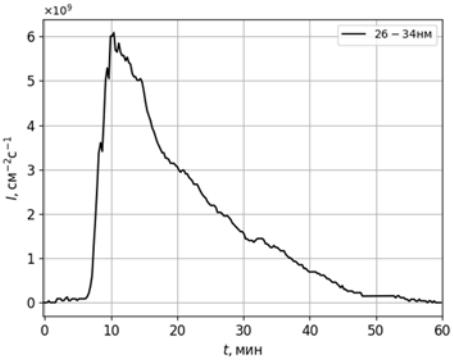

Рис. 1. Зависимость от времени плотности потока ультрафиолетового излучения за вычетом фонового значения, зарегистрированной датчиком SOHO во время солнечной вспышки класса X9.0, произошедшей 3 октября 2024 г.

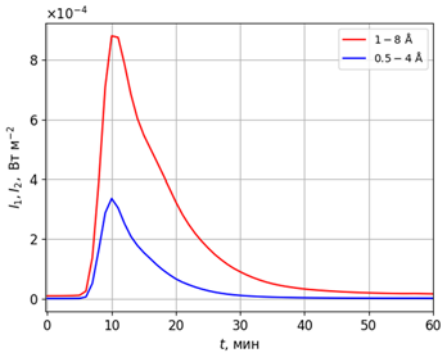

Рис. 2. Зависимость от времени интенсивности рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн, зарегистрированной датчиками GOES во время солнечной вспышки класса X9.0, произошедшей 3 октября 2024 г.

ИОНИЗАЦИЯ В ИОНОСФЕРЕ, ВЫЗВАННАЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Предположим, что потоки ультрафиолетового и рентгеновского излучения, падающие на ионосферу, широкие и плоские. Так же предположим, что распределение фотонов рентгеновского излучения по энергиям описывается формулой Планка. А плотность потока падающего ультрафиолетового излучения считается равномерно распределённой по их энергиям. Пользуясь этими упрощениями, была построена модель, с помощью которой была рассчитана скорость ионизации в ионосфере, вызванная излучением солнечной вспышки, как функция времени и высоты. Зная скорость ионизации и решая систему дифференциальных уравнений, рассчитываем изменение числа электронов и ионов в течении солнечной вспышки в зависимости от высоты и времени. Это в свою очередь позволяет рассчитать изменения в проводимости (рис. 3) и полном электронном содержании (рис. 4) ионосферы.

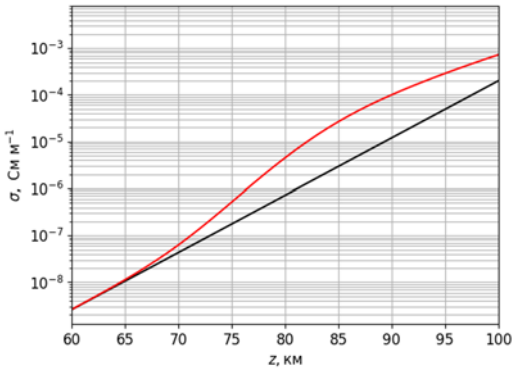

Рис. 3. Зависимость проводимости воздуха от высоты в ионосфере для вспышки класса X9.0, произошедшей 3 октября 2024 г. Чёрной линией показан высотный профиль невозмущённой проводимости. Красной линией показана проводимость в момент времени t = 10 мин после начала вспышки, когда рентгеновское излучение было максимальным.

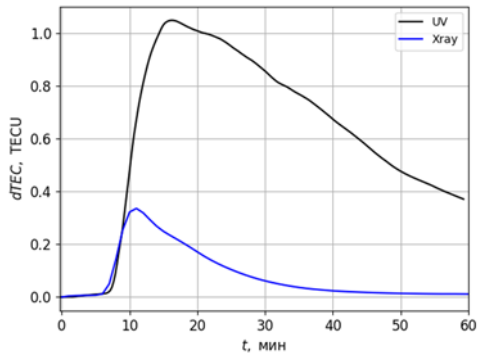

Рис. 4. Изменение полного электронного содержания согласно модели, вызванное рентгеновским и ультрафиолетовым излучением солнечной вспышкой класса X9.0, произошедшей 3 октября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе модель позволяет объяснить и рассчитать влияние излучения солнечной вспышки на параметры ионосферы Земли. Рассчитанное в модели изменение электропроводности D-слоя позволяет в принципе оценить изменения свойств волновода Земля и ионосфера, влияющие на распространение СДВ и глобальные низкочастотные электромагнитные резонансы. В частности, модель позволяет связать изменение амплитуды и фазы СДВ на длинных радиотрассах и изменение частот шумановских резонансов, вызванных воздействием рентгеновского излучения, с классом солнечной вспышки. Важным результатом является возможность рассчитать теоретическое изменение в полном электронном содержании под действием как рентгеновского, так и ультрафиолетового излучения солнечной вспышки. Согласно модели, электронное содержание плавно возрастает и достигает максимума спустя несколько минут после максимума излучения солнечной вспышки. Для рассмотренного примера солнечной вспышкой класса X9.0, произошедшей 3 октября 2024 г, получаются максимальные значения изменения полного электронного содержания под действием ультрафиолетового излучения приблизительно 1.05 TECU, под действием рентгена – 0.34 TECU. Эффект от ультрафиолета оказывается приблизительно в три раза сильнее чем от рентгеновского излучения. Таким образом построенные модели показывают, что максимальный вклад в изменение полного электронного содержания вносит ультрафиолетовое излучение, что наблюдается на практике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РНФ 25-27-00539.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лысенко А.Л. и др. Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 8. – С. 878-894.

Surkov V.V. The effect of X-ray radiation from a solar flare on the frequencies of Schumann resonances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2025. V. 271. 106537. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106537.