

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОВОЛН КВ-ДИАПАЗОНА В ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК

Д.Д. Рогов

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия  
rogovdenis@mail.ru

## EMPIRICAL MODEL OF IONOSPHERIC ABSORPTION OF HF RADIO WAVES DUE TO SOLAR X-RAY FLARES

D.D. Rogov

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia  
rogovdenis@mail.ru

**Аннотация.** В периоды солнечных рентгеновских вспышек наблюдается резкое увеличение скорости ионообразования на высотах области  $D$  и нижней части области  $E$  ионосферы. Этот эффект оказывает заметное влияние на распространение радиоволн в районах освещенной ионосферы, вызывая их затухание. Предложена простая эмпирическая модель для расчета величины данного поглощения. Показано удовлетворительное соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** солнечная рентгеновская вспышка, риометр, модель поглощения.

**Abstract.** During solar X-ray flares, a sharp increase in the ion formation rate at the ionospheric D-region and the E-region lower part altitudes is observed. This effect has a significant impact on radio wave propagation at the illuminated ionosphere, causing attenuation. A simple empirical model for calculating this absorption was proposed. Satisfactory correspondence of modeling results with experimental data is shown.

**Keywords:** solar X-ray flare, riometer, absorption model.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной причиной ионизации атмосферы является ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца. Вторым по значимости фактором ионизации являются корпускулярные потоки, высыпающиеся из магнитосферы Земли, также в основном солнечного происхождения.

Основные крупномасштабные возмущения ионосферы, связаны с солнечными вспышками и резкими изменениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также с геомагнитными возмущениями.

Поскольку в периоды солнечных вспышек наибольшее усиление излучения (в десятки и сотни раз) имеет место в рентгеновском диапазоне, то прямым следствием такого усиления является соответствующее увеличение скорости ионообразования на высотах области  $D$  и нижней части области  $E$ , а, следовательно, резкое увеличение электронной концентрации (до порядка величины) и появления затухания КВ-радиоволн из-за поглощения в  $D$ -области (внезапное ионосферное возмущение, ВИВ). На высотах областей  $E$  и  $F$ , где ионизация обусловлена преимущественно ультрафиолетовым излучением, сравнительно мало возрастающим (в лучшем случае на десятки процентов) в периоды вспышек, относительные эффекты в электронной концентрации соответственно меньше. Поскольку в различных спектральных участках интенсивность вспышки изменяется со временем по-разному (ультрафиолетовая часть возмущается на относительно короткое время (~15 мин) по сравнению с общим временем вспышки, а рентгеновская остается увеличенной в течение всей вспышки (~1 ч)), то и ВИВ на разных высотах имеют разную длительность: максимальную в  $D$ -области и мини-

мальную в  $F$ -области. [Брюнелли, Намгаладзе, 1988] Таким образом, ВИВ оказывают заметное влияние на РРВ в районах освещенной ионосферы (в том числе и высокоширотной), однако это влияние не продолжительно.

### ПРИМЕР РЕГИСТРАЦИИ ВСПЫШЕК НА РАЗЛИЧНЫХ РИОМЕТРИЧЕСКИХ ЦЕПОЧКАХ

На рис. 1 приведен пример регистрации двух солнечных рентгеновских вспышек по данным финской и канадской риометрических цепочек. В верхней части каждого рисунка показан поток солнечного рентгена, измеренный спутником GOES, а на нижних панелях — вариации зенитного угла солнца для каждой станции. Видно, что время обеих вспышек позволило их зарегистрировать на обеих цепочках риометров. Также эти же вспышки отметились на данных риометров российской арктической сети наблюдений (данные не приводятся), и отсутствуют на риометрах российской антарктической сети (из-за условий полярной ночи в том регионе).

### SWPC МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО СОЛНЕЧНЫМИ РЕНТГЕНОВСКИМИ ВСПЫШКАМИ

Поглощение в полярных регионах во время событий солнечных вспышек может быть рассчитано по простому эмпирическому алгоритму, представленным на сайте американского Space Weather Prediction Centre и предложенным в [Stonehocker, 1970; <http://www.swpc.noaa.gov>]. Данная модель на качественном уровне удовлетворительно описывает влияние вспышки на ионизацию нижней ионосферы. Однако расчеты, полученные с использованием этой

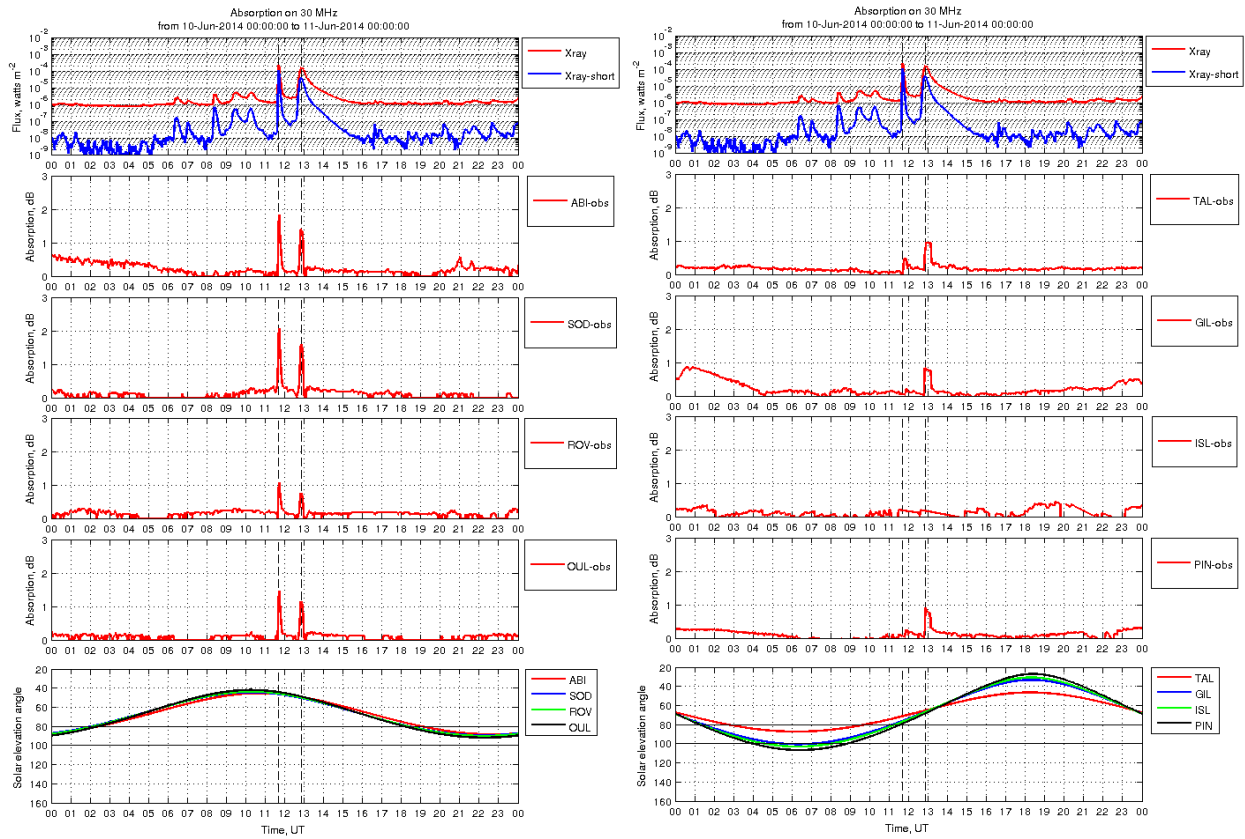


Рис. 1. Поглощение, вызванное двумя солнечными рентгеновскими вспышками 10 июня 2014 г., по данным финской и канадской риометрических цепочек

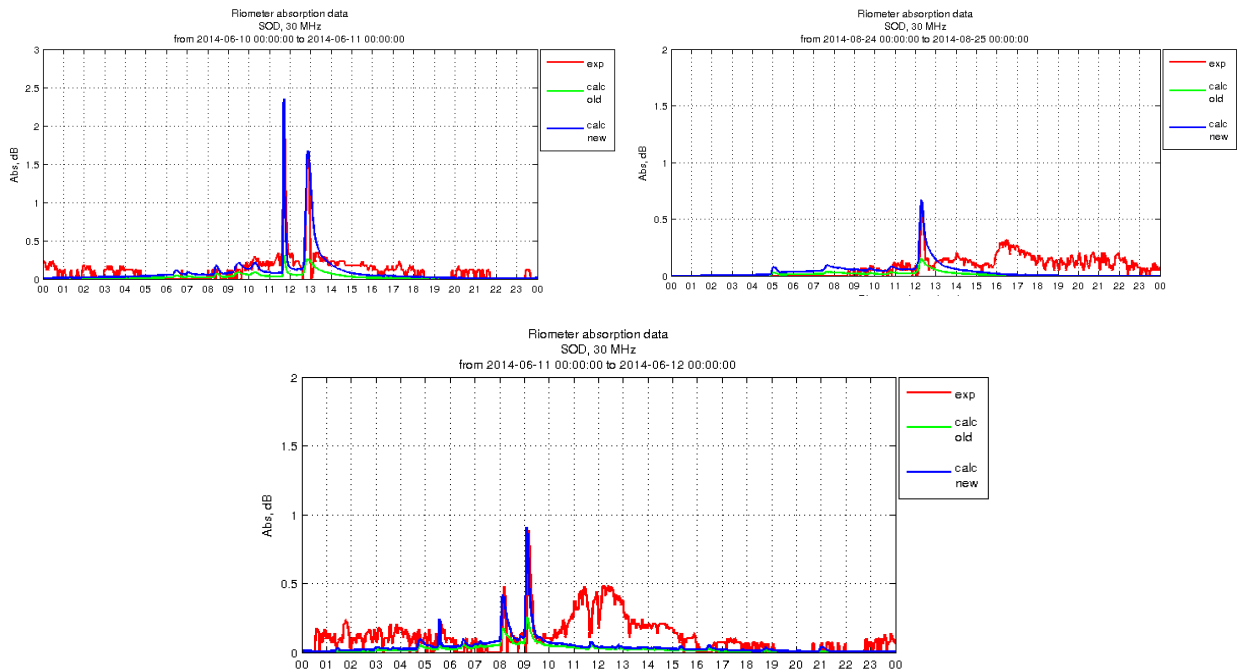


Рис. 2. Экспериментальное и модельное значения риометрического поглощения в Соданкюле, Финляндия

этой модели, дают заниженные значения поглощения относительно экспериментально наблюдаемых [Rogov et al., 2015].

### НОВАЯ ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕНТГЕНОВСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Для более точного описания реакции нижней ионосферы на солнечные вспышки разработана но-

вая эмпирическая модель поглощения. Предложенные эмпирические зависимости выведены на основе статистической обработки экспериментальных данных, полученных с помощью риометров российской (арктической и антарктической), канадской и финской цепочек в период с 1998 по 2015 г. За указанный временной интервал было зарегистрировано более 2000 солнечных рентгеновских вспышек вы-

сокой интенсивности (М- и Х-классов), что позволило выявить особенности проявления данного эффекта в различных ионосферных условиях.

На примере нескольких солнечных рентгеновских вспышек (10 июня 2014 г, 24 августа 2014 г. и 11 июня 2014 г.) по данным риометра, расположенного в обсерватории Соданкюла (Финляндия), приведены результаты (рис. 2) модельных расчетов по SWPC модели (зеленая кривая) и новой модели (синяя кривая). Видно хорошее соответствие поглощения, рассчитанное по новой модели с экспериментально наблюдаемыми величинами.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработана простая эмпирическая модель ионосферного поглощения КВ-радиоволн в период солнечных рентгеновских вспышек. Коэффициенты зависимости поглощения и потока солнечного излучения в рентгеновском диапазоне подобраны по экспериментальным риометрическим данным. Показано хорошее соответствие результатов расчета и экспериментальных данных.

Новая модель позволит более точно рассчитать интенсивность поглощения, вызванного солнечными рентгеновскими вспышками, в любой интересующей точке, что имеет большую практическую ценность для прогнозирования условий распространения радиоволн КВ-диапазона.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
- Rogov D.D., Moskaleva E.V., Zaalov N.Y. Modeling of high frequency radio wave absorption on oblique soundings during a solar X-ray flare // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 597–604.
- Stonehocker G.H. Advanced telecommunication forecasting technique in AGY // 5<sup>th</sup>. Ionospheric forecasting, AGARD Conf. Proc. 1970. V. 29. P. 27–31.
- URL: <http://www.swpc.noaa.gov>.
- URL: <http://www.sgo.fi>.
- URL: [http://data.phys.ucalgary.ca/sort\\_by\\_project/NORSTAR](http://data.phys.ucalgary.ca/sort_by_project/NORSTAR).