

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.030

РИОМЕТРИЧЕСКАЯ ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ КВ РАДИОВОЛН ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК

Д.Д. Рогов

*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «АНИИ»),
г. Санкт-Петербург; e-mail: rogovdenis@mail.ru*

Аннотация

Для расчета поглощения в нижней ионосфере Земли в период солнечных рентгеновских вспышек предложена простая эмпирическая модель. Был проведен статистический анализ переобработанных экспериментальных данных, полученных с помощью сети канадских риометров в период с 1989 по 2019 годы. В течение этого интервала времени было зарегистрировано более 3800 высокоинтенсивных солнечных рентгеновских вспышек (М- и X-классов), что позволило выявить особенности этого эффекта в различных ионосферных условиях. Показано хорошее соответствие результатов моделирования и экспериментальных данных.

Введение

В освещенной нижней ионосфере Земли в период рентгеновских вспышек на Солнце наблюдается резкий рост ионизации, что приводит к значительному ослаблению сигналов КВ диапазона. Это сказывается как на экспериментальных средствах диагностики ионосферы, так и на всех других радиосистемах (связь, загоризонтная радиолокация). 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 – эффект Внезапного Ионосферного Возмущения (ВИВ) [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. В работе [Рогов, 2019] была предложена модель поглощения, вызванного солнечными рентгеновскими вспышками на основе анализа экспериментальных данных канадских риометров за период с 1998 по 2015 гг. (около 2000 вспышек М- и X-классов). Было продолжено уточнение предложенной модели за счёт расширения статистики экспериментальных данных: вместо 17 лет наблюдений, используемых ранее [Рогов, 2019], теперь рассматриваем 30 лет (с 1989 по 2019 гг.), количество событий увеличилось с 2000 до 3800. Распределение за период с 1989 по 2019 гг. количества вспышек М- и X-классов по годам показано на рисунке 1.

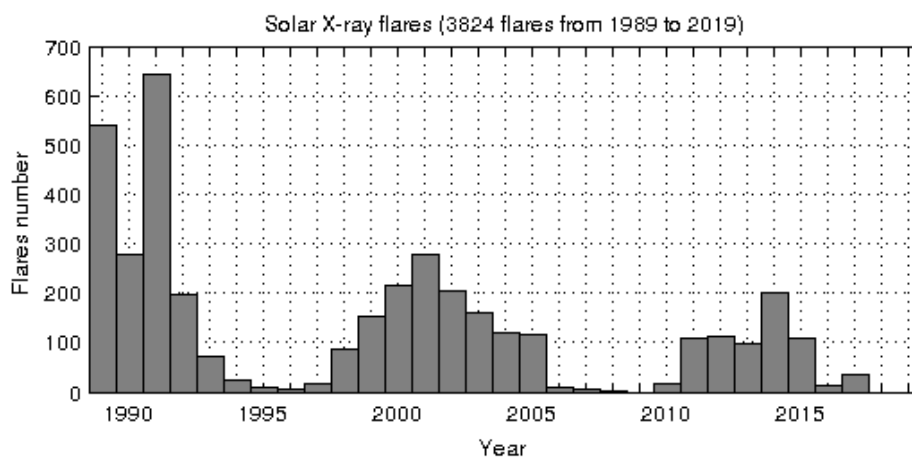


Рисунок 1. Солнечные рентгеновские вспышки М- и X-классов за период с 1989 по 2019 гг.

Пример регистрации вспышек по данным риометров

На рисунке 2 приведен пример регистрации двух солнечных рентгеновских вспышек по данным финской и российской (арктической) риометрических цепочек. В верхней части каждого рисунка показан поток солнечного рентгеновского излучения, измеренный спутником GOES, а на нижних панелях – вариации зенитного угла солнца для каждой станции. Видно, что интенсивность проявления рентгеновской вспышки сильно зависит от солнечного зенитного угла (хорошо заметно, что на станции Тикси (71.6°N, 129.0°E) проявление эффекта минимально, плюс накладывается на эффект аврорального поглощения).

SWPC модель поглощения

Поглощение в полярных регионах во время событий солнечных вспышек может быть рассчитано по простым эмпирическим алгоритмам, 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 модели, дают заниженные значения поглощения относительно экспериментально наблюдаемых [Rogov et al., 2015].

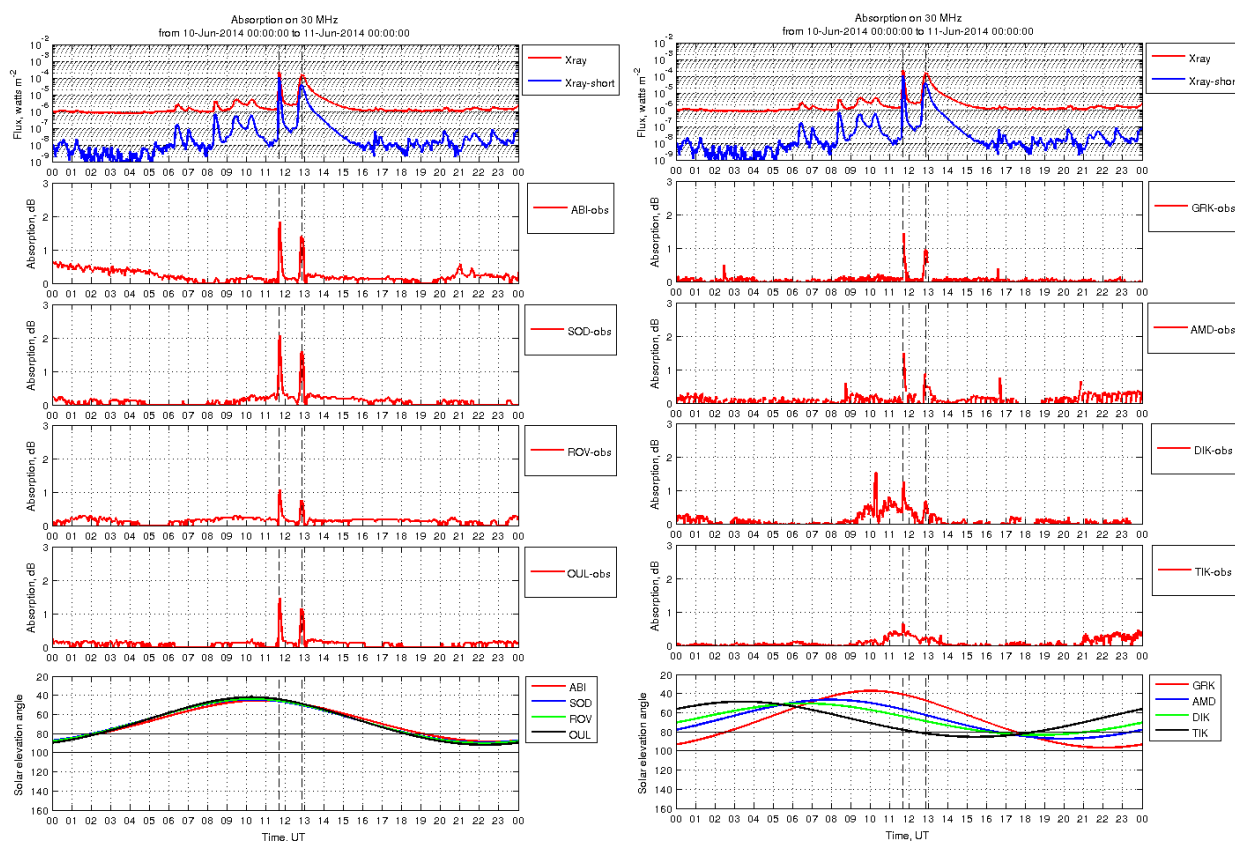


Рисунок 2. Поглощение, вызванное двумя солнечными рентгеновскими вспышками 10 июня 2014 г., по данным финской и российской риометрических цепочек. Экспериментальные данные.

Переобработка риометрических данных

Ввиду того, что значения поглощения в период рентгеновских вспышек средней интенсивности имеют на частоте 30 МГц относительно малую амплитуду поглощения, то для сбора надежной статистики для разработки модели было крайне необходимо провести переобработку экспериментальных данных. На рисунке 3 показан пример данной переобработки для канадской станции CHU в период с 3 по 6 июня 1989 г. На верхней панели красным цветом показан суточный ход уровня записи риометра. На нижней панели тем же красным цветом показан ход поглощения, рассчитанный в автоматическом режиме (без проверок). Здесь хорошо заметны ежесуточные всплески поглощения, которые являются следствием ошибок в построении кривой спокойного дня (невозмущенного уровня, от которого отсчитывается поглощение в данный момент

времени). Переобработка заключалась в индивидуальном рассмотрении каждого события и новом построении кривой спокойного дня. Результат этой работы показан на рисунке 3 синим цветом: на верхней панели это новая кривая спокойного дня (видно хорошее согласие с экспериментальным уровнем), а на нижнем – это новое поглощение. Но временной оси каждой панели черными прямоугольниками отмечены моменты рентгеновских вспышек (по данным GOES) - видно, насколько улучшились данные поглощения в эти периоды (сравнение красной и синей кривой на нижней панели).

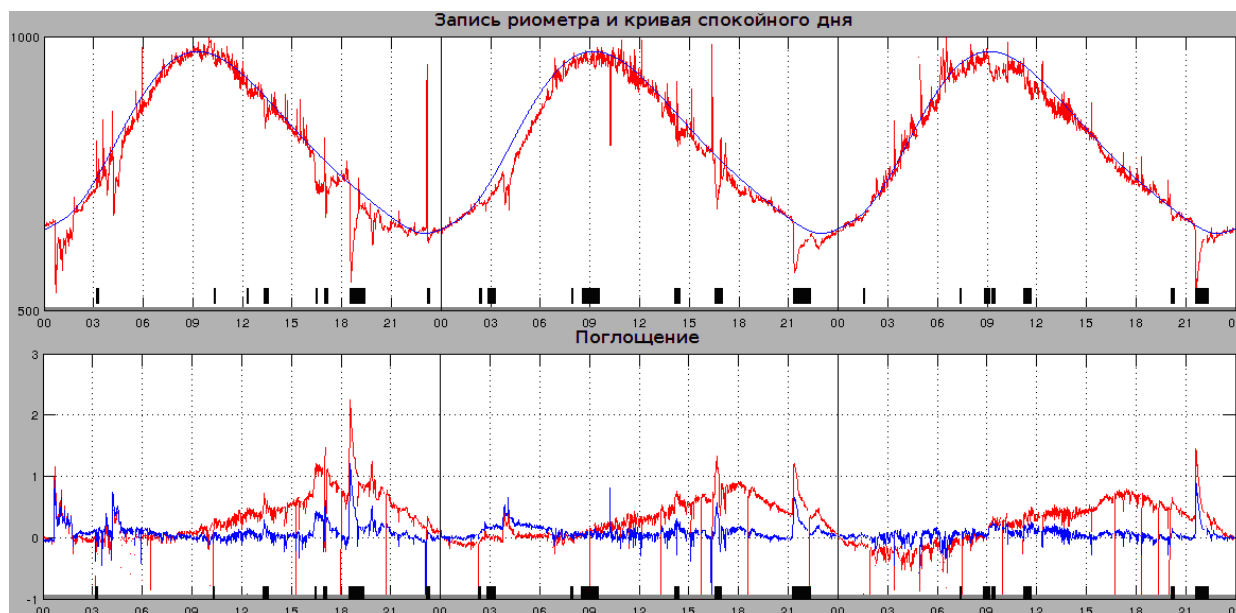


Рисунок 3. Пример переобработки экспериментальных данных.

Результат модели

В данный момент модель продолжает уточняться (не весь массив ещё обработан, плюс планируется дополнить данные других риометрических сетей (финской и российской) по отдельным событиям). Предварительные результаты приведены на рисунках 4 и 5. На рисунке 4 показан ход экспериментальной регистрации поглощения на финской станции Соданкюля 10 июня 2014 г. (это событие уже рассматривали ранее – рисунок 2) – красный цвет. Зеленым цветом показан расчет поглощения по данным модели SWPC, а синим – новой модели, предложенной в данной работе.

На рисунке 5 показано сравнение экспериментальных данных поглощения и рассчитанных по новой модели (по результатам обработки около 3000 событий). Видно хорошее согласие с экспериментальными данными – коэффициент корреляции 0.93.

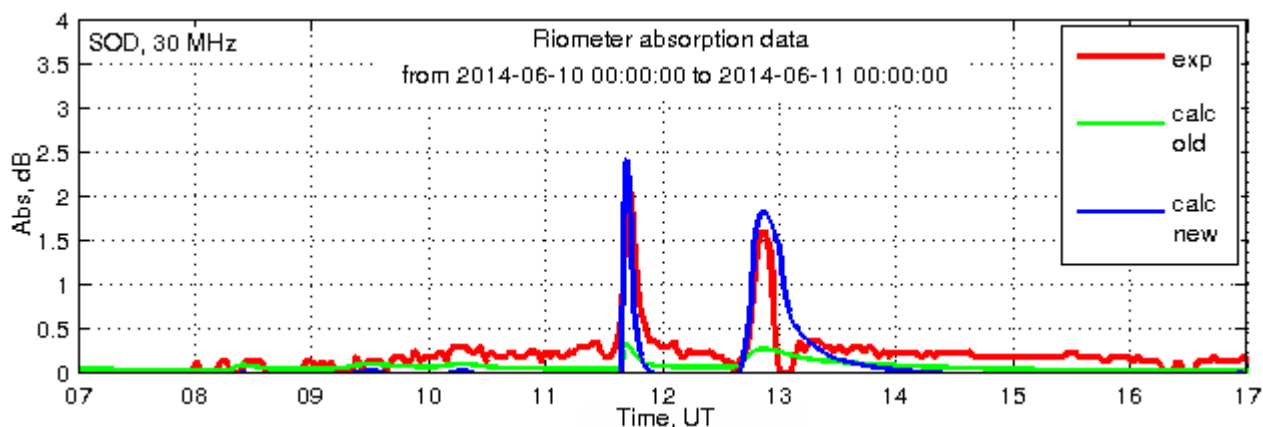


Рисунок 4. Поглощения по данным финской станции Соданкюля 10 июня 2014 г. (эксперимент и модельные расчеты).

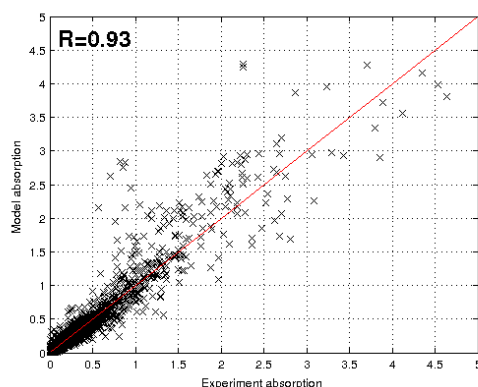


Рисунок 5. Сравнение экспериментальных данных поглощения и рассчитанных по новой модели.

Заключение

Разработана новая простая эмпирическая модель ионосферного поглощения КВ радиоволн в период солнечных рентгеновских вспышек. Коэффициенты зависимости поглощения и потока солнечного излучения в рентгеновском диапазоне подобраны по большому массиву обработанных экспериментальных риометрических данных. Показано хорошее соответствие экспериментальных данных поглощения с результатами расчета.

Благодарности. Авторы выражают благодарность зарубежным коллегам за доступ к данным канадских и финских риометров, а также к данным спутников GOES.

Литература

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 // *Advances in Space Research*. 2015. V. 55, P. 597-604.

Stonehocker G.H. Advanced telecommunication forecasting technique // In AGY, 5th, Ionospheric forecasting, AGARD Conf. Proc., No. 29, 1970, P. 27-31.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988.

Рогов Д.Д. Эмпирическая модель поглощения радиоволн КВ-диапазона в ионосфере в период солнечных рентгеновских вспышек // Сборник трудов XVI конференции молодых ученых “Взаимодействие полей и излучения с веществом”, г. Иркутск, 2019, С. 201-203.

<http://www.swpc.noaa.gov/>

<http://www.sgo.fi/>

http://data.phys.ucalgary.ca/sort_by_project/NORSTAR/