

Polar Geophysical Institute

# ПОГЛОЩЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН В НАГРЕТОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

А.Б. Пашин, А.А. Мочалов (Полярный геофизический институт КНЦ РАН)

## Введение

В нижней ионосфере частота столкновений электронов с нейтральными частицами достаточно высока для того, чтобы значительная часть энергии высокочастотной электромагнитной волны (ВЧ переходила тепловую волны) в энергию нейтрального газа, т.е., чтобы происходило Измерения поглощение волны. поглощения радиоволн для диагностики используется главным образом, ее D-области. ионосферы, Радиофизические методы, основанные на радиоволн. измерении поглощения носят преимущественно качественный характер, так как регистрируется величина поглощения, проинтегрированная вдоль всей траектории распространения излучения [Дэвис, 1973]. B отдельных случаях удается найти эмпирическую связь величины поглощения и энергетического спектра высыпающихся частиц, по которому рассчитывается высотный профиль электронной концентрации [Collis и др. 1984; Власков и др., 1990]. Поглощение ВЧ волны зависит не только от электронной плотности концентрации И нейтральных частиц; существенное влияние на его величину оказывает электронная температура. Естественные вариации температуры электронов не столь значительны и, обычно, не принимаются во внимание при интерпретации измерений поглощения. При проведении активных по модификации ионосферы экспериментов мощным наземным КВ передатчиком этот параметр изменяется на порядок величины, и изменения поглощения, связанные с возмущениями могут быть использованы для температуры. получения дополнительной информации как о параметрах нижней ионосферы, так и о величине искусственного возмущения. Последнее особенно важно потому, что до настоящего времени не существует методов измерения возмущенной электронной температуры, и наши представления о ее величинах основаны на теоретических работах [Гуревич и Шварцбург, 1973] и результатах численного моделирования [Rietveld et al., 1986; Belova et al., 1995]. Численное моделирование дополнительного поглощения, вызванного изменениями электронной температуры при их нагреве, показало, что при наличии развитой Dобласти мощность ВЧ волны уменьшится на величину порядка 0.5 дБ, а для ионосферы с низкой электронной плотностью этот эффект не превышает 0.2 дБ [Пашин и др., 2003, Enell et al., 2005].

## Измерение дополнительного поглощения

Попытка экспериментально зарегистрировать добавочное поглощение ВЧ волн искусственно нагретой областью ионосферы проводилась на установке, регистрирующей вариации космического радиошума, - панорамном риометре IRIS [Kero, 2007]. Метод риометрического поглощения детально описан в [Дриацкий, 1974], использование фазированного массива приемников изучать поглощение радиоволн, позволяет приходящих с различных направлений [Detrick and Rosenberg, 1990]. Риометр IRIS регистрирует космический радиошум в 49 узких лучах, причем девятый луч направлен в область ионосферы над нагревным передатчиком Тромсе и на высоте 90 км имеет сечение примерно такое же, как и луч нагревного передатчика. Увеличение поглощения, связанное с увеличением температуры электронов, установкой, вызванного нагревной было зарегистрировано при статистической обработке данных по поглощению, однако его величина оказалась во много раз меньше ожидаемой [Kero, 2007]. Объяснения того, что наблюдаемый эффект оказался на порядок меньше рассчитанного, дано не было. Вариации поглощения, полученные в нагревных экспериментах на стенде HAARP на Аляске, находится в согласии с расчетами, что позволяет оценить величину возмущения температуры электронов [Безродный и др., 2010]. В цитируемой работе использовался целый ряд предположений, что позволило упрощающих обойтись без численных расчетов для определения возмущенной электронной температуры. Считалось, что поглощение ВЧ волн происходит в небольшом интервале высот, и параметры слоя: его толшина. высота. электронная плотность. невозмущенная частота столкновений, - в его пределах слабо зависят от времени и воздействия нагревного передатчика. Такой подход приводит к тому, что величина дополнительного поглощения не зависит от электронной плотности и линейно зависит ОТ величины возмущения частоты столкновений. Были проведены опенки возмущений электронной температуры для двух нагревных экспериментов 21.02.2008 и 30.10.2008. Особенностью данной работы является также то, что поглощение регистрировалось для дискретных источников космического радиошума. Обычно интервалы регистрации радиошума от мощных дискретных источников исключаются ИЗ рассмотрения из-за мерцаний (сцинтилляций) сигнала. вызываемых ионосферными неоднородностями. Требуется достаточно продолжительный интервал наблюдения, чтобы

определить поглощение, усреднив по времени его значения за весь интервал. Для события 23.10-24.00 UT 21.02.2008 средняя величина добавочного поглощения волны частотой 38 МГц составила 0.312 дБ, что согласуется с результатами расчетов [Пашин и др., 2003]. Нагрев происходил импульсами длительностью 5 минут, пауза между импульсами составляла 5 минут, использовалась волна накачки частотой 3.3 МГц обыкновенной поляризации, направленная вертикально. B 01.18-02.03 UT 30.10.2008 луч эксперименте нагревного передатчика был отклонен от зенита на 26 градусов, частота и поляризация волны накачки были такими же, как в эксперименте 21.02.2008. Длительность нагревного импульса – 9 минут, пауза – 6 минут. Величина дополнительного зарегистрированная поглощения, в этом эксперименте значительно меньше, что, по мнению авторов, связано с отклонением луча мощного передатчика от направления магнитного поля, и, как следствие, менее эффективному нагреву электронов. Расчеты, однако, не подтверждают эту интерпретацию; значительного эффекта при таком отклонении нагревного луча от направления магнитного поля возникнуть не может [Belova et al., 1995; Pashin et al., 1995]. Отметим, что эксперимент 21.02.2008 проходил в вечернее время в условиях уменьшения зенитного угла Солнца, а во время эксперимента 30.10.2008 Солнце зашло за горизонт. Уменьшение поглощения 21.02.2008 может быть связано с уменьшением электронной плотности, а не с величиной возмущения электронной температуры. Малая величина поглощения 30.10.2008. соответствии с численным в моделированием [Пашин и др., 2003], также может быть объяснена значительно меньшей величиной электронной концентрации по сравнению с экспериментом 21.02.2008.

#### Численное моделирование поглощения

Экспериментальное обнаружение дополнительного поглощения, величина которого согласуется с моделирования, результатами численного подтверждает возможность использования измерений поглощения ВЧ волн для определения возмущенной температуры электронов. Для организации новых экспериментов, имеющих целью диагностику параметров нижней ионосферы нагрева, необходимо провести в условиях дополнительные расчеты для различных ионосферных условий и параметров нагревной волны, определяющих поглощение ВЧ волны. Численное моделирование поглощения будет проводиться для нескольких частот, что может разделить вклад в дополнительное поглощение параметров: электронной плотности двух температуры.

Физические процессы, происходящие в нижней ионосфере при нагреве электронов мощной КВ радиоволной, и методы расчетов возмущенных

параметров описаны в [Belova et al., 1995; Pashin et al., 1995].



Рис.1. Семейство профилей электронной плотности, использованных для расчетов, и рассчитанные профили возмущенной электронной температуры о-моды нагревной волны частотой 3 МГц.

Кратко опишем алгоритм расчетов возмущенной электронной температуры. Излучение мощного наземного передатчика при превышении порогового значения мошности некоторого способно изменить параметры нижней ионосферы: температуру электронов, частоту их столкновений с нейтральными частицами, проводимость ионосферы. На ионосферу, разделенную на тонкие - толщиной 0.5 км - однородные слои, действует мощный наземный КВ передатчик. В каждом слое электромагнитная волна частично поглощается, что при превышении энергией волны некоторой к росту величины приводит температуры электронов, частоты столкновений ИХ С нейтральными частицами И коэффициенту поглощения волны. Таким образом, поглощение мощной волны представляет собой процесс с положительной обратной связью, причем температура электронов принимает значение соответствующее тепловому балансу между поглощаемой энергией и потерями, вызванными неупругими столкновениями и и и и и с нейтральными частицами. Решение уравнение теплового баланса в каждом слое дает значение возмущенной температуры электронов и величину энергии волны, потерянную в нем. Расчеты поглощения волн малой мощности, падающих на ионосферу сверху, также проводятся в однородных

ионосферных слоях, как для невозмущенной, так и для модифицированной ионосферы. Отличительной особенностью волны малой мощности является то, что она не меняет параметры ионосферы.

На рисунке 1 показаны профили электронной плотности И возмущения температуры, создаваемые в ионосфере нагревной волной обыкновенной поляризации с эффективной мощностью 300 МВт и частотой 3 МГц. Профили концентрации имеют два параметра – электронную плотность на высоте 90 км, выше которой концентрация не меняется, и масштаб спадания концентрации ниже 90 км – расстояние на котором концентрация спадает в е раз. В верхней левой части рисунка показаны профили, для которых электронная плотность выше 90 км составила 10<sup>3</sup> электронов в кубическом сантиметре, а масштаб спадания – 2, 3, и 4 км<sup>-1</sup>.



Рис.2. Величины интегрального дополнительного поглощения на частотах 25, 30, 35 и 40 МГц в зависимости от обратной величины квадрата частоты для ионосферы с различным содержанием электронов, нагретых волной обыкновенной поляризации частотой 3 МГц.

Бедные заряженными частицами профили соответствуют зимней и ночной ионосфере при невысокой магнитной активности. В подобных условиях нагревная волна очень эффективно изменяет температуру электронов в широком диапазоне высот. Соответствующие профили возмущенной электронной температуры приведены на верхней правой диаграмме рисунка 1, а дополнительное поглощение ВЧ волн на частотах 25, 30, 35, 40 МГц показаны на рисунке 2 треугольниками, тип соответствующего профиля обозначен линией, соединяющей рассчитанные значения. Разрешение линий не очень хорошее, что связано с близким значениями возмущенной электронной температуры и электронной плотности вблизи высоты 90 км, на которой располагается максимум добавочного поглощения. Отметим также, что подобные условия, несмотря на значительный рост температуры электронов, оказываются малоэффективными для возмущения

ионосферной проводимости [Pashin et al., 1995]. В средней части рисунка показаны профили плотности (слева) и возмущенная температура (справа) электронов для концентрации электронов выше 90 км равной  $10^4$  см<sup>-3</sup> и масштабе ее спадания - 2, 3, и 4 км<sup>-1</sup>. Такие профили характерны для периода равноденствия в условиях умеренной магнитной возмущенности. Температура электронов для этих профилей имеет ярко выраженный максимум, располагающийся в диапазоне высот 80 - 85 км. В отличие от случаев низкой концентрации электронов, большая часть энергии волны накачки теряется в нижней ионосфере, до высоты 90 км, а выше - возмущения температуры незначительны. Для этих профилей поглошение на рисунке 2 показано ромбиками. тип линии, их соединяющий, соответствует типу линии профиля плотности. Спектрах поглошения значительно различаются, в отличии от профилей с маленькой плотностью электронов. В нижней части рис. 1 слева приведены профили с плотностью в верхей части профиля 10<sup>5</sup> см<sup>-3</sup>, масштабы спадания такие же, как в 2-х предыдущих случаях. Рост температуры электронов при нагреве таких профилей мощной радиоволной происходит только в нижней ионосфере, выше 90 км их температура остается невозмущенной. Интегральное добавочное поглощение для этих условий показано на рисунке 2 справа прямоугольниками так же, как и ранее. Влияние увеличения частоты волны накачки обыкновенной поляризации показано на рисунке 3. Расчеты проводились для нагревной волны частотой 5 МГц.



Рис.3. Величины интегрального дополнительного поглощения на частотах 25, 30, 35 и 40 МГц в зависимости от обратной величины квадрата частоты для ионосферы с различным содержанием электронов, нагретых волной обыкновенной поляризации частотой 5 МГц.

Такое увеличение частоты приводит к уменьшению энергии волны, отдаваемой электронам, температура электронов в максимуме имеет меньшие значения, но энергия равномернее распределяется по высоте. При таких параметрах волны накачки удается избежать перекрытия спектров поглощения для профилей из различных семейств, однако разрешение для профилей с наибольшей электронной плотностью ухудшается. Отметим, что для эффективного возмущения ионосферной проводимости для профилей с большой концентрацией электронов целесообразно увеличивать частоту волны накачки и использовать для нагрева волну обыкновенной поляризации [Pashin et al. 1995].

## Выводы

Расчетов поглощения нагретой областью высокочастотных волн позволяют усовершенствовать метод диагностики модифицированной области [Пашин и др., 2003; Enell et al., 2005; Безродный и др., 2010]. Вместо измерения поглощения на фиксированной частоте предлагается использовать спектр поглощения в диапазоне частот 25 – 40 МГц, что позволит надежность измерений повысить И ИХ интерпретации, исключив случайные флуктуации сигнала. В экспериментах по нагреву для того, чтобы избежать влияния вариаций электронной плотности, целесообразно использовать короткие длительностью около секунды – прямоугольные импульсы нагревного передатчика. Для нагрева ионосферных электронов предпочтительнее использовать о-моду волны накачки с частотой около 3 МГц. Такие параметры нагревной волны различие обеспечивают большее спектров поглощения ВЧ волн в ионосфере в различных геофизических условиях. Поглощение ВЧ волн необходимо измерять в течение цикла ВКЛ/ВЫКЛ несколько раз и в отсутствии нагрева, и при воздействии волной накачки. Определяются параметры линейной зависимости интегрального добавочного поглощения от квадрата обратной частоты ВЧ волны, которая, как правило, исключением соблюдается. за случаев экстремально больших концентраций электронов в нижней ионосфере. По массиву рассчитанных угловых коэффициентов выбирается профиль электронной плотности И возмущенной температуры электронов, а если выбор профиля неоднозначный, то привлекается спектр фонового поглощения. Таким образом, решение прямой задачи должно содержать набор рассчитанных невозмущенной и спектров поглощения для фиксированных нагретой ионосферы ЛЛЯ параметров волны накачки.

Работа выполнена в рамках программ президиума РАН № 22 и 4.

## Список литературы

- Безродный, В.Г., О.В. Чаркина, Ю.М. Ямпольский, Б. Воткинс, К. Гровс (2010), Исследование стимулированных ионосферных мерцаний и поглощения излучения дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // Радиофизика и радиоастрономия. T.15, №2. C.151-163, 2010.
- Власков В.А., Осепян А.П., Чурикова Т.В., Турунен Е. Электронная концентрация в авроральной зоне. Эксперимент и модель. // Геомагнетизм и аэрономия, Т.30, №1, С.143-146, 1990.
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.

Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973.

- Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гдрометеоиздат, 1974.
- Пашин, А.Б., Котиков А.Л., Пудовкин М.И. Численное моделирование аврорального поглощения в искусственно возмущенной ионосфере. // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 43, с. 59-62, 2003.
- Belova E.G., Pashin A.B., Lyatsky W.B. Passage of a powerful HF radio wave through the lower ionosphere as a function of initial electron density profiles // J. Atmos. Terr. Phys., V. 57, P. 265-272, 1995.
- Collis P.N., Hargreaves J.K., Korth A. Auroral radio absorption as an indicator of magnetospheric electrons and of conditions in the disturbed auroral D-region. // J. Atmos. Terr. Phys., V.46, P.21-38, 1984.
- Detrick D.L., Rosenberg T.J. A phased-array radiowave imager for studies of cosmic noise absorption. // Radio Sci., V.25, P. 325-338, 1990.
- Enell C.-F., Kero A., Turunen E., Ulich Th., Verronen T.P., Seppala A., Marple S., Honary F.H., Senior A. Effects of D-region heating studied with the Sodankyla Ion Chemistry model. // Ann. Geophys. V.23, P.1575-1583, 2005.
- Kero A., Enell C.-F., Ulich Th., Turunen E., Rietveld M.T., Honary F.H. Statistical signature of active Dregion HF heating in IRIS riometer datafrom 1994-2004. // Ann. Geophys. V.25, P.407-415, 2007.
- Pashin A.B., Belova E.G., Lyatsky W.B. Magnetic pulsation generation by powerful ground-based modulated HF radio transmitter. // J. Atmos. Terr. Phys., V. 57, P. 245-252, 1995.