

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КВ-РАДИОВОЛН В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ

^{1,2}Д.Д. Рогов, ²Н.Ю. Заалов, ²Е.В. Москалева, ¹В.А. Ульев

MODELING OF THE POLAR CAP ABSORPTION EFFECT ON HF RADIO WAVE PROPAGATION IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA

^{1,2}D.D. Rogov, ²N.Y. Zaalov, ²E.V. Moskaleva, ¹V.A. Ulyev

Значительное увеличение электронной концентрации в нижней ионосфере полярной шапки Земли, обусловленное солнечными протонными вспышками, приводит к сильному ослаблению сигналов радиотехнических систем КВ диапазона, работающих в этих регионах. Предложен метод учета поглощения на трассах распространения радиоволн КВ диапазона, основанный на применении скорректированных известных эмпирических моделей поглощения. Показано удовлетворительное соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на российской арктической сети ионосферных наблюдений (риометры, ионозонды вертикального и наклонного зондирования) в период проявления эффектов поглощения полярной шапки.

Significant increase of the electron density in *D*-layer of polar cap ionosphere occurs due to the powerful proton solar fluxes, producing a strong attenuation of HF radio systems signal, which operate in these regions. The method of absorption calculation based on the corrected well-known empirical models at the HF radio wave propagation paths was proposed. Vertical and oblique sounding ionograms with absorption effects were calculated. A good agreement of the simulation results with the experimental data provided by the Arctic network of ionospheric observation (riometers, vertical and oblique sounding ionosondes) during the polar cap absorption events was observed.

Введение

Наиболее масштабным геофизическим возмущением в высоких широтах, охватывающим все полярные области Земли, является поглощение типа полярной шапки (ППШ). ППШ связано с вторжением в атмосферу солнечных протонов с энергией от 1 до 100 МэВ. Широтная граница проникновения этих частиц в атмосферу определяется жесткостью обрезания потока протонов магнитным полем Земли и соответствует примерно 60° геомагнитной широты (зависит от уровня геомагнитной возмущенности). Потоки протонов создают в области *D* интенсивную ионизацию на высотах 50–90 км, приводящую к аномальному поглощению радиоволн КВ диапазона в высоких широтах и к ухудшению условий функционирования различных радиосистем как прикладного, так и исследовательского назначения.

1. Моделирование ионограмм вертикального и наклонного зондирования ионосферы с учетом поглощения

Для моделирования распространения КВ радиоволн в ионосфере используется программа, описанная в [Zaalov et al., 2005], которая в приближении метода геометрической оптики позволяет рассчитать лучевые траектории в трехмерно неоднородной ионосфере. Для построения фонового распределения электронной концентрации используется пространственно-временная аппроксимация экспериментальных данных станций вертикального зондирования ионосферы.

Поглощение в полярных регионах во время событий вторжения солнечных энергичных частиц рассчитывается по алгоритму, предложенному в [Sauer, Wilkinson, 2008; <http://www.swpc.noaa.gov/>]. Границы полярных шапок определяются из числен-

ной модели энергии жесткости геомагнитного обрезания как функции инвариантной широты и индекса геомагнитной активности K_p . Проведена модификация модели: введена суточная вариация жесткости геомагнитного обрезания [Ульев, Москвин, 2009] и асимметричный (восход–заход) нелинейный коэффициент сумеречного перехода [Дриацкий, 1974].

2. Экспериментальные наблюдения

Мониторинг состояния высокоширотной ионосферы в арктическом регионе России осуществляется Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом с помощью ионосферных наблюдений, включающих в себя риометры, комплексы вертикального и наклонного зондирования ионосферы [Рогов и Выставной, 2014].

Солнечная рентгеновская вспышка класса M6.5 произошла 11 апреля 2013 г. в 7:15 UT. Примерно через 1 ч спутник GOES-13 зарегистрировал увеличение потоков протонов во всех диапазонах энергий (рис. 2, а). ППШ, вызванное вторжением этих потоков в атмосферу, 11 апреля и 12 апреля 2013 г. регистрировалось на спокойном уровне геомагнитной возмущенности (K_p -индекс – $0^+ \dots 2^\circ$, *AE*-индекс в рассматриваемый период показывает несколько непродолжительных суббурь, интенсивностью не более 250 нТл).

Проанализируем влияния ППШ по результатам риометрических наблюдений на станциях Тикси (ТИК) и Амдерма (AMD), наблюдений методом вертикального зондирования на станциях Амдерма (AMD) и Салехард (SAH), а также сети трасс наклонного зондирования ионосферы на примере радиолиний Ловозеро (LOZ) – Диксон (DIK) и Салехард (SAH) – Диксон (DIK). На рис. 1 показана карта расположения станций, географические и геомагнитные координаты приведены в таблице.

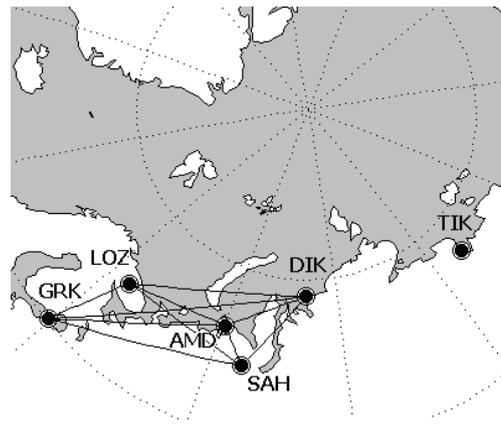


Рис. 1. Карта расположения геофизических станций.

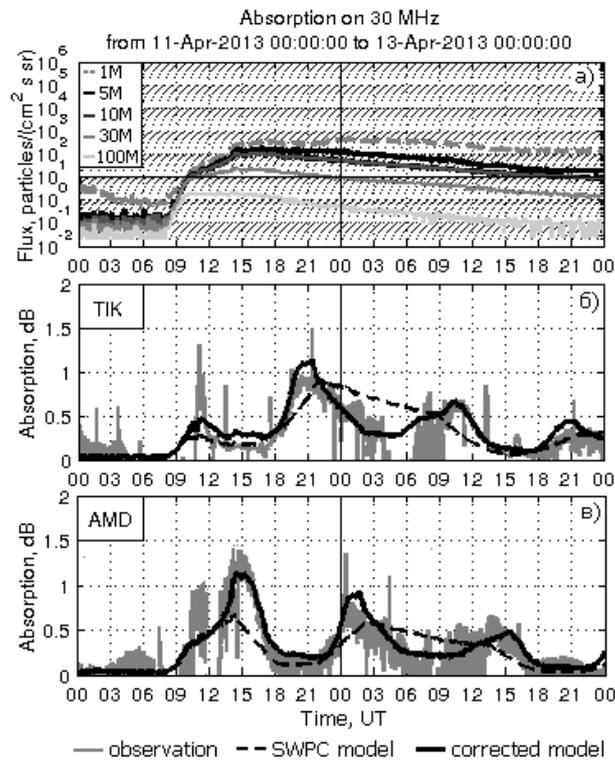


Рис. 2. Поток солнечных протонов (а) и риометрическое поглощение на станциях Тикси (б) и Амдерма (в).

Координаты пунктов наблюдений

Станция	Геогр.		Геомаг.	
	широта, N	долгота, E	широта, N	долгота, E
GRK	60.27	29.38	56.80	105.72
SAH	66.52	66.67	62.84	141.59
LOZ	68.00	35.02	64.62	113.83
AMD	69.60	60.20	65.84	136.57
TIK	71.58	129.00	66.60	198.88
DIK	73.52	80.68	69.26	156.26

3. Моделирование поглощения

3.1. Риометры

На рис. 2 серым цветом показано поглощение, регистрируемое на частоте 30 МГц риометрами Тикси (ТИК, панель б) и Амдерма (AMD, панель в). Черной пунктирной линией показан результат моделирования ПППШ с помощью эмпирической модели NOAA SWPC [Sauer and Wilkinson, 2008]. Сплошной чер-

ной линией показан результат использования скорректированной модели, которая позволяет точнее описывать экспериментально наблюдаемые закономерности. Например, уменьшение поглощения в период с 21 UT 11 апреля до 11 UT 12 апреля в Тикси и с 2 до 15 UT 12 апреля в Амдерме связано с эффектом полуденного восстановления ПППШ [Ульяев и Москвин, 2009].

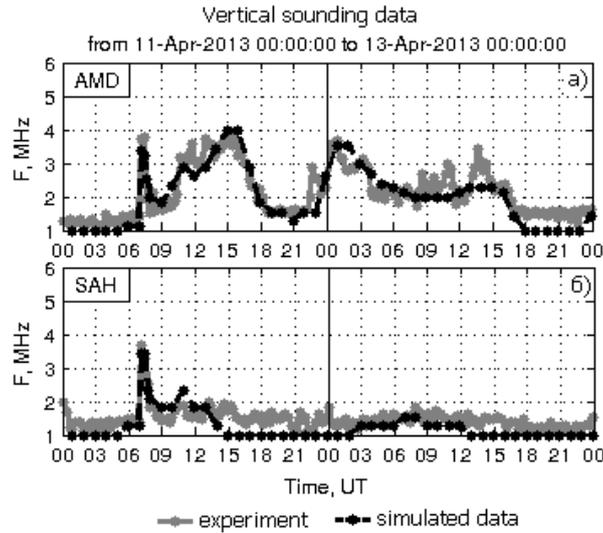


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные минимальные частоты на ионограммах вертикального зондирования на станциях Амдерма (а) и Салехард (б).

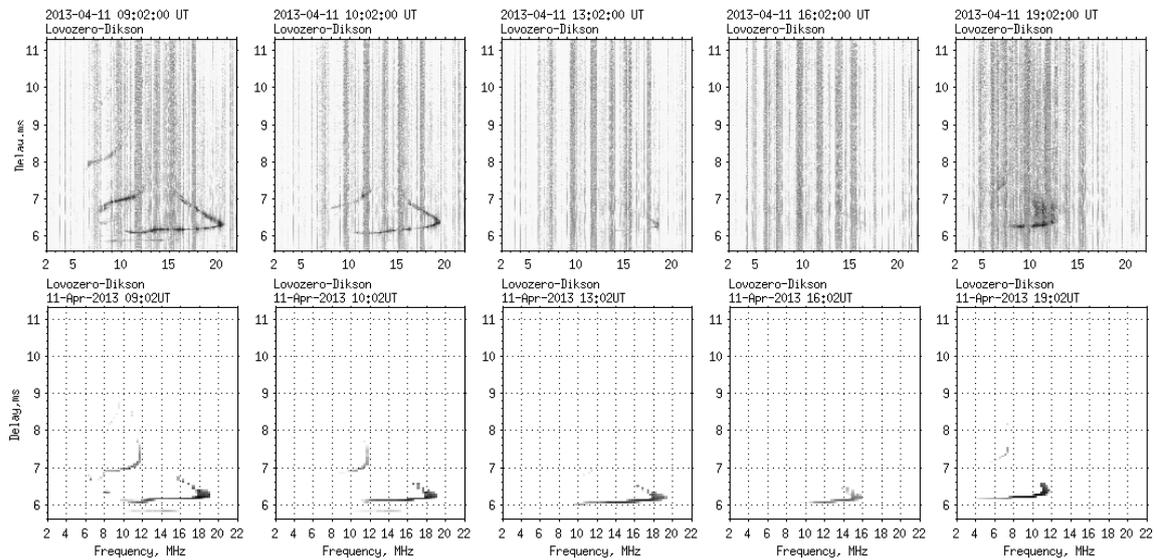


Рис. 4. Экспериментальные (верхняя панель) и расчетные (нижняя панель) ионограммы наклонного зондирования, полученные на трассе Ловозеро – Диксон 11 апреля 2013 г.

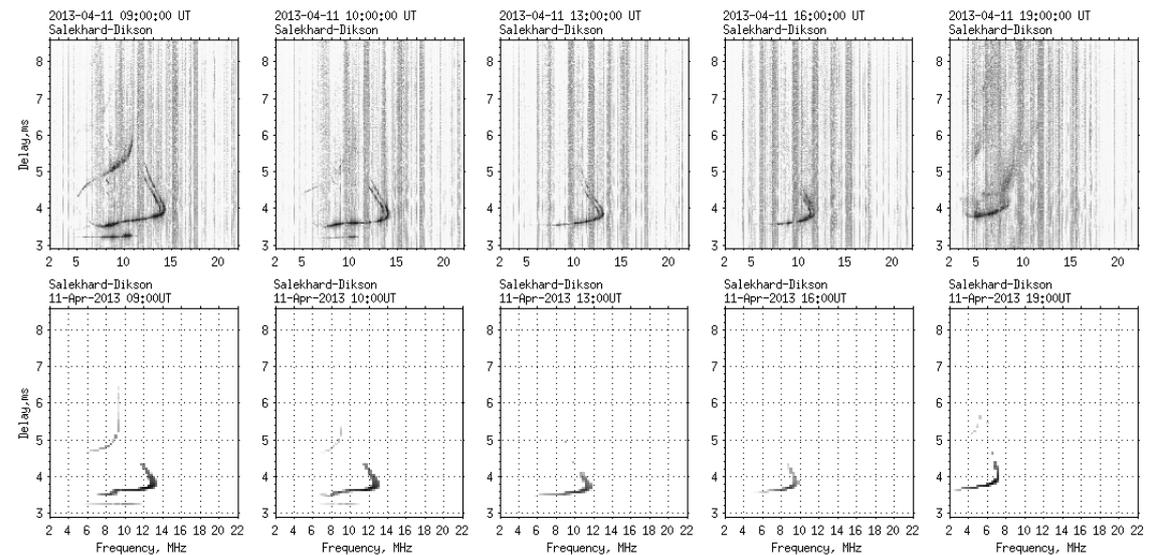


Рис. 5. Экспериментальные (верхняя панель) и расчетные (нижняя панель) ионограммы наклонного зондирования, полученные на трассе Салехард – Диксон 11 апреля 2013 г.

3.2. Вертикальное зондирование

Результаты моделирования влияния ППШ на минимальные частоты (f_{min}), регистрируемые на ионограммах вертикального зондирования станций Амдерма и Салехард показаны на рис. 3. Экспериментальные данные отмечены серым цветом, результаты моделирования – черным. Расчетные вариации f_{min} сняты с ионограмм, полученных с помощью моделирования распространения КВ в ионосфере с учетом рассчитанного поглощения. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и модельных данных. Также видна широтная зависимость поглощения: на станции Салехард в спокойных геомагнитных условиях ППШ практически не регистрируется. Отметим, что хорошо заметна реакция ионозондов (резкое увеличение f_{min}) на рентгеновскую вспышку около 7 UT. Моделирование влияния этой вспышки по данным сети трасс наклонного зондирования рассмотрено в [Rogov et. al., 2015].

3.3. Наклонное зондирование

Рассмотрим эффекты, связанные с событием ППШ, по данным наклонного зондирования ионосферы на трассах Ловозеро – Диксон и Салехард – Диксон. На рис. 4 и 5 (верхние панели) показаны ионограммы, полученные на этих трассах за период с 9 до 19 UT 11 апреля 2013 г. Отмечаем, что поглощение приводит к увеличению наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) и изменению регистрируемой трековой структуры. На нижних панелях рисунков приведены результаты моделирования ионограмм с учетом поглощения. В целом можно отметить хорошее соответствие: до начала ППШ (ионограммы около 9 UT на обеих трассах) наблюдаются сигналы нескольких скачков, далее, по мере увеличения поглощения, происходит постепенное затухание треков большей кратности. Около 19 UT наблюдается восстановление и трековой структуры и интенсивности наблюдаемых сигналов.

Заключение

С помощью модифицированной эмпирической модели поглощения проведено моделирование влияния ППШ по данным риометров, ионозондов вертикального и наклонного зондирования в период проявления эффектов поглощения полярной шапки. Получено хорошее соответствие с экспериментально наблюдаемыми эффектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 224 с.

Рогов Д.Д., Выставной В.М. Исследование параметров распространения декаметровых радиоволн на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в арктическом регионе РФ // Мир измерений. 2014. Т. 7. С. 20–26.

Ульев В.А., Москвин И.В. Связь между спектром потоков солнечных протонов и амплитудой вариаций поглощения во время поглощения типа полярной шапки // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 3 (80). С. 52–58.

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.

Sauer H.H., Wilkinson D.C. Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons // Space Weather. 2008. V. 6. S12002.

Zaalov N.Y., Warrington E.M., Stocker A.J. A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths // Radio Science. 2005. V. 40. RS4006.

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

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия