

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.131-134

АНАЛИЗ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2015 г.

Д.С. Котова^{1,2}, М.В. Клименко^{1,2}, В.В. Клименко¹, Д.В. Благовещенский³, В.Е. Захаров²

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия; e-mails: darshu@ya.ru, maksim.klimenko@mail.ru, vvk_48@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия
e-mail: vezakharov@kantiana.ru

³Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: donatbl@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния сильнейшей в этом солнечном цикле геомагнитной бури 17-19 марта 2015 года на распространение КВ радиоволн. В качестве среды распространения радиоволн использовалась Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы, Ионосферы и Протонносферы, т.к. модель ГСМ ТИП качественно и количественно описала отклик ионосферы на выбранное геомагнитное событие. Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными ионограммами. В период геомагнитной бури наблюдался усиленный E_s -слой, который воспроизводится в модельных ионограммах, а значит и описывается моделью среды распространения.

Введение

Геомагнитные бури влияют на ионосферу и приводят к сильным изменениям в электронной плотности на всех широтах и долготах [Dmitriev et al., 2017]. Эти изменения могут приводить к частичной или полной потере радиосвязи, что может быть критично для работы различных гражданских и военных служб. В предыдущих работах нами были проведены исследования влияния геомагнитных бурь средней мощности на особенности распространения коротких радиоволн в ионосфере [Kotova et al., 2015, 2017]. Для решения этой задачи был реализован согласованный числительный алгоритм проведения вычислительных экспериментов по моделям среды и распространения радиоволн [Kotova et al., 2014]. В работе [Kotova et al., 2015] было показано, что корректность модельных расчетов распространения коротких радиоволн очень сильно зависит от выбора модели ионосферы для описания ионосферных возмущений. Как известно, эмпирическая модель ионосферы IRI

(International Reference Ionosphere), даже с включенной опцией "storm" не способна адекватно описывать отклик ионосферы на геомагнитные возмущения [Oinats et al., 2005; Kotova et al., 2015; Blagoveshchensky et al., 2016]. Дополнительная сложность состоит в некорректном описании существующими эмпирическими моделями высокоширотной ионосферы [Karpachev et al., 2016]. В данной работе приведены результаты исследования влияния сильнейшей в текущем солнечном цикле геомагнитной бури 17-19 марта 2015 года на распространения радиоволн на примере трассы Ловозеро-Горьковская.

Постановка задачи

Исследование проводилось путем моделирования ионограмм наклонного зондирования на трассе Ловозеро-Горьковская. Для этого использовался алгоритм нахождения лучей, проходящих в точку приема, который

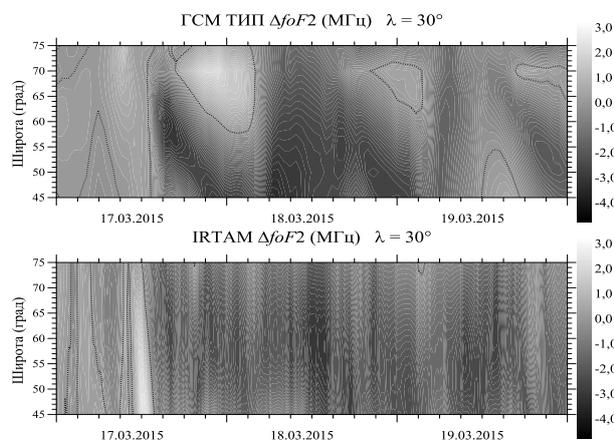


Рисунок 1. Возмущение критической частоты F_2 слоя, foF_2 , в период геомагнитной бури 17-19 марта 2015 г. при использовании модели ГСМ ТИП (слева) и IRTAM (справа) на фиксированной долготе $\lambda = 30^\circ$ в. д. в широтном диапазоне $45^\circ < \varphi < 75^\circ$ с. ш.

подробно описан в статье данного сборника [Котова, 2018]. Для расчета показателя преломления среды необходимо знание параметров ионосферы и нейтральной атмосферы на высотах от 80 до 800 км. Эти параметры были получены с помощью Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1988; Klimenko et al., 2018].

На рис. 1 показаны карты развития возмущений во время геомагнитной бури, построенные по данным наблюдений (представлены как результаты ассимиляционной модели IRTAM) и по результатам модели ГСМ ТИП (с учетом выпадения авроральных частиц по эмпирической модели, разработанной в ПГИ [Vorobjev and Yagodkina, 2008]). Возмущение критической частоты $F2$ слоя, $foF2$, представлено как функция географической широты и времени в период рассматриваемой геомагнитной бури 17-19 марта 2015 года. Рассматриваются меридиональные срезы (широтные профили) отклонения $foF2$ на долготе $\lambda = 30^\circ$ в.д. Таким образом, рассматривается Западно-Российский сектор, в котором располагается экспериментальная трасса между станциями Ловозеро ($\varphi = 68.00^\circ$ с. ш., $\lambda = 35.02^\circ$ в. д.) и Горьковская ($\varphi = 60.27^\circ$ с. ш., $\lambda = 29.38^\circ$ в. д.). Сравнивая поведение возмущения $foF2$, полученного по модели ГСМ ТИП, с результатами по модели IRTAM, можно отметить, что в целом они согласуются. Главная фаза геомагнитной бури приводит к существенному дневному положительному возмущению в $foF2$ в рассматриваемом Западно-Российском секторе, которое сменяется сильным отрицательным возмущением в $foF2$. Что повторяется в результатах расчетов модели ГСМ ТИП. Следует отметить, что ночные положительные возмущения в $foF2$ формируются в районе $65-75^\circ$ с. ш.

Для рассматриваемого в исследовании момента времени ($\sim 00:00$ UT) в высокоширотной области было получено качественное и количественное согласие ионосферного отклика на геомагнитную бурю [Klimenko et al., 2018]. Внезапное начало геомагнитной бури приходится на момент времени ~ 05 UT 17 марта, с последующим падением Dst индекса до -223 нТ приблизительно в 23 UT. Поэтому время 0:02 UT 17 марта было выбрано нами в качестве спокойных условий, соответственно время 0:02 UT 18 марта и 19 марта – в качестве возмущенных условий.

Мы исследовали влияние магнитного поля Земли на распространение коротких радиоволн. По этой причине рассматривалось распространение только обыкновенной моды волны, так как в отсутствие магнитного поля расщепление на компоненты волновой моды отсутствует.

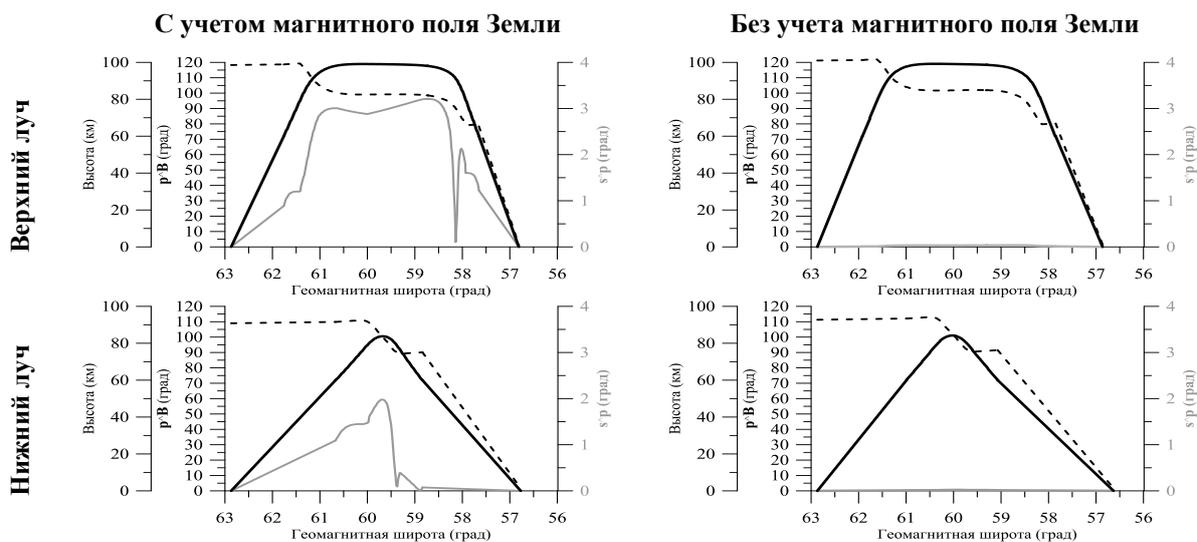


Рисунок 2. Поведение угла $\theta = \mathbf{p}^{\mathbf{V}}$ между векторами импульса и индукции геомагнитного поля (черные пунктирные кривые, ось ординат слева) и угла $\zeta = \mathbf{s}^{\mathbf{p}}$ между лучевым вектором и вектором импульса (серые кривые, ось ординат справа) вдоль лучевой траектории (сплошные черные кривые, вспомогательная ось ординат слева).

Результаты

Результаты расчетов, полученные при использовании модели ГСМ ТИП в качестве среды распространения радиоволн, показаны на рис. 2 и 3. На рис. 2 показано поведение углов между лучевым вектором, \mathbf{s} , и вектором импульса, \mathbf{p} , а также между \mathbf{p} и внешним геомагнитным полем \mathbf{V} для верхних и нижних лучей при распространении в изотропной и анизотропной среде. В целом результаты повторяют результаты, полученные в [Котова и др., 2016; Kotova et al., 2017]: при распространении в анизотропной среде наблюдается усиление неоднородности волны по мере погружения в ионосферный слой, а затем ее ослабление в окрестности точки поворота. Точка поворота лучевой траектории находится по трассе несколько дальше и преломление (или отражение) луча происходит позже по сравнению с распространением в изотропной среде, где угол $\zeta = \mathbf{s}^{\mathbf{p}}$ равен нулю (т.к. $\mathbf{s} = \mathbf{p}$). Наблюдается изменение длины оптического пути. Получено, что для верхнего луча

неоднородность волны развивается сильнее, что связано с погружением в слой с большим значением электронной плотности. Поведение угла $\theta = \rho \cdot \mathbf{V}$ в случае распространения в изотропной среде аналогично распространению в анизотропной среде. Для аналогичных расчетов наблюдается незначительное увеличение угла θ в расчетах без учета магнитного поля Земли.

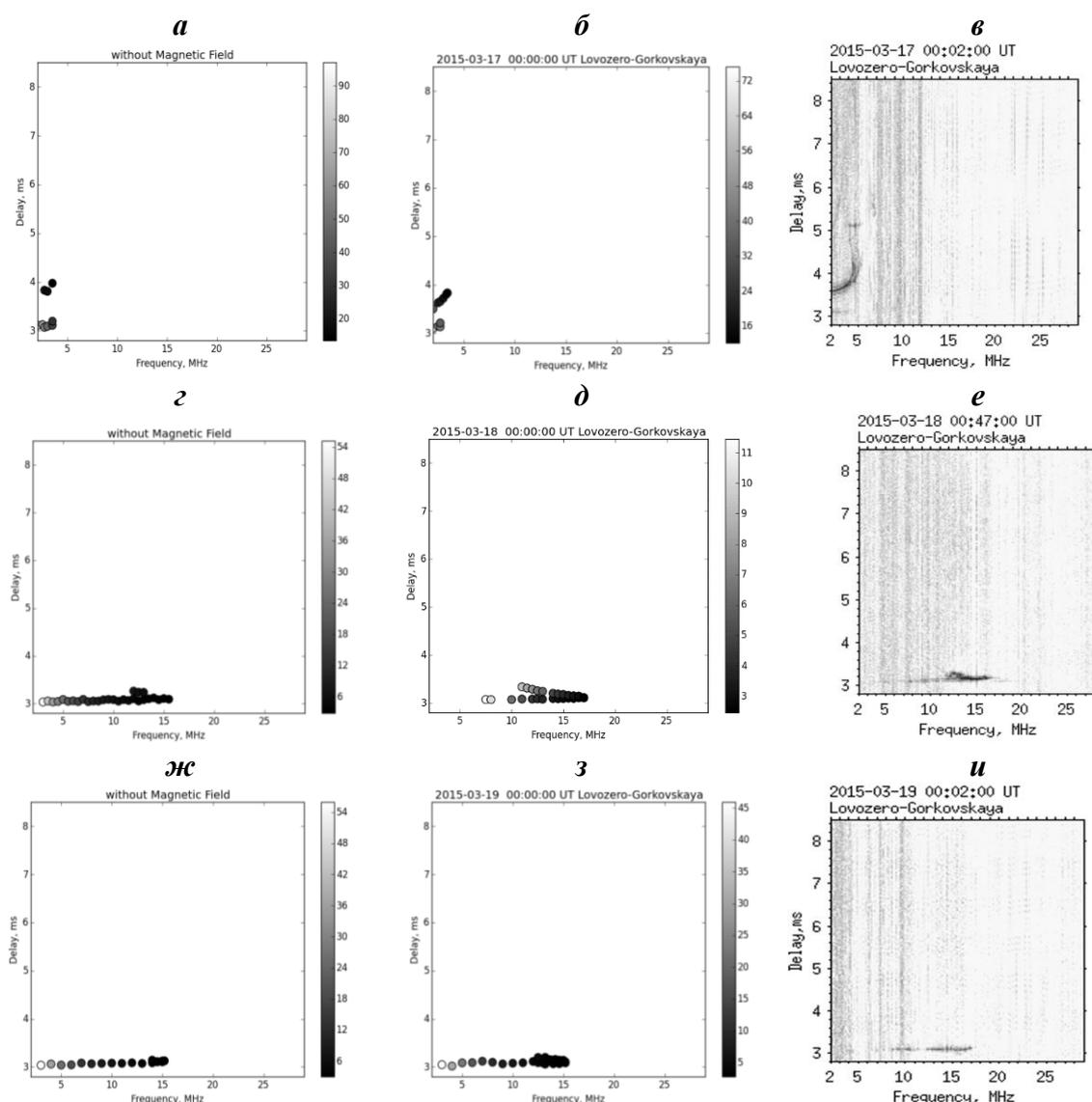


Рисунок 3. Модельные (*а, б, з, д, ж, з*) и экспериментальные (*в, е, и*) ионограммы наклонного зондирования на высокоширотной трассе Ловозеро-Горьковская в момент времени 00:02 UT 17 марта 2015 г. (*а, б, в*), 18 марта 2015 года (*з, д, е*) и 19 марта 2015 года (*ж, з, и*). На панелях (*б, д, з*) и (*а, з, ж*) представлены результаты, полученные с учетом и без учета магнитного поля соответственно. Черно-белой шкалой на модельных ионограммах показано поглощение сигнала в дБ.

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных и модельных ионограмм наклонного зондирования, полученных с учетом и без учета магнитного поля Земли. Расчет интегрального поглощения радиоволны позволил построить модельные ионограммы с учетом ослабления сигнала при распространении в среде. В спокойных условиях мы наблюдаем отражение от слоев *E* и *F*. Наблюдаемая максимальная применимая частота (МПЧ) достигает 5 МГц (рис. 3в), тогда как значение модельной МПЧ не превышает 3.5 МГц (рис. 3б). МПЧ *E*-слоя в случае учета магнитного поля уменьшается на 1 МГц по сравнению с изотропным случаем. Во время главной фазы геомагнитной бури 18 марта происходит сильное поглощение сигнала в 00:02 UT. Экспериментальная ионограмма практически не заметна. Поэтому здесь приводится ионограмма для момента времени 0:47 UT, на которой отчетливо видна МПЧ *Es*-слоя. Во время бури возникает сильный *Es*-слой, который поглощает радиосигнал, поэтому мы не наблюдаем отражения от *F*-области. Можно отметить, что до 7 МГц сигнал отсутствует как в эксперименте, так и в результатах модельных расчетов. Моделируемая

МПЧ при учете магнитного поля Земли соответствует наблюдаемой. В случае изотропии МПЧ *E_s*-слоя меньше на 1.5 МГц. 19 марта след на модельной ионограмме, полученный от отражения верхних лучей, меньше, чем для 18 марта, и повторяет результат, полученный в эксперименте. Задержки сигналов и, как следствие, высоты ионосферных слоев согласуются в модельных и экспериментальных результатах.

При равной частоте волны длина оптического пути для расчетов, проводимых в изотропной среде, меньше, чем в случае анизотропии. Для изотропного случая след на ионограмме, полученный при отражении верхних лучей от ионосферы, менее крут и ближе располагается к следу, полученному от нижних лучей. Можно отметить, что затухание сигнала в изотропной среде больше, чем при анизотропии.

Полученное согласие между модельными и экспериментальными ионограммами подтверждает, что модель ГСМ ТИП воспроизводит высокоширотный ионосферный отклик на геомагнитную бурю 17 марта 2015 г.

Заключение

Модельные ионограммы, полученные при использовании модели ГСМ ТИП (с учетом высыпания авроральных частиц по эмпирической модели ПГИ) и модели распространения радиоволн, хорошо воспроизвели наблюдаемые высокоширотные ионограммы наклонного зондирования в период геомагнитной бури 17-19 марта 2015. Это показало, что модель ГСМ ТИП можно использовать как среду распространения радиоволн в возмущенных условиях. Исследование влияния магнитного поля Земли показало, что распространение в изотропной среде приводит к уменьшению оптической длины пути. Это приводит к изменению угла наклона следа на наклонной ионограмме, полученного при отражении верхних лучей от ионосферы. Отмечено увеличение затухания в случае распространения в изотропной среде. Кроме того, изотропия может привести к изменению МПЧ порядка 30%.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект №17-77-20009 (комплекс по построению ионограмм и влияние магнитного поля исследования) и программы повышения конкурентоспособности «5-100» БФУ им. И. Канта (анализ данных ионозонда и E-слой исследования), работа Благовещенского Д. В. выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00343.

Список литературы

- Котова Д.С. Алгоритм трехмерной «пристрелки» на основе численной модели распространения коротких радиоволн в ионосфере // *Physics of Auroral Phenomena*. Т. 41. 2018.
- Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Исследование влияния магнитного поля на высокоширотные КВ трассы во время геомагнитной бури // *Physics of Auroral Phenomena*. Т. 39. №1 (40). С. 119-123. 2016.
- Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Anishin M.M., Sergeeva M.A., Rogov D.D. Impact of the magnetic superstorm on March 17-19, 2015 on subpolar HF radio paths: experiment and modeling // *Adv. Space Res.* Vol. 58(6). P. 835-846. doi: 10.1016/j.asr.2016.05.027. 2016.
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8-9 March 2008 // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* Vol. 122(2). P. 2398-2423. doi: 10.1002/2016JA023260. 2017.
- Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for nighttime winter conditions // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* Vol. 146. P. 149-159, doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008. 2016.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17-23 March 2015 // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* doi:10.1016/j.jastp.2017.12.017. 2018.
- Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Numerical simulation of the influence of the May 2-3, 2010 geomagnetic storm on HF radio-wave propagation in the ionosphere // *Radiophysics and Quantum Electronics*. Vol. 57(7). P. 467-477, doi: 10.1007/s11141-014-9529-2. 2014.
- Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E., Ratovsky K.G., Nosikov I.A., Zhao B. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26-29, 2011 // *Adv. Space Res.* Vol. 56(9). P. 2012-2029. doi: 10.1016/j.asr.2015.05.009. 2015.
- Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Influence of Geomagnetic Storms of September 26-30, 2011, on the Ionosphere and HF Radiowave Propagation. II. Radiowave Propagation // *Geom. Aeron.* Vol. 57, P. 288-300. 2017.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *PAGEOPH.* Vol. 127 (2/3). P. 219-254. 1988.
- Oinats A.V., Ratovsky K.G., Kotovich G.V. Comparison of the Irkutsk Digisonde data with the IRI model predictions for quiet and disturbed geomagnetic conditions in 2003 and 2004 // *Proceedings of XXVII GA URSI*. New Delhi, India. 2005. [http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/G03.10\(0102\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/G03.10(0102).pdf)
- Vorobjev V.G., Yagodka O.I. Empirical model of auroral precipitation power during substorms // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* Vol. 70. P. 654-662. 2008.