

ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В СЕНТЯБРЕ 2005 ГОДА И ДЕКАБРЕ 2006 ГОДА

М.В. Клименко¹, В.В. Клименко¹, А.А. Власов², М. Фёрстер³, К.Г. Ратовский⁴, В. Трухлик⁵

¹Западное отделение ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия, e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁵Institute of Atmospheric Physics, ASCR, Prague, Czech Republic

Аннотация. В настоящем исследовании рассматриваются ионосферные эффекты геомагнитных бурь, имевших место в сентябре 2005 г. и декабре 2006 г. Представлены результаты численных расчетов поведения ионосферных параметров во время этих бурь, полученные с использованием модели ГСМ ТИП. При моделировании эффектов геомагнитных бурь разность потенциалов через полярные шапки, амплитуда и широтное положение продольных токов второй зоны задавались в зависимости от AE -индекса геомагнитной активности. Высыпания высокоэнергичных электронов рассчитывались на основе разработанной в последнее время эмпирической модели. При проведении расчетов учитывалась 30 мин задержка вариаций продольных токов второй зоны относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки. Проведено сравнение результатов модельных расчетов с данными наблюдений поведения термосферных и ионосферных параметров, полученными СНР и ионозондом в Иркутске, СНР в Tromsø и спутниками CHAMP и DMSP. Дано объяснение полученных расхождений результатов модельных расчетов и данных наблюдений.

Введение

Ионосферные эффекты, наблюдавшиеся во время нескольких следовавших друг за другом геомагнитных бурь в сентябре 2005 г., были рассмотрены в (Goncharenko *et al.*, 2007; Kurkin *et al.*, 2008). Кроме того, были проведены исследования ионосферных эффектов этих бурь с использованием двух глобальных численных моделей: TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model) (Lu *et al.*, 2008) и Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) (Клименко и Клименко, 2009; Клименко и др., 2011; Klimenko *et al.*, 2011a,b).

Сравнение результатов модельных расчетов различных ионосферных параметров с данными наблюдений на различных среднеширотных станциях, представленное в (Клименко и Клименко, 2009; Клименко и др., 2011), выявило удовлетворительное качественное согласие. В этих статьях было высказано предположение о том, что причинами расхождений результатов расчетов и наблюдений являются использование 3-х часового K_p -индекса при моделировании временной зависимости входных параметров модели, дипольное приближение геомагнитного поля в модели ГСМ ТИП и отсутствие в модельных расчетах эффектов солнечных вспышек, имевших место в рассматриваемый период времени. Из отмеченных трех причин мы устранили первую и последнюю, что позволило приблизить результаты модельных расчетов к данным наблюдений благодаря более точному описанию процессов, происходящих в природе (Klimenko *et al.*, 2011a,b). Однако при этом все же остались некоторые различия между результатами расчетов и данными наблюдений, главным из которых является положительное возмущение в электронной плотности, наблюдавшееся 11 сентября 2005 г. над Иркутском.

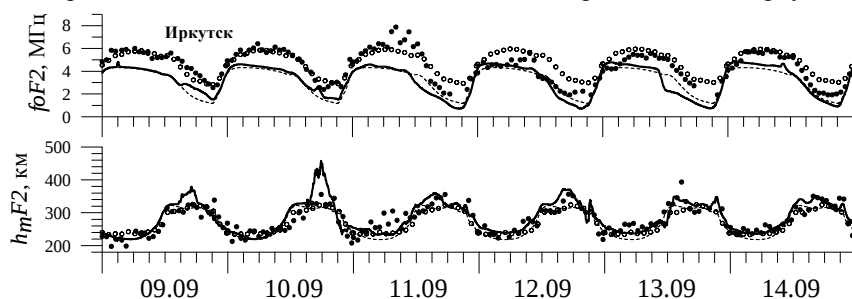


Рис. 1. Поведение $foF2$ и $hmF2$, рассчитанное с использованием модели ГСМ ТИП и наблюдавшееся над Иркутском 9–14 сентября 2005 г.

данными наблюдений цифрового ионозонда и станции некогерентного рассеяния (СНР) в Иркутске, СНР EISCAT (Tromsø), спутников CHAMP и DMSP во время последовательности геомагнитных бурь в сентябре 2005 г. и с данными СНР EISCAT (Tromsø) во время геомагнитной бури 14–15 декабря 2006 г.

Новая постановка задачи отличается от предыдущей тем, что 30 минутная задержка в развитии продольных токов второй зоны относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки учитывается теперь на всех фазах развития геомагнитных бурь. Мы сравнили результаты модельных расчетов с

Постановка задачи и описание данных наблюдений

Данное исследование посвящено численному моделированию ионосферных эффектов геомагнитных бурь. Исследования проводились с использованием модели ГСМ ТИП, разработанной в Западном отделении ИЗМИРАН. Модель ГСМ ТИП, детально описанная в (Namgaladze et al., 1988), была дополнена новым блоком расчета электрических полей и зонального тока в ионосфере Земли (Клименко и др., 2006). При расчете термосферных и ионосферных эффектов геомагнитных бурь в сентябре 2005 года и в декабре 2006 года входные параметры модели задавались так же, как и в (Klimenko et al., 2011b; Клименко и Клименко, 2011). Как отмечалось выше, 30 минутная, согласно (Vasyliunas, 1970; Kikuchi et al., 2010), задержка вариаций продольных токов второй зоны относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки учитывалась в течение всего рассматриваемого периода времени. Высыпания энергичных частиц рассчитывались с использованием эмпирической модели Zhang and Paxton (2008).

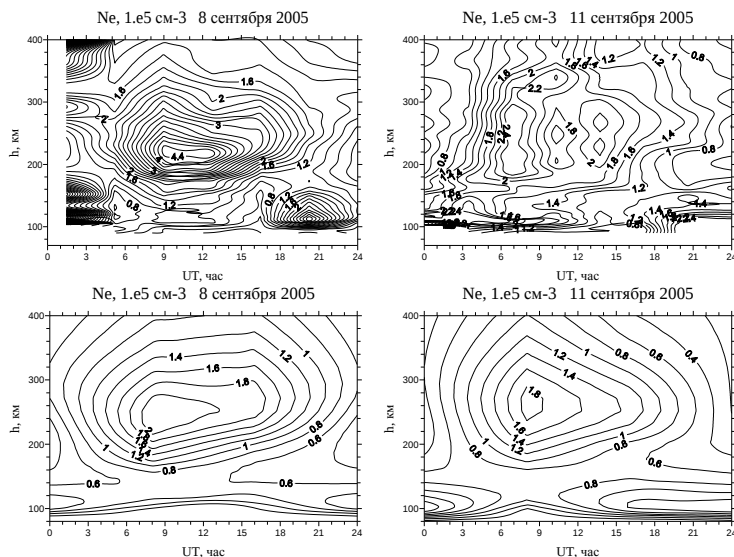


Рис. 2. Данные измерений (вверху) и результаты модельных расчетов (внизу) суточных вариаций вертикальных распределений электронной концентрации над EISCAT (Tromsø) 8 и 11 сентября 2005 г.

борту спутника CHAMP, а также концентрации и температуры электронов на спутниках DMSP-17 и DMSP-19 на высотах пролетов этих спутников.

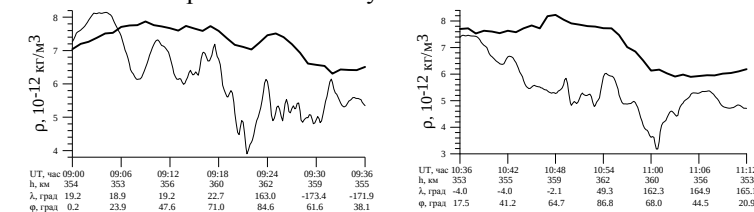


Рис. 3. Плотность нейтральной атмосферы, измеренная спутником CHAMP (тонкие линии) и рассчитанная в модели (жирные линии) 11.09.2005.

соответственно. Отметим, что абсолютные значения $foF2$, полученные в результатах модельных расчетов меньше, чем наблюдаемые значения. Причиной этого является переоценка плотности нейтральной атмосферы в модели ГСМ ТИП, которая приводит к переоценке потерь ионизации на высотах F -области ионосферы. Из рисунка видно, что в результатах модельных расчетов над станцией Иркутск в неосвещенное время суток 9 сентября формируется положительное возмущение $foF2$, а 11–14 сентября отрицательные возмущения $foF2$, что согласуется с данными наблюдений. Кроме того, в представленных результатах модельных расчетов видно формирование положительного возмущения в $foF2$, наблюдавшегося 11 сентября в дневное время. Из этого можно сделать вывод о том, что учет задержки вариаций продольных токов второй зоны относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки играет очень важную роль в ионосферном отклике на геомагнитные возмущения. Что касается поведения h_mF2 над станцией Иркутск, то результаты модельных расчетов и данные наблюдений хорошо согласуются между собой как по абсолютным значениям, так и по амплитуде возмущений.

Рис. 2 демонстрирует суточные вариации вертикальных распределений электронной плотности над СНР EISCAT (Tromsø), полученные в результатах расчетов с использованием модели ГСМ ТИП и наблюдавшиеся в спокойных условиях 8 сентября и во время бури 11 сентября. Общей характерной

Для тестирования полученных результатов модельных расчетов было проведено их сравнение с данными наблюдений. Последние представляют собой поведение термосферных и ионосферных параметров, полученное с помощью различных приборов, как на поверхности Земли, так на космических аппаратах. В качестве источника данных о поведении параметров главного максимума электронной концентрации в ионосфере использовался Иркутский цифровой ионозонд DPS-4 (Reinisch et al., 1997), ионограммы которого были обработаны в интерактивном режиме с помощью программного комплекса SAO Explorer (Reinisch et al., 2004). Вертикальные профили электронной плотности были получены с помощью СНР EISCAT, расположенного в Tromsø. Кроме того, мы использовали данные измерений нейтральной плотности на

Основные результаты и обсуждение

На рис. 1 показано рассчитанное поведение критической частоты и высоты максимума $F2$ -слоя ионосферы, $foF2$ и h_mF2 , над Иркутском с 9 по 14 сентября 2005 г. (пунктирные и сплошные линии), а также данные наземного зондирования (светлые и темные кружки) для спокойных и возмущенных условий,

особенностью результатов модельных расчетов и данных наблюдений является наличие отрицательного возмущения в электронной плотности на высотах F -области ионосферы и положительного возмущения в электронной плотности на высотах E -области. Кроме того, хорошо видно, что электронная плотность в максимуме $F2$ -слоя во время бури сильно уменьшается и максимум E -слоя становится главным ионосферным максимумом.

На рис. 3 показаны результаты расчетов и данные наблюдений плотности нейтрального газа вдоль двух пролетов спутника CHAMP 11 сентября 2005 г. Видно, что в модели ГСМ ТИП мы получаем завышенную плотность нейтральной атмосферы, что, как отмечалось выше, приводит к завышенным скоростям потерь ионизации в F -области ионосферы и, как следствие, к заниженным значениям электронной концентрации.

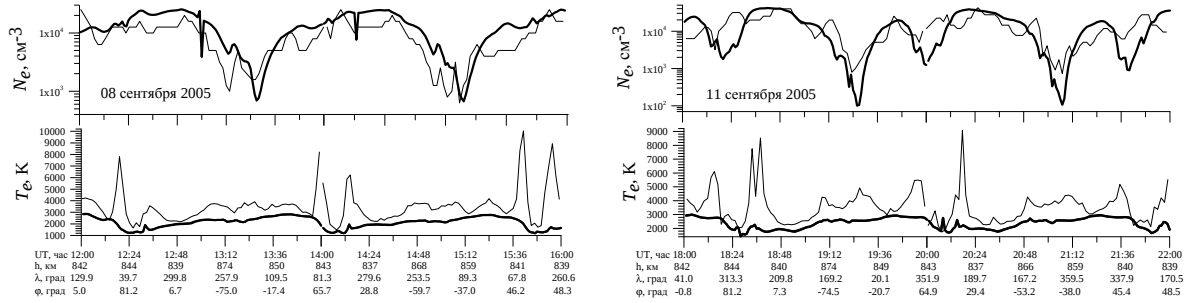


Рис. 4. Электронная концентрация и электронная температура, рассчитанные в модели (жирные линии) и измеренные на борту спутников DMS-17 и DMS-19 (тонкие линии) 8 и 11 сентября 2005 г.

Рис. 4 демонстрирует адекватность полученных результатов модельных расчетов. В данном случае эталоном для сравнения являются данные измерений концентрации и температуры электронов, полученные спутниками DMS-17 и DMS-19. Видно хорошее согласие результатов расчетов с данными наблюдений электронной концентрации, как в спокойных условиях, так и во время геомагнитной бури. То же самое можно сказать о поведении электронной температуры в целом, отмечая небольшую недооценку ее значений в результатах расчетов. При этом основными различиями между результатами расчетов и данными наблюдений в данном случае являются горячие пятна, наблюдавшиеся приборами, установленными на спутниках DMS-17 и DMS-19, и не воспроизводимые в результатах модельных расчетов.

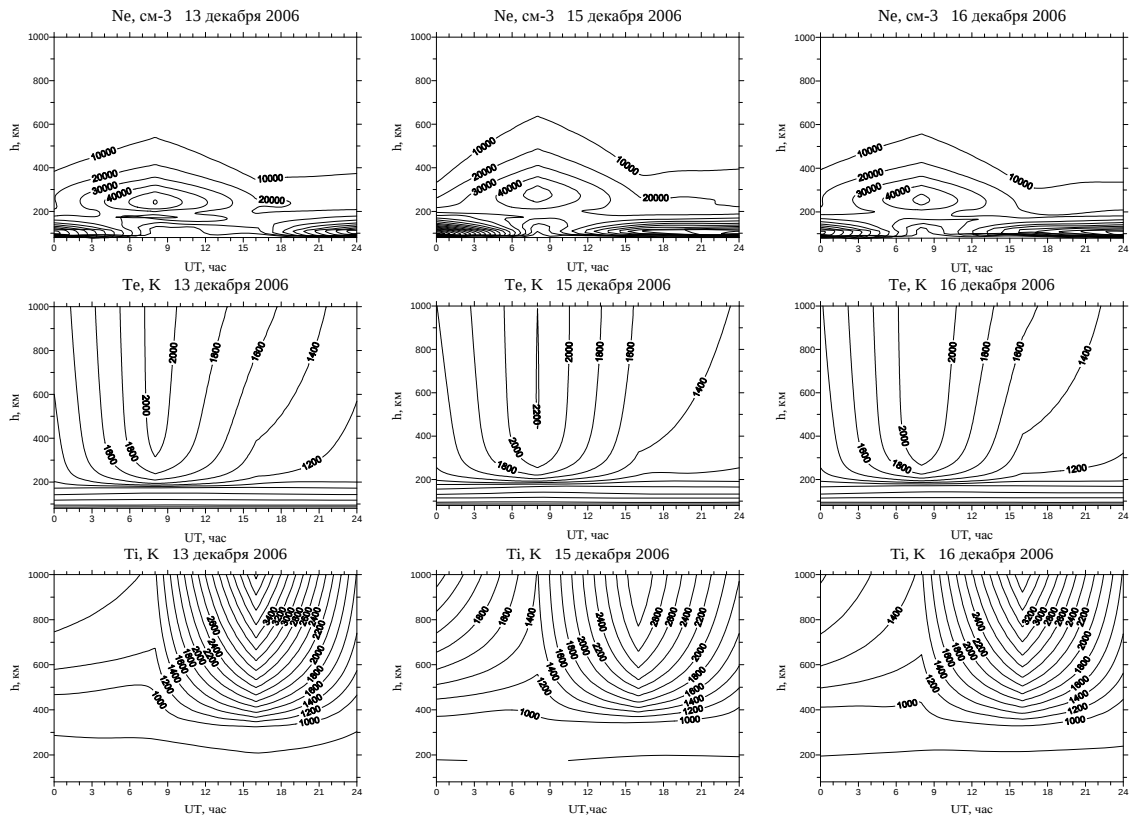


Рис. 5. Рассчитанные в модели суточные вариации вертикальных распределений над EISCAT (Tromso) электронной концентрации и электронной и ионной температур 13, 15 и 16 декабря 2006 г.

И, наконец, рис. 5 иллюстрирует результаты модельных расчетов над станцией EISCAT (Tromso)

ионосферных эффектов геомагнитной бури в декабре 2006 года. Из рисунка видно, что во время этой бури происходит уменьшение электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя и увеличение электронной концентрации в максимуме E -слоя. Кроме того, во время бури происходит рост электронной температуры, что связанный с дополнительным Джоулевым нагревом во время возмущений. Интересно ведет себя ионная температура во время бури. Так, днем происходит падение ионной температуры, а ночью – ее рост. Мы провели предварительное сравнение результатов модельных расчетов с данными наблюдений представленных ионосферных параметров (<http://www.eiscat.se/madrigal/cgi-bin/getMadplot.py/2006/eis/>), которое выявило удовлетворительное согласие.

Заключение

В настоящей работе представлены термосферные и ионосферные эффекты геомагнитных бурь в сентябре 2005 г. и декабре 2006 г. Установлено, что запаздывание вариаций продольных токов второй зоны относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки оказывает существенное влияние на ионосферные эффекты геомагнитных бурь. Результаты сравнительного анализа позволяют утверждать, что выбранная нами постановка задачи моделирования эффектов геомагнитных бурь адекватно описывает процессы, происходящие в ионосфере Земли во время геомагнитных бурь. При этом, мы определили главную причину расхождений в абсолютных значениях электронной концентрации, полученных при сравнении результатов модельных расчетов с данными наблюдений. Это позволит нам в будущем устранить ее и выйти на новый качественный уровень модельного описания поведения ионосферы во время возмущений.

Авторы благодарят команду CNP EISCAT за обработку экспериментальных данных и предоставление доступа к ним, разработчиков проекта Lowell DIDBase за предоставление базы данных цифровых ионозондов и международную ассоциацию EISCAT, поддерживаемую CRIRP (Китай), SA (Финляндия), CNRS (Франция), DFG (Германия), NIPR и STEL (Япония), NFR (Норвегия), VR (Швеция), STFC (Англия).

Список литературы

- Клименко М.В., В.В. Клименко, В.В. Брюханов (2006). Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет. *Геомагнетизм и аэрономия*, **46**(4), 485–494.
- Клименко М.В., В.В. Клименко, К.Г. Ратовский, Л.П. Гончаренко (2011). Ионосферные эффекты последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. *Геомагнетизм и аэрономия*, **51**(3), 368–380.
- Клименко М.В., В.В. Клименко (2009). Численное моделирование эффектов магнитосферной конвекции, высыпаний и продольных токов второй зоны во время последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 года. *Известия КГТУ*. Калининград, ФГОУ ВПО КГТУ, № 16, 220–228.
- Клименко, В.В., М.В. Клименко (2011), Возмущенное динамо электрическое поле и эффекты прямого проникновения и сверхэкранирования во время геомагнитной бури, *Proceedings of the 34th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*, Apatity, 1 – 4 March, 2011. Apatity: KSC RAS (настоящий сборник).
- Goncharenko L.P., J.C. Foster, A.J. Coster, C. Huang, N. Aponte, and L.J. Paxton (2007). Observations of a positive storm phase on September 10, 2005. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **69**, 1253–1272.
- Kikuchi T., Y. Ebihara, K.K. Hashimoto, R. Kataoka, T. Hori, S. Watari, N. Nishitani (2010). Penetration of the convection and overshielding electric fields to the equatorial ionosphere during a quasiperiodic DP 2 geomagnetic fluctuation event. *J. Geophys. Res.*, **115**, A05209, doi:10.1029/2008JA013948.
- Klimenko M.V., V.V. Klimenko, K.G. Ratovsky, L.P. Goncharenko (2011a). Disturbances in the ionospheric F-region peak heights in the American longitudinal sector during geomagnetic storms of September 2005. *Adv. Space Res.*, **48**(7), 1184–1195, doi:10.1016/j.asr.2011.06.002.
- Klimenko M.V., V.V. Klimenko, K.G. Ratovsky, L.P. Goncharenko, Y. Sahai, P.R. Fagundes, R. de Jesus, A.J. de Abreu, A.M. Vesnin. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005. *Radio Sci.*, **46**, RS0D03, doi:10.1029/2010 RS004 590.
- Kurkin V.I., O.M. Pirog, N.M. Polekh, A.V. Mikhalev, I.N. Poddelsky, and A.E. Stepanov (2008). Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **70**(18), 2346–2357.
- Lu G., L.P. Goncharenko, A.D. Richmond, R.G. Roble, N. Aponte (2008). A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds. *J. Geophys. Res.*, **113**(A8), doi:10.1029/2007JA012895.
- Namgaladze A.A., Yu.N. Korenkov, V.V. Klimenko, I.V. Karpov, F.S. Bessarab, V.A. Surotkin, T.A. Glushchenko, N.M. Naumova (1988). Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System. *PAGEOPH*, **127**(2/3), 219–254.
- Vasyliūnas V.M. (1970). Mathematical models of magnetosphere convection and its coupling to the ionosphere. In: *Particles and Fields in the Magnetosphere*, McCormac B.M. (Ed.), D. Reidel, Dordrecht, 60–71.
- Reinisch B.W., D.M. Haines, K. Bibl, I. Galkin, X. Huang, D.F. Kitrosser, G.S. Sales, J.L. Scali (1997). Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar. *Radio Sci.*, **32**(4), 1681–1694.
- Reinisch, B.W., I.A. Galkin, G.M. Khmyrov, A.V. Kozlov, and D.F. Kitrosser (2004). Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. *Adv. Radio Sci.*, **2**, 241–247.
- Zhang Y., Paxton L.J. (2008). An empirical Kp -dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **70**(8–9), 1231–1242.