

ВОЗМУЩЕННОЕ ДИНАМО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЭФФЕКТЫ ПРЯМОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ И СВЕРХЭКРАНИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

В.В. Клименко, М.В. Клименко (*Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, e-mail: vvk_48@mail.ru*)

Аннотация. Существует несколько механизмов генерации электрического поля в средне- и низкоширотной ионосфере во время магнитосферных возмущений: прямое проникновение электрического поля с высоких широт к экватору, сверхэкранирование и возмущенное динамо электрическое поле. В данном исследовании представлены результаты модельных расчетов электрического поля и его ионосферных эффектов во время геомагнитной бури 14–15 декабря 2006 г. Расчеты были выполнены с использованием модели ГСМ ТИП. Расчеты проводились для спокойных и возмущенных условий с учетом суперпозиции динамо электрического поля и электрического поля магнитосферной конвекции, а также без учета динамо электрического поля. Это позволило выявить роль электрического поля магнитосферной конвекции и возмущенного динамо электрического поля во время геомагнитных бурь.

Введение

Известно, что электрическое поле в ионосфере Земли генерируется в хвосте магнитосферы и в проводящем слое ионосферы (Gurevich et al., 1976; Richmond, 2011). Электрическое поле магнитосферной конвекции, направленное с утра на вечер, возникает при взаимодействии солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитосферой Земли и передается в высокоширотную ионосферу посредством продольных токов первой зоны (Vasyliūnas, 1970; Денисенко и др., 1992; Toffoletto et al., 2004). Как показано в (Альвен и Фельтхаммар, 1967; Harel et al., 1981) дрейф к Земле горячих частиц плазменного слоя под действием электрического поля магнитосферной конвекции приводит к обтеканию земного диполя электронами (положительно заряженными ионами) с утренней (вечерней) стороны. Возникающее при этом разделение зарядов приводит к появлению электрического поля поляризации, направленного с вечерней стороны на утреннюю, которое экранирует низкие широты от проникновения электрического поля магнитосферной конвекции и передается в ионосферу посредством продольных токов второй зоны. Кроме того, электрическое поле генерируется термосферным ветром за счет ион-нейтральных столкновений в токопроводящем слое ионосферы (Richmond, 1979; Du and Stening, 1999). Движение заряженных частиц поперек геомагнитного поля можно интерпретировать как действие электрического поля поляризации, которое получило название динамо электрического поля.

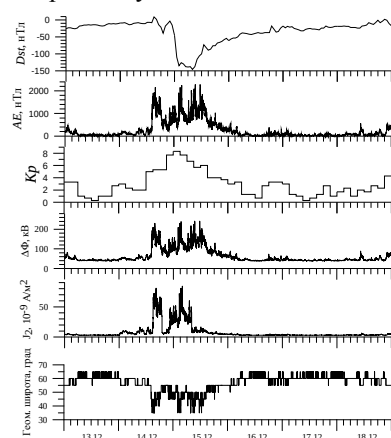


Рис. 1. Поведение индексов геомагнитной активности и входных параметров модели ГСМ ТИП во время геомагнитной бури в декабре 2006 г.

Возмущения на Солнце посредством ММП и частиц солнечного ветра передаются в магнитосферу, а затем и в ионосферу Земли. При этом происходит усиление продольных токов первой и второй зон, что, в свою очередь, приводит к усилению электрических полей в высокоширотной и авроральной ионосфере (Ляцкий, 1978; Денисенко и др., 1992). Запаздывание вариаций продольных токов второй зоны относительно изменений продольных токов первой зоны, предсказанная в (Vasyliūnas, 1970), приводит к прямому проникновению электрического поля магнитосферной конвекции к низким широтам при усилении геомагнитной активности (Wolf and Jaggi, 1973; Maruyama et al., 2005; Kikuchi et al., 2010), и к сверхэкранированию при ослаблении геомагнитной активности (Wolf et al., 2007; Kikuchi et al., 2010). Кроме того, во время геомагнитных возмущений возникает дополнительный Джоулев нагрев и, как следствие, происходит изменение глобальной термосферной циркуляции (Mayr and Volland, 1973; Richmond and Matsushita, 1975), что приводит к появлению возмущенного динамо электрического поля (Blanc and Richmond, 1980; Maruyama et al., 2005). Таким образом, основные источники вариаций электрического поля в ионосфере во время геомагнитных возмущений хорошо известны. Однако в данных

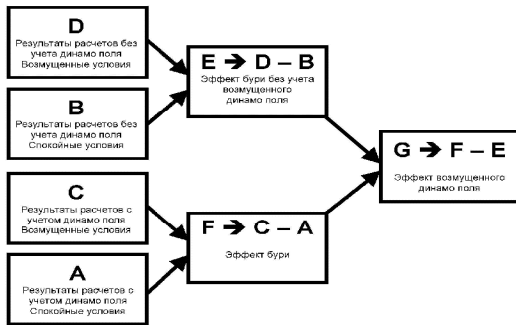


Рис. 2. Схема расчета эффектов бури и возмущенного динамо электрического поля.

Рассматриваемое явление и метод исследования

Данное исследование посвящено численному моделированию ионосферных эффектов геомагнитной бури 14–15 декабря 2006 г. На рис. 1 показано поведение индексов геомагнитной активности 13–18 декабря 2006 г. Исследования проводились с помощью Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), разработанной в Западном отделении ИЗМИРАН. Модель ГСМ ТИП, подробно описанная в (Namgaladze et al., 1988), была дополнена новым блоком расчета электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли (Клименко и др., 2006), что

позволило корректно описывать поведение электрического поля в ионосфере низких и экваториальных широт. Входные параметры модели при расчете ионосферных эффектов геомагнитной бури задавались так же, как и в (Klimenko et al., 2011). Отличительной особенностью данных расчетов является то, что мы учитывали 30 минутную задержку продольных токов второй зоны относительно изменений разности потенциалов через полярные шапки в течение всего рассматриваемого периода времени согласно (Vasyliūnas, 1970; Kikuchi et al., 2010). На рис. 1 также показано поведение входных параметров модели ГСМ ТИП, используемых при расчете эффектов геомагнитной бури. Высыпания энергичных частиц задавались согласно Zhang and Paxton (2008). Были выполнены четыре варианта расчетов (см. схему на рис. 2): для спокойных условий с учетом динамо поля (А), для спокойных условий без учета динамо поля (В), для возмущенных условий с учетом динамо поля (С) и для возмущенных условий без учета динамо поля (D). Таким образом, мы имеем возможность выделить ионосферные эффекты динамо поля в спокойных условиях (А – В), динамо поля во время возмущений (С – D), геомагнитной бури с учетом суперпозиции динамо поля и поля магнитосферной конвекции (С – А), геомагнитной бури без учета динамо электрического поля (D – В) и возмущенного динамо поля (D – В) – (С – А) = (А – В) – (С – D).

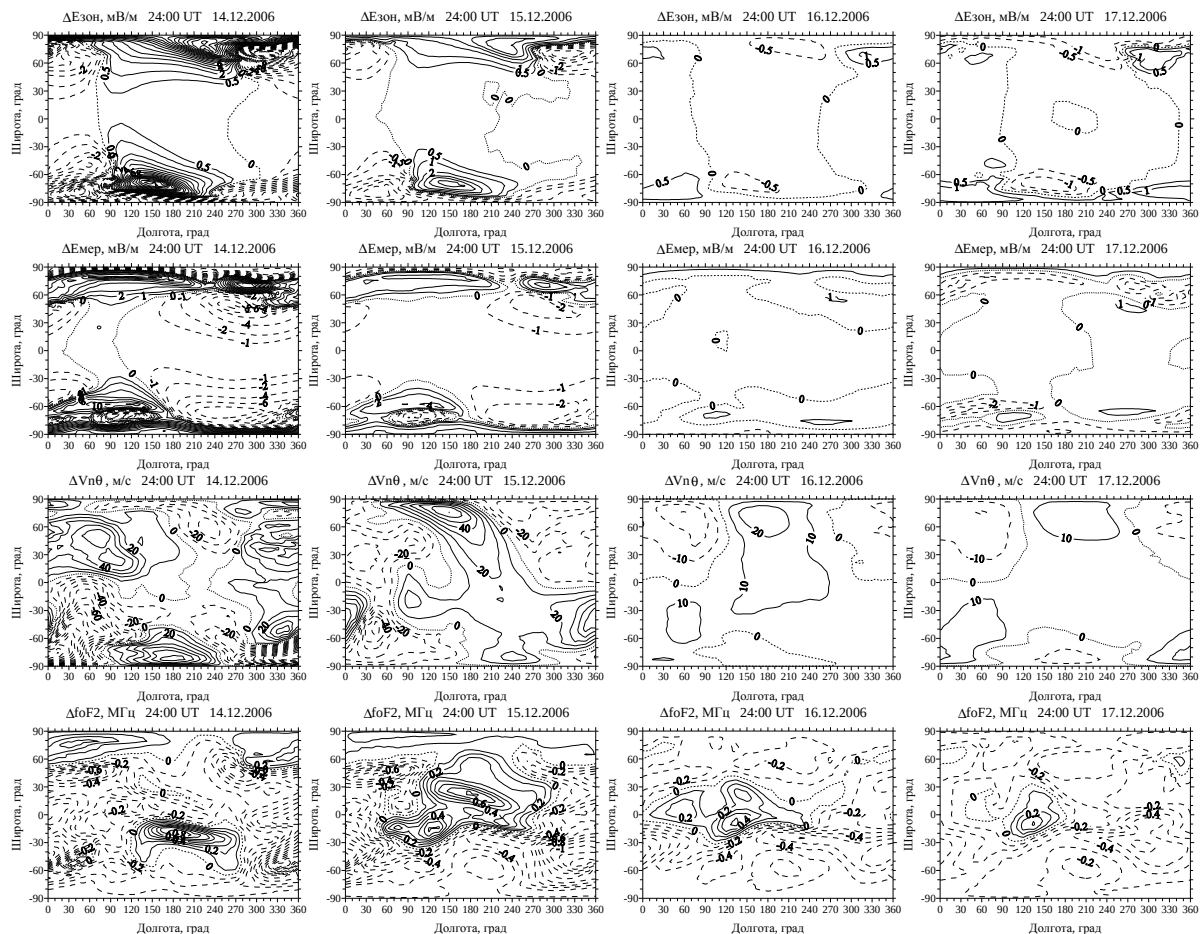


Рис. 3. Глобальные карты возмущений зонального и меридионального электрического поля, $\Delta E_{\text{зон}}$ и $\Delta E_{\text{мер}}$, меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, $\Delta V_{n\theta}$, и критической частоты F2-слоя ионосферы, $\Delta foF2$, полученные в модели ГСМ ТИП для периода геомагнитной бури в декабре 2006 г.

Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 3 показаны рассчитанные глобальные эффекты геомагнитной бури в зональном и меридиональном электрическом поле, меридиональной скорости термосферного ветра на высоте 300 км и критической частоте F2-слоя в 24:00 UT 14, 15, 16 и 17 декабря 2006 г. Видно прямое проникновение электрического поля магнитосферной конвекции (14 и 15 декабря), когда возмущение электрического поля направлено с утра на вечер, а также эффект сверхэкранирования (16 и 17 декабря), когда возмущение электрического поля направлено с вечера на утро. Отметим, что прямое проникновение электрического поля приводит к усилению экваториальной аномалии (ЭА), а сверхэкранирование приводит к ее ослаблению. Видно формирование возмущений термосферной циркуляции в авроральных областях за счет изменения Джоулева нагрева и распространение этих возмущений к экватору и в противоположное полушарие, что согласуется с результатами модельных расчетов *Lu et al.* (2008).

На рис. 4 показаны глобальные эффекты в зональном и меридиональном электрическом поле, меридиональном термосферном ветре и $foF2$, вызванные возмущенным динамо электрическим полем в 24:00 UT 14, 15, 16 и 17 декабря 2006 г. Отметим, что возмущенное динамо поле оказывает незначительное влияние на меридиональный термосферный ветер. Видно, что возмущенное динамо электрическое поле приводит к усилению восточного электрического поля на геомагнитном экваторе в дневное время, что приводит к усилению экваториальной аномалии. Возмущения $foF2$, вызванные возмущенным динамо полем, связаны с действием как зонального, так и меридионального $E \times B$ дрейфа плазмы. Эффекты зонального $E \times B$ дрейфа наиболее ярко проявляются в $foF2$ в области главного ионосферного провала. Также следует отметить существенную роль меридионального $E \times B$ дрейфа плазмы на низких широтах.

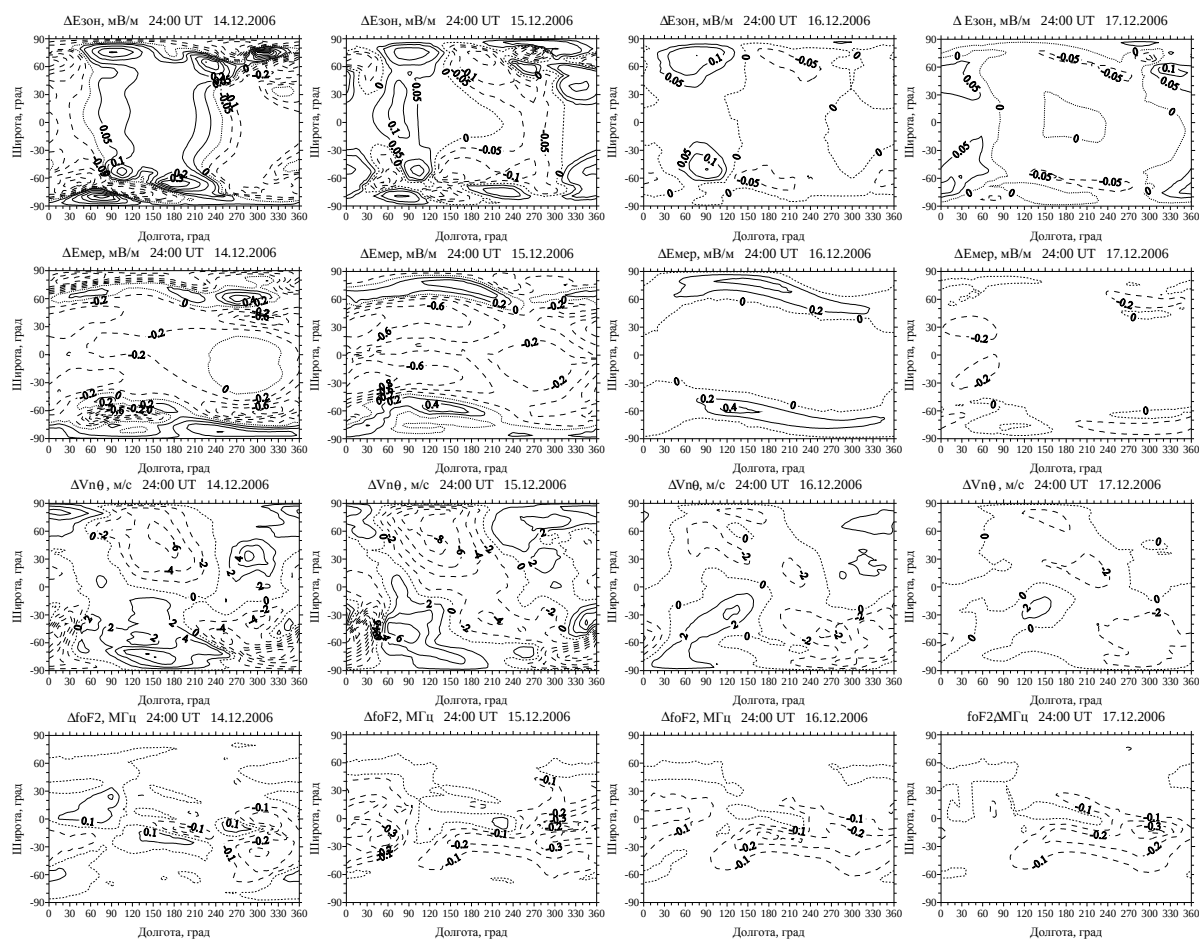


Рис. 4. Глобальные карты возмущенного динамо электрического поля $\Delta E_{зон}$ и $\Delta E_{мер}$ и вызванных им возмущений $\Delta V_{n\theta}$ и $\Delta foF2$, полученные в модели ГСМ ТИП для периода геомагнитной бури в декабре 2006 г.

Наши модельные расчеты показывают, что прямое проникновение электрического поля магнитосферной конвекции преобладает на ранних стадиях магнитосферных возмущений днем. Ночью эффекты прямого проникновения и возмущенного динамо поля сопоставимы. При этом, следует отметить, что вариации ионосферной проводимости на средних и низких широтах и скорости термосферного ветра, вызванные прямым проникновением электрического поля магнитосферной конвекции, могут изменять возмущенное динамо поле. В восстановительную фазу бури имеет место сверхэкранирование, которое также оказывает значительное влияние на глобальное распределение электрического поля.

Заключение

В настоящей работе получены эффекты возмущенного динамо поля, прямого проникновения и сверхэкранирования во время геомагнитной бури в декабре 2006 года. Показано, что учет динамо поля в спокойных условиях приводит к усилению экваториальной аномалии, понижению электронной плотности на геомагнитном экваторе ночью и небольшому росту электронной плотности в высокоширотной ионосфере.

Возмущенное динамо электрическое поле приводит к усилению дневной экваториальной аномалии. Прямое проникновение электрического поля происходит на начальных этапах геомагнитной бури при усилении геомагнитной активности. Прямое проникновение электрического поля приводит к усилению экваториальной ионизационной аномалии. Сверхэкранирование происходит в восстановительную фазу геомагнитной бури и приводит к ослаблению экваториальной аномалии.

Список литературы

- Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. (1967). *Космическая электродинамика*. М.: Мир. 260с.
- Денисенко В.В., Еркаев Н.В., Китаев А.В., Матвеев И.Т. (1992). *Математическое моделирование магнитосферных процессов*. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 197с.
- Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. (2006). Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет. *Геомагнетизм и аэронавигация*, 46(4), 485–494.
- Ляцкий В.Б. (1978). *Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений*. Л.: Наука. 198с.
- Blanc M., Richmond A.D. (1980). The ionospheric disturbance dynamo. *J. Geophys. Res.*, 85(A4), 1669–1686.
- Du J., Stening R.J. (1999). Simulating the ionospheric dynamo - II. Equatorial electric fields. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 61, 925–940.
- Gurevich A.V., Krylov A.L., Tsedilina E.E. (1976). Electric fields in the Earth's magnetosphere and ionosphere. *Space Sci. Revs.*, 19(1), 59–160.
- Harel M., Wolf R.A., Reiff P.H., Spiro R.W. (1981). Quantitative Simulation of a Magnetospheric Substorm. 1. Model Logic and Overview. *J. Geophys. Res.*, A86(4), 2217–2241.
- Kikuchi T., Ebihara Y., Hashimoto K.K., Kataoka R., Hori T., Watari S., Nishitani N. (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., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Vesnin A.M. (2011). 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:10.1029/2010RS004590.
- Lu G., Goncharenko L.P., Richmond A.D., Roble R.G., Aponte N. (2008). A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds. *J. Geophys. Res.*, 113(A8), doi:10.1029/2007JA012895.
- Maruyama N., Richmond A.D., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Sazykin S., Toffoletto F.R., Spiro R.W., Millward G.H. (2005). Interaction between direct penetration and disturbance dynamo electric fields in the storm-time equatorial ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 32(17), doi:10.1029/2005GL023763.
- Mayr H.G., Volland H. (1973). Magnetic Storm Characteristics of the Thermosphere. *J. Geophys. Res.*, 78(13), 2251–2264.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushenko T.A., Naumova N.M. (1988). Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System. *PAGEOPH*, 127(2/3), 219–254.
- Richmond A.D. (1979). Ionospheric wind dynamo theory. A review. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 31(3), 287–310.
- Richmond A.D. (2011). Electrodynamics of Ionosphere–Thermosphere Coupling. In: *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*, Abdu M.A., Pancheva D. (Eds.), Bhattacharyya A. (Coed.), IAGA Special Sopron Book Series, Vol. 2, Part 3, Springer Science, 191–201, doi: 10.1007/978-94-007-0326-113.
- Richmond A.D., Matsushita S. (1975). Thermospheric response to a magnetic substorm. *J. Geophys. Res.*, 80, 2839–2850.
- Toffoletto F.R., Sazykin S., Spiro R.W., Wolf R.A., Lyon J.G. (2004). RCM meets LFM: initial results of one-way coupling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 66, 1361–1370.
- 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.
- Wolf R.A., Jaggi R.K. (1973). Can the magnetospheric electric field penetrate to the low-latitude ionosphere? *Comm. Astrophys. Space Phys.*, 5(4), 99.
- Wolf R.A., Spiro R.W., Sazykin S., Toffoletto F.R. (2007). How the Earth's inner magnetosphere works: An evolving picture. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 69(3), 288–302.
- 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.