

ВОЗМУЩЕНИЯ В ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ ИОНОСФЕРЫ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ В ГАИТИ 12 ЯНВАРЯ 2010 Г.: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.А. Намгаладзе¹, О.В. Золотов¹, Б.Е. Прохоров^{2,3}

¹ Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия; ZolotovO@gmail.com

² Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, Potsdam, Germany

³ University Potsdam, Applied Mathematics, Interdisciplinary Center for Dynamics of Complex Systems (DYCOS), 14476 Potsdam, Germany

Abstract. Regular GPS (Global Positioning System) observations provided by the IGS (International GNSS Service) community have been analyzed and differential TEC maps have been built for the period of Jan. 1-14, 2010. Significant TEC disturbances have been discriminated before the Haiti Jan. 12, 2010 earthquake: TEC increases near the epicenter and magnetically conjugated areas, stronger by magnitude at the Southern hemisphere; migration of anomalies to the night-side and full destruction at daytime with the terminator and subsolar point approaching. External electric current between the Earth and the ionosphere flowing over the fault has been considered as cause of the corresponding electric field and electromagnetic $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$ drift of the F2-layer ionospheric plasma. Vertical plasma transportation to the region with high/low loss rates leads to formation of the anomalous TEC disturbances. This hypothetical external electric current has been used as input for the electric potential equation in the first-principle numerical time-dependent 3D Upper Atmosphere Model (UAM) calculations. UAM TEC simulation results agree with the TEC observations by magnitude and geometrical characteristics when external current density has magnitude of about $2 \cdot 10^{-8}$ A/m² in the area of about 200 km along the meridian and 4000 km along the parallel. Some recommendations on pre-seismic TEC signatures for the forthcoming shock events are given.

Введение

Настоящая работа является продолжением наших исследований по изучению воздействия на ионосферу электрических полей сейсмического происхождения. Вариации полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы анализировались на примере землетрясения 12 января 2010 г. в 21:53:10 UT (16:53:10 LT) Гаити. Согласно данным USGS (U.S. Geological Survey) магнитуда землетрясения составила M 7.0, географические координаты эпицентра — (18.443°N, 72.571°W), глубина залегания гипоцентра — D 13 км.

Данное землетрясение исследовалось рядом авторов. Так, Пулинец и Цыбуля [2010] на основе анализа широтно-временных вариаций ПЭС на географической широте, ближайшей к эпицентру землетрясения (20°), построенных с помощью карт ПЭС установили следующие особенности этих вариаций: искажение формы экваториальной аномалии; общее уменьшение электронного содержания в экваториальной аномалии в дни, предшествующие землетрясению; локальное увеличение электронной концентрации в области ионосферы на широте эпицентра; усиление дополнительного максимума на широте 30°N и формирование дополнительного максимума в магнитосопряженной точке.

Akhoondzadeh and Saradjian [2011] анализировали для этого же землетрясения временные вариации ПЭС, полученные по глобальным картам полного электронного содержания в ближайшем к эпицентру землетрясения узле (15°S, 170°W), с использованием

методов (1) интерквартильного анализа, (2) вейвлет-преобразований и (3) калмановской фильтрации. Авторы ограничиваются заключением, что все три метода обнаружили аномальные вариации ПЭС, трактуемые как предвестники, в интервале 1-15 дней до землетрясения. Тем не менее, анализ рис. 4 в их работе позволяет получить больше информации: предвестники преимущественно наблюдались за 1-4 дня до землетрясения всеми методами, время существования проявления аномалии соответствует 00-08 LT и 14-20 LT для случая интерквартильного анализа, 14-20 LT для вейвлет-анализа, 02-12 LT и 14-20 LT для калмановской фильтрации, т.е. отсутствуют в околополуденные часы.

Мы также исследовали морфологические особенности вариаций ПЭС перед землетрясением 12 января 2010 г., Гаити [Золотов и др., 2011]. В отличие от работы [Пулинец и Цыбуля, 2010] рассматривались не широтно-временные вариации, а пространственные карты ПЭС, рассчитывались отклонения не в абсолютных единицах (TECU), а относительные (в %) отклонения от фоновых значений. В отличие от работы [Akhoondzadeh and Saradjian, 2011] мы не ограничивались одноточечными наблюдениями в эпицентре, что позволило нам определить не только время и режим существования аномалий, но и их пространственные характеристики, такие как линейные размеры, привязка к географическому месту, наличие магнитосопряженных эффектов.

Намгаладзе [2007] предложил в качестве возможного физического механизма формирования таких аномальных вариаций ПЭС вертикальный электромагнитный $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$ дрейф ионосферной плазмы F2-слоя под воздействием зонального электрического поля сейсмического происхождения.

Наблюдения

Геомагнитная ситуация 1-12 января 2010 г. была спокойная, т.е. наблюдавшиеся возмущения в ПЭС ионосферы не являлись следствием геомагнитной активности.

Мы рассчитали карты отклонений ПЭС от невозмущенного состояния с использованием глобальных двухчасовых карт ПЭМ [Dow et al., 2009]. Фоновые значения определялись как скользящее среднее за период 7 дней до рассчитываемого момента, с группировкой усредняемых значений по моментам местного времени MLT.

На рис. 1 представлены рассчитанные дифференциальные региональные карты отклонений ПЭС. Из них следует: повышенные значения ПЭС наблюдались 06-14UT 9 января 2010 г., 12-14UT 10 января, 08-16UT 11 января и 04-10UT 12 января 2010 г. Величина положительных возмущений составила более 50% по сравнению с фоном. Эти увеличения были локализованы в эпицентральной области и магнитосопряженной к ней. Амплитуда аномалии в магнитосопряженной области была существенно больше, чем в эпицентре. Наблюдались также слабые (около 15%) отрицательные возмущения, расположенные западнее и экваториальнее областей повышенного ПЭС. Существование аномалий ограничено ночным, утренним и вечерним временем. Приближение терминатора и подсолнечной точки, т.е. приход освещенной хорошо проводящей ионосферы, приводил к смещению аномалий в затененную область и их последующему уничтожению.

Численный эксперимент

Для воспроизведения наблюдавшихся возмущений ПЭС использовалась численная модель верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model) [Namgaladze et al., 1988, 1991, 1998a, 1998b]. Ранее мы моделировали эффекты сейсмогенных электрических полей путем наложения дополнительных электрических потенциалов на границах эпицентральной области на решение уравнения для электрического потенциала модели UAM [Намгаладзе и др., 2009; Zolotov et al., 2008]. Однако более физически обоснованным представляется задание стороннего тока, например, аналогично Sorokin et al. [2005, 2007]. Физическая природа этого тока – вертикальный конвективный перенос заряженных аэрозолей, формируемых при дополнительной ионизации приземного воздуха радиоактивным излучением эманлирующего над

разломами радона. В работе [Freund, 2011] предложен другой механизм формирования стороннего электрического тока — за счет ионизации приземного слоя атмосферы электрическим полем, порожденным в результате выхода на поверхность носителей зарядов, так называемых «положительных дыр», под действием сдвигания сближающихся плит. Ф. Фройнд считает этот механизм более эффективным источником ионизации, чем действие радона, способным создавать вертикальный ток $10\text{--}100\text{ А/км}^2$, что на 7-8 порядков превышает обычный ток “хорошей погоды” между Землей и ионосферой ($1\text{--}3\text{ пА/м}^2$).

В настоящей работе вертикальный ток, текущий между нижней атмосферой и ионосферой, задавался величиной $2 \cdot 10^{-8}\text{ А/м}^2$ на площадке $200\text{ км} \times 4000\text{ км}$ в постоянном режиме в течение модельных суток.

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Обсуждение и выводы

Из рис. 1-2 следует: результаты моделирования со сторонним электрическим током, текущим между нижней атмосферой и ионосферой из-за изменения проводимости нижележащего атмосферного столба, воспроизводят основные наблюдавшиеся особенности вариаций ПЭС. Как в наблюдениях, так и в модельном случае: (1) существуют области повышенной электронной концентрации, локализованные вблизи эпицентра. (2) Есть магнитная сопряженность эффектов. (3) Возмущения ПЭС в магнитосопряженной области сильнее, чем в эпицентральной. (4) Магнитуда положительных возмущений достигает 50% и более. (5) Присутствуют области пониженных значений ПЭС, расположенные западнее и экваториальнее положительных возмущений. (6) Приход терминатора и освещенной хорошо проводящей ионосферы приводит к смещению и последующей полной деструкции аномалий как в эпицентре, так и в магнитосопряженной точке. (7) Аномалии отсутствуют в околополуденные часы, времена их жизни согласуются с исследованием [Akhoondzadeh and Saradjian, 2011]. Морфологические характеристики согласуются с работой [Пулинец и Цыбуля, 2010].

При этом имеется ряд различий между наблюдениями и модельными расчетами: (1) модельные расчеты занижают величину аномалии в северном полушарии и завышают в южном по сравнению с наблюдениями. (2) Отрицательные возмущения в модельном случае по магнитуде больше, чем в наблюдениях. (3) Площадь, занимаемая областями повышенного ПЭС в модельном случае меньше, чем в наблюдениях. (4) Форма изолиний и величина возмущений в модельном случае и наблюдениях

не совпадают полностью, но и не слишком сильно различаются и зависят от интенсивности и конфигурации задаваемого тока. Расхождение расчетов с наблюдениями может быть обусловлено слишком упрощенным представлением — линейным — источника стороннего электрического тока, распределения его плотности и выбранным режимом действия.

Эффекты ночного доминирования, наличие околополуденного «окна несуществования», разрушения с приходом терминатора положительных аномалий ПЭС могут быть объяснены изменением ионосферной проводимости, связанным с приходом освещенной хорошо проводящей ионосферы, приводящим к снятию потенциала и исчезновению генерированного сторонним током электрического поля.

Величина стороннего тока в наших модельных расчетах, требуемого для воспроизведения наблюдавшихся возмущений ПЭС, значительно меньше, чем в работах Sorokin et al.[2005], Freund[2011]. Модельные возмущения ПЭС повторяли поведение электрического потенциала (и поля), т.е. исчезали с приходом терминатора и подсолнечной точки в результате снятия поля, но с временным лагом в 2-4 часа, что может быть объяснено инерцией ионосферы.

Авторы благодарят (1) NOAA National Geophysical Data Center / NGDC за Ap, Kp и Dst индексы; (2) U.S. Geological Survey and National Earthquake Information Center за данные по землетрясению 12 января 2010 г. в Гаити; (3) IGS-сообщество и Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) за глобальные карты ПЭС [Noll, 2010]; (4) University of Hawaii и GMT-сообщество за General Mapping Tools [Wessel and Smith, 1998].

Список литературы

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 526с. 1988.

Золотов О.В., Прохоров Б.Е., Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В. Вариации полного электронного содержания ионосферы в период подготовки землетрясений // Химическая Физика. Т. 30. № 5. С. 84-87. 2011. doi: 10.1134/S1990793111030146

Намгаладзе А.А. О возможных физических механизмах формирования ионосферных предвестников землетрясений // Труды межд. науч. тех. конф. “Наука и образование – 2007” (Мурманск, 4-13 апреля 2007 г.) С. 358-362. 2007.

Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании // Геомагнетизм и Аэронавигация. Т.49. №2. С. 267-277. 2009.

Пулинец С.А., Цыбуля К.Г. Уникальные вариации полного электронного содержания в период

подготовки землетрясения на Гаити (M7.9) 12 января 2010 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. № 5. С. 713-716. 2010.

Akhoondzadeh M., Saradjian M.R. TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes // Adv. Space Res. V. 47. N. 1. P. 94-104. 2011.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. of Geodesy. P. 191-198. 2009. doi:10.1007/s00190-008-0300-3.

Freund F. Pre-earthquake signals: Underlying physical processes // J. of Asian Earth Sciences. 2011. doi:10.1016/j.jseaes.2010.03.009 (in Press)

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 // Pure and Applied Geophysics. V. 127. N.2/3. P. 219-254. 1988. doi:10.1007/BF00879812.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M. Numerical modeling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // J. Atmos. Terr. Phys. V.53. N.11/12. P. 1113-1124. 1991. doi:10.1016/0021-9169(91)90060-K.

Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N. Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step // Int. J. Geomagnetism and Aeronomy. V.1. N.1. P. 53-58. 1998a.

Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Volkov M.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu. High-latitude version of the global numeric model of the Earth's upper atmosphere // Proc. of the MSTU. V.1. N.2. P. 23-84. 1998b. URL: <http://goo.gl/8x9f2>

Noll C. The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy // Adv. Space Res. V.45. N.12. P. 1421-1440. 2010.

Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., Hayakawa M. DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults // Nat. Haz. Earth System Sci. V.5. P. 661-666. 2005.

Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M. A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity // Nat. Haz. Earth System Sci. V.7. P. 155-163. 2007.

Wessel P., Smith W.H.F. New, improved version of Generic Mapping Tools released // EOS trans. V.79. P. 579. 1998.

Zolotov O.V., Namgaladze A.A., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Martynenko O.V. Modeling of the ionospheric earthquake precursors generated by various electric field sources // XXIX General Assembly of URSI. Chicago, USA. HP-HGE.21. 2008.

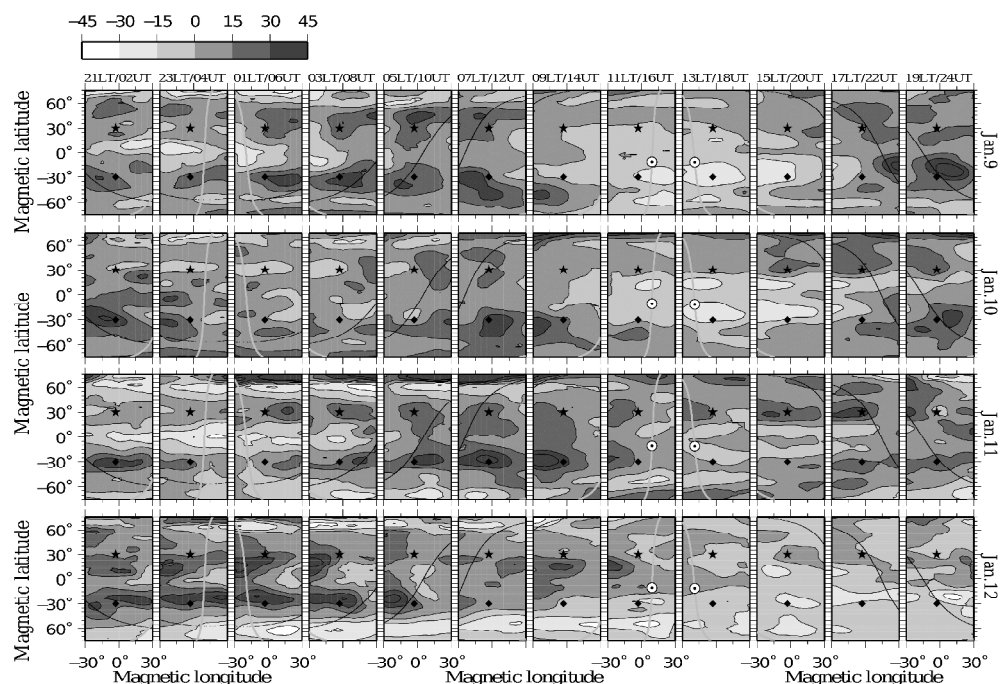


Рис. 1. Региональные дифференциальные карты относительных отклонений ПЭС от фоновой (невозмущенной) вариации для 09-12 января 2010 г. (сверху вниз), 02UT-24UT (слева направо), Гаити. Звезда — эпицентр землетрясения; ромб — магнитосопреженная точка; белый круг с черной точкой — подсолнечная точка, серая кривая — полуденно-полуночный меридиан, черная кривая — терминатор.

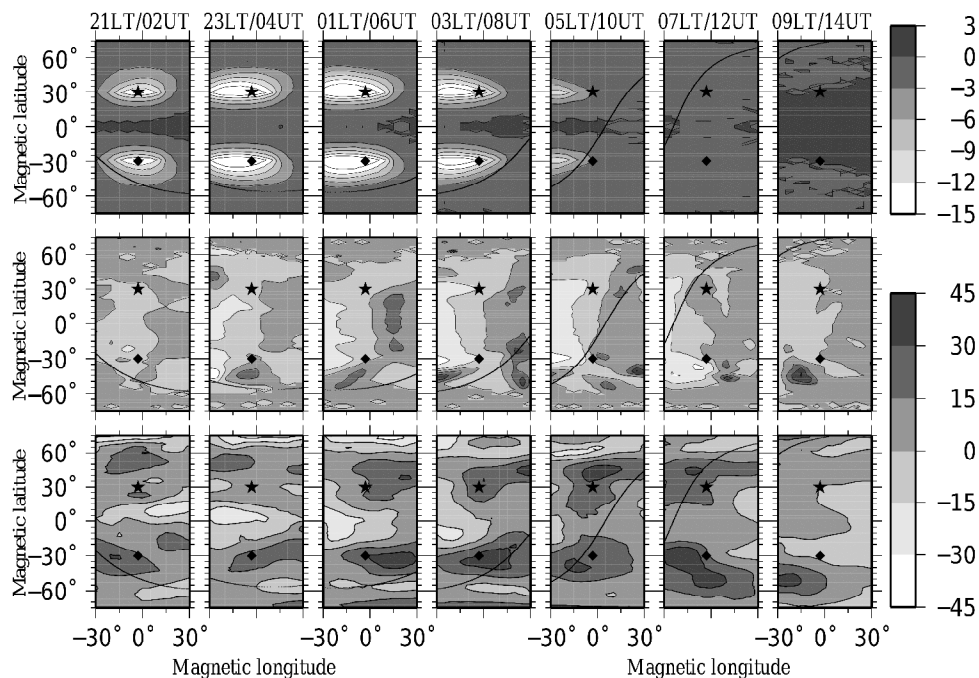


Рис. 2. Модельные возмущения электрического потенциала (сверху), кВ; полного электронного содержания (в центре), %; наблюдавшиеся возмущения ПЭС, % (снизу).