

УДК 550.37

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ, НАБЛЮДАВШИХСЯ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 12 ЯНВАРЯ 2010 г. НА О-ВЕ ГАИТИ

© 2013 г. А. А. Намгаладзе<sup>1</sup>, О. В. Золотов<sup>1</sup>, Б. Е. Прохоров<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск

<sup>2</sup>Центр им. Гельмгольца, Центр исследования Земли, г. Потсдам, Германия

<sup>3</sup>Университет г. Потсдам, Институт прикладной математики, Междисциплинарный центр динамики сложных систем, г. Потсдам, Германия  
e-mail: ZolotovO@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2011 г.

После доработки 03.08.2012 г.

В работе представлены результаты исследования аномальных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, наблюдавшихся перед землетрясением 12 января 2010 г. на о-ве Гаити. Построены глобальные и региональные карты отклонений ПЭС от спокойного фонового состояния для 09–12 января 2010 г. С помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model) рассчитаны вариации электрического потенциала в ионосфере и ПЭС с использованием стороннего тока сейсмического происхождения, текущего над разломами между Землей и ионосферой, в качестве нижнего граничного условия. Результаты модельных расчетов сопоставлены с наблюдениями. Показано, что расчетные вариации ПЭС при задании плотности тока  $\sim 1 \times 10^{-8}$  А/м<sup>2</sup> на площади 200 км (широта)  $\times$  4000 км (долгота) над эпицентром отражают все основные особенности наблюдений: доминирование увеличений ПЭС (положительных возмущений), соседство с ними отрицательных возмущений меньшей магнитуды, привязку к месту (локализацию), магнитную сопряженность эффектов с большей интенсивностью в южном полушарии, исчезновение возмущений в околополуденные часы. Даны методологические рекомендации для обнаружения вариаций ПЭС, связанных с подготовкой сейсмических событий.

DOI: 10.7868/S0016794013030140

### 1. ВВЕДЕНИЕ

12 января 2010 г. в 21:53:10 UT (16:53:10 LT) на о-ве Гаити произошло разрушительное землетрясение. Согласно данным USGS (U.S. Geological Survey) магнитуда землетрясения составила  $M 7.0$ , координаты эпицентра – (18.443° N, 72.571° W), глубина залегания гипоцентра –  $D 13$  км. За период с 12.01.2010 г. 21:53 UT по 23.02.2010 17:00 UT USGS NEIC (National Earthquake Information Center) зафиксировал 59 афтершоков магнитудой  $M 4.5$  и более, в том числе 16 афтершоков магнитудой  $M 5.0$  и более. Афтершок максимальной амплитуды –  $M 6.0$  – произошел через 7 мин после основного сейсмического события. По официальным оценкам в результате землетрясения погибло 222570 человек, 300000 пострадавших, 1.3 млн. беженцев.

Естественным для многих исследователей является желание исследовать вариации различных физических параметров перед землетрясениями в поисках их возможных предвестников. С появлением GPS (Global Positioning System)-сетей наземных приемников [Dow et al., 2009] и глобальных карт полного электронного содержания

(ПЭС) ионосферы для этих целей стал широко применяться анализ аномалий в вариациях ПЭС ионосферы. Намгаладзе [2007] предложил в качестве возможного физического механизма формирования таких аномальных вариаций ПЭС вертикальный электромагнитный  $[\mathbf{E} \times \mathbf{V}]$  дрейф ионосферной плазмы  $F2$ -слоя под воздействием зонального электрического поля сейсмического происхождения. На средних широтах вертикальная составляющая электромагнитного дрейфа, создаваемая восточным полем и направленная вверх, приводит к увеличению электронной концентрации в максимуме  $F2$ -слоя ( $NmF2$ ) за счет переноса плазмы в области с меньшей концентрацией нейтральных молекул  $O_2$  и  $N_2$  и, соответственно, с меньшей скоростью потерь в ионно-молекулярных реакциях ионов  $O^+$ , доминирующих в  $F2$ -слое [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Поле противоположного направления (западное – вертикальная составляющая дрейфа направлена вниз) вызывает противоположный – отрицательный – эффект в ПЭС.

Для землетрясения 12 января 2010 г. на о-ве Гаити Пулинец и Цыбуля [2010] на основе анализа широтно-временных вариаций ПЭС на геогра-

фической широте, ближайшей к эпицентру землетрясения ( $20^\circ$ ), построенных с помощью карт ПЭС (предоставляемых IGS – International GNSS Service), 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  $30^\circ$  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 ( $15^\circ$  S,  $170^\circ$  W), с использованием методов интерквартильного анализа, вейвлет-анализа и калмановской фильтрации. Все три метода обнаружили аномальные вариации ПЭС, трактуемые как предвестники, в интервале 1–15 дней до землетрясения. При этом, как следует из рис. 4 в работе [Akhoondzadeh and Saradjian, 2011], 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. Таким образом, существует околополуденное “окно”, когда аномалии отсутствуют.

Мы также исследовали морфологические особенности вариаций ПЭС перед землетрясением 12 января 2010 г., Гаити [Prokhorov et al., 2010; Zolotov et al., 2010; Золотов и др., 2011]. В отличие от работы [Пулинец и Цыбуля, 2010] нами 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.

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования возмущений ПЭС, наблюдавшихся в период подготовки землетрясения 12 января 2010 г., Гаити, производится их сопоставление с GPS-наблюдениями по данным сети IGS.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Существенно облегчило задачу выявления сейсмо-ионосферных возмущений то обстоятельство, что геомагнитная ситуация в течение 1–12 января 2010 г. была спокойная: *Ap*-индекс был преимущественно меньше 6 нТл; *Kp*-индекс не превосходил 2; *Dst*-индекс составлял  $\sim 20$  нТл. Таким образом, наблюдавшиеся возмущения в ПЭС ионосферы не являлись следствием геомагнитной активности.

Для определения пространственных характеристик ионосферного отклика на исследуемое сейсмическое событие в качестве исходных данных для анализа использовались глобальные и региональные дифференциальные карты отклонений ПЭС от невозмущенного состояния, вычисленные с использованием глобальных двухчасовых карт полного электронного содержания, предоставленных NASA научному сообществу в формате IONEX (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>) [Dow et al., 2009]. Пространственное разрешение этих карт составляет  $5^\circ$  по долготе и  $2.5^\circ$  по широте. Фоновые невозмущенные значения вариации определялись как скользящее среднее за период 7 дней до рассчитываемого момента, с группировкой усредняемых значений по моментам местного времени MLT.

На рисунке 1 представлены рассчитанные дифференциальные региональные карты отклонений ПЭС. Из них следует, что повышенные значения ПЭС наблюдались в 06–14 UT 9 января 2010 г., 12–14 UT 10 января, 08–16 UT 11 января и 04–10 UT 12 января 2010 г. Величина положительных возмущений составила более 50% по сравнению с фоновыми значениями. 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 ( $\sim 15\%$ ) 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 исчезновению.

## 3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для воспроизведения наблюдавшихся возмущений ПЭС использовалась численная модель верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model) [Namgaladze et al., 1988, 1991, 1998a, 1998b]. UAM описывает мезосферу, термосферу, ионосферу, плазмосферу и внутреннюю магнитосферу околоземного космического пространства

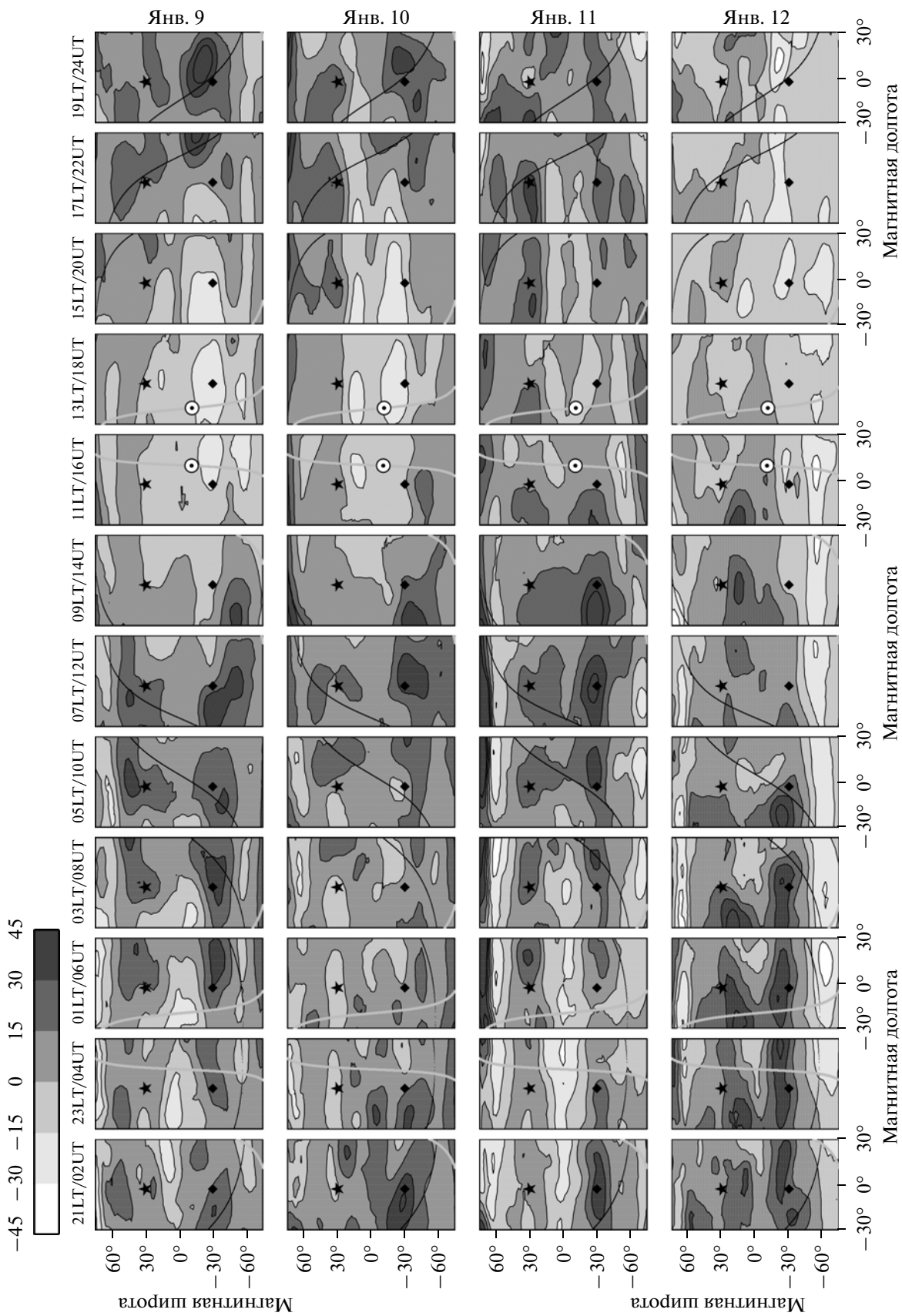


Рис. 1. Региональные дифференциальные карты отклонений (в %) ПЭС от фоновых (невозмущенных) значений для 09–12 января 2010 г. (сверху вниз), 02 UT–24 UT (слева направо). Звезда – эпицентр землетрясения 12.01.2010 г., Гаити; ромб – магнитосопряженная с эпицентром точка; круг с точкой – подсолнечная точка; серая кривая – полуденно-полуночный меридиан; черная кривая – терминатор.

как единую систему посредством численного интегрирования соответствующих нестационарных трехмерных уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтрального, ионного и электронного газов совместно с уравнением для электрического потенциала. Модель рассчитывает плотности основных нейтральных ( $O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H$ ) и заряженных ( $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $O^+$ ,  $H^+$ , электроны) компонент верхней атмосферы Земли; температуры нейтрального, ионного и электронного газов; три компонента вектора скорости для нейтральных и заряженных частиц; электрический потенциал и три компонента вектора электрического поля. Модель охватывает диапазон высот от 80 км до 15-ти земных радиусов с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. В UAM инкорпорирован ряд эмпирических моделей, таких как модель нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002], горизонтального термосферного ветра HWM-93 [Hedin et al., 1996], ионосферы IRI-2001 [Bilitza, 2001], что позволяет получать значения параметров термосферы или ионосферы из этих эмпирических моделей в любой комбинации и, используя их, рассчитывать недостающие. Такой подход расширяет возможности ее применения как с целью проверки адекватности самой модели UAM, так и других, инкорпорированных в нее.

Модель UAM позволяет также отключать/включать те или иные процессы, влияющие на вариации параметров верхней атмосферы. Как правило, это реализуется путем исключения/включения из уравнений членов, отвечающих за учет того или иного процесса.

Ранее эффекты сейсмогенных электрических полей для низких и средних широт моделировались путем задания дополнительных электрических потенциалов на границах эпицентральной области и использования такого возмущенного электрического потенциала при решении остальных уравнений модели UAM [Намгаладзе и др., 2009; Zolotov et al., 2008; Золотов и др., 2012]. Однако такой подход жесткой “фиксации” потенциала на полные сутки не может быть физически оправдан, т.к. в дневной ионосфере с повышенной проводимостью дополнительное электрическое поле должно значительно ослабевать по сравнению с ночными условиями. Более физически обоснованным представляется задание стороннего тока, например, аналогично тому, как это сделано в работах [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. F. Freund [2011] 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 мы моделируем вариации ПЭС путем задания не потенциалов, но сторонних токов в околоэпицентральной области на нижней границе ионосферы (80 км) в качестве граничных условий для уравнения электрического потенциала, с последующим совместным решением всех уравнений модели. Вертикальный ток, текущий между нижней атмосферой и ионосферой, задавался в 9-ти вытянутых вдоль магнитной параллели ячейках. Величина шага составляла  $5^\circ$ . Магнитуда, вносимая в каждый узел, составляла  $2 \times 10^{-8}\text{ А/м}^2$ , что соответствует стороннему току плотностью  $1 \times 10^{-8}\text{ А/м}^2$  на площадке  $200\text{ км} \times 4000\text{ км}$  ( $2^\circ$  вдоль меридиана и  $9^\circ$  вдоль параллели) в постоянном режиме в течение модельных суток.

Результаты моделирования представлены на рис. 2, из которого видно доминирование областей повышенного ПЭС ночью и их исчезновение в околополуденные часы, существование рядом с ними отрицательных возмущений, локализация этих эффектов в эпицентральной области и их магнитная сопряженность. Интенсивность возмущений в южном полушарии больше, чем в северном. Созданный заданным вертикальным током электрический потенциал и соответствующее электрическое поле, а также эффекты в ПЭС исчезают, становятся незначительными с приходом терминатора и подсолнечной точки. Между ослаблением поля и исчезновением положительных возмущений ПЭС существует временная задержка (запаздывание) порядка 2–4 ч.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численного эксперимента со сторонним электрическим током, текущим между нижней атмосферой и ионосферой, 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

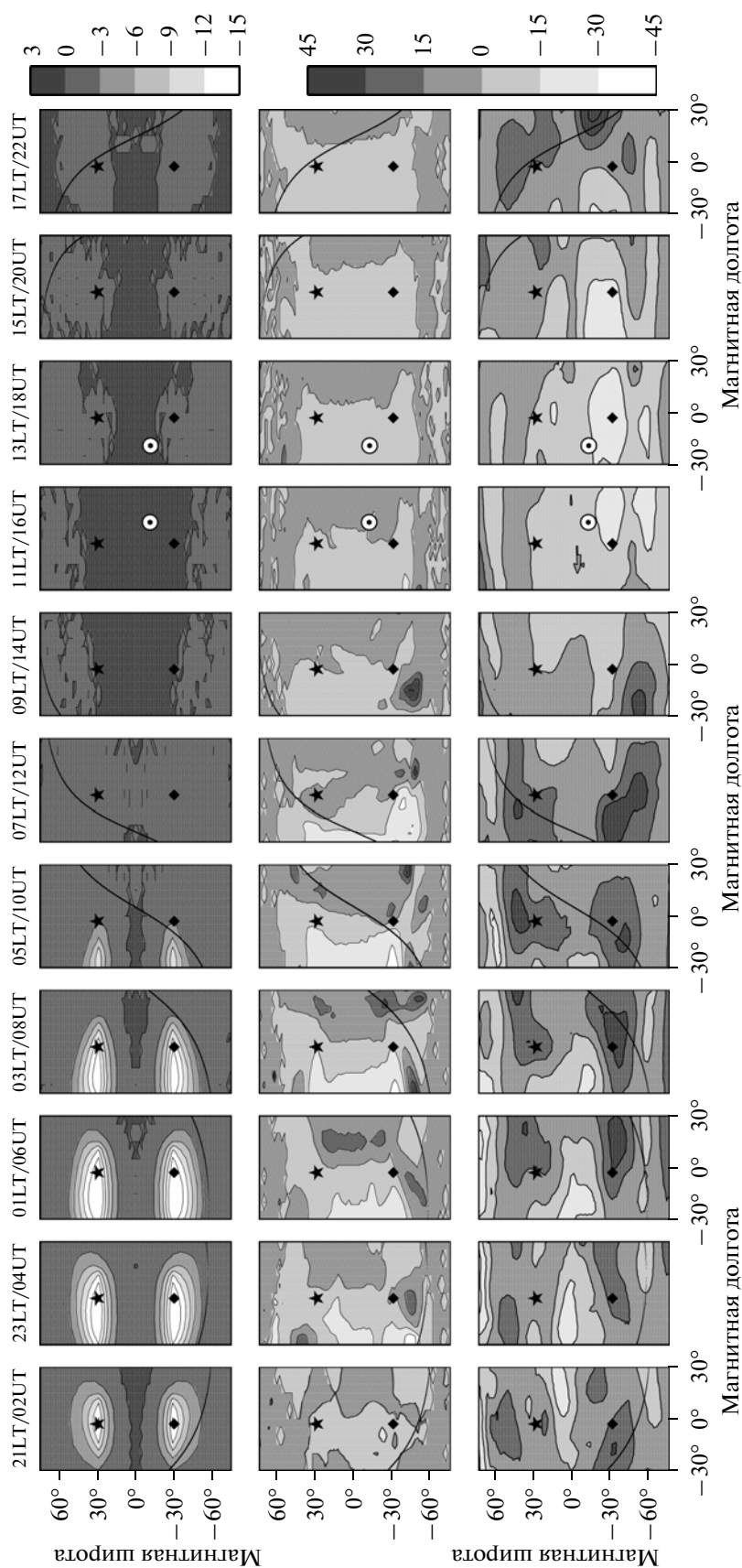


Рис. 2. Рассчитанные по модели UAM возмущения электрического потенциала, кВ (верхний ряд), модельные возмущения ПЭС, % (средний ряд); наблюдающиеся возмущения ПЭС, % (нижний ряд).

и экваториальнее положительных возмущений; б) 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 амплитуде 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 в наблюдениях совпадают не полностью, но и не слишком сильно различаются: (а) размер аномальной области в северном полушарии составляет на уровне  $\sim 30^\circ \sim 15^\circ \times \sim 15^\circ$  (долгота  $\times$  широта) в наблюдениях; в модельном случае —  $\sim 10^\circ \times \sim 10^\circ$ ; (б) в южном полушарии область возмущения составляет  $\sim (7-15)^\circ \times \sim (7-20)^\circ$  на уровне  $>50\%$  в наблюдениях; в численном эксперименте —  $\sim (5-13)^\circ \times \sim (7-15)^\circ$  на том же уровне.

Так как величина модельного возмущения, форма изолиний и занимаемая площадь зависят от интенсивности и конфигурации задаваемого тока, то 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, приводящей к ослаблению генерированного сторонним током электрического поля.

Величина плотности стороннего тока, заданная на нижней границе с амплитудой  $2 \times 10^{-8}$  А/м<sup>2</sup> на площади  $200 \text{ км} \times 4000 \text{ км}$ , значительно меньше, чем в работах Sorokin et al. [2005, 2007], где задавались плотности тока величиной порядка  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup> в области радиусом  $200 \text{ км}$  с экспоненциальным спаданием до нуля на ее границе, и также существенно меньше оценок  $10-100 \text{ А/км}^2$ , приведенных в работе [Freund, 2011]. Полученные в настоящей работе оценки величины стороннего тока сейсмического происхождения, требуемого для создания наблюдаемых возмущений ПЭС ( $>50\%$ ), близки к верхним пределам измеренных

вертикальных токов над грозовыми областями и тропическими лесами [Kridner and Musser, 1982; Blakeslee et al., 1989; Davydenko et al., 2009; Le Mouél et al., 2010] и полного тока в глобальной электрической цепи [Le Mouél et al., 2010], но не выходят за эти пределы.

Очевидно, что такие интенсивные токи не могут существовать долго (более 2–4 сут), они соответствуют экстремальным ситуациям подготовки очень сильных землетрясений, сопровождающимся появлением вблизи тектонических разломов мощных источников ионизации (радон, потенциальные дыры) и большими (в десятки процентов) возмущениями ПЭС. Их выявление затруднено отсутствием достаточно густой сети регулярных измерений именно вертикальных токов, а не электрических (требующих знания проводимости) или магнитных (зашумленных полями от ионосферных и магнитосферных токов) полей. Но их существование косвенно подтверждается наблюдениями вблизи эпицентров готовящихся землетрясений стабильных магнитосопряженных возмущений ПЭС, не перемещающихся вдоль меридиана, и соответствующими модельными расчетами.

## 5. ВЫВОДЫ

В работе исследованы вариации в ПЭС ионосферы, наблюдавшиеся с помощью GPS/GNSS, перед сильным землетрясением 12 января 2010 г., на о-ве Гаити. На основе анализа глобальных и региональных карт ПЭС установлено доминирование повышенных значений ПЭС ночью в околоэпицентральной и магнитосопряженной областях. Наблюдались также слабые ( $\sim 15\%$ ) области пониженных значений ПЭС, расположенные западнее и экваториальнее положительных возмущений. Приход терминатора и освещенной хорошо проводящей ионосферы приводит к смещению и полной деструкции аномалий как в эпицентре, так и в магнитосопряженной точке. Эти особенности поведения ПЭС удалось воспроизвести в численных расчетах, выполненных с использованием глобальной модели верхней атмосферы Земли UAM, при задании на нижней границе ионосферы в качестве нижних граничных условий стороннего электрического тока, текущего над разломами между Землей и ионосферой.

Величина стороннего тока в наших модельных расчетах, необходимого 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 ослабления поля, но с временным лагом в 2–4 ч, что может быть объяснено инерционностью процессов в ионосфере.

И в модельном случае, и в наблюдениях возмущения локализованы в околоэпицентральной и магнитосопряженной областях. Магнитуда возмущений больше в магнитосопряженном секторе в южном полушарии, аномалии исчезают днем. Форма изолиний и величина возмущений в модельном случае и наблюдениях не совпадают полностью, но и не сильно различаются. Модельные положительные возмущения занимают меньшую площадь, чем в наблюдениях. Расхождение расчетов с экспериментов может быть обусловлено слишком упрощенным представлением – линейным – источника стороннего электрического тока, плотности его распределения и выбранным режимом действия.

Полагая сторонний электрический ток в качестве основной причины наблюдаемых аномалий, можно предложить схему развития аномалий ПЭС ионосферы перед землетрясениями: 1) появление локализованной аномалии в ПЭС и ее существование как минимум в течение 4–6 ч ночью в околоэпицентральной области и магнитосопряженной к ней; 2) аномалии противоположного знака должны наблюдаться по соседству с возмущенной областью; 3) приход терминатора должен приводить к смещению и последующему уничтожению аномалии; 4) с уходом терминатора и освещенной ионосферы эффект в ПЭС должен восстанавливаться.

Авторы благодарят NOAA National Geophysical Data Center / NGDC за предоставленные данные о *Ap*, *Kp* и *Dst* индексах (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>); U.S. Geological Survey and National Earthquake Information Center за данные по землетрясению 12 января 2010 г., на о-ве Гаити, URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010rja6/#summary>; IGS-сообщество and Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) за глобальные карты ПЭС [Noll, 2010]; University of Hawaii и GMT-сообщество за General Mapping Tools [Wessel and Smith, 1998]. Авторы признательны проф. Friedemann T. Freund (NASA Ames Research Center, USA) за обсуждение возможных источников ионизации приземного слоя атмосферы над разломами; Мартыненко О.В. (York University, Canada) и Князеву М.А. (Мурманский гос. тех. ун-т, Россия) за помощь в проведении расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 526 с. 1988.
- Золотов О.В., Прохоров Б.Е., Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В. Особенности вариаций полного электронного содержания ионосферы в период подготовки землетрясений // Хим. физика. Т. 30. № 5. С. 84–87. 2011.
- Золотов О.В., Намгаладзе А.А., Захаренкова И.Е., Мартыненко О.В., Шагмуратов И.И. Физическая интерпретация и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 3. С. 413–420. 2012.
- Намгаладзе А.А. О возможных физических механизмах формирования ионосферных предвестников землетрясений // Тр. междунар. науч. техн. конф. “Наука и образование – 2007” (Мурманск, 4–13 апреля 2007 г.) Ред. Простаков И.Е., Косолапов А.И. 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 аэрномия. Т. 49. № 2. С. 267–277. 2009.
- Пулинец С.А., Цыбуля К.Г. Уникальные вариации полного электронного содержания в период подготовки землетрясения на Гаити (M 7.9) 12 января 2010 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 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. № 1. P. 94–104. 2011.
- Bilitza D. International reference ionosphere 2000 // Radio Sci. V. 36. P. 261–275. 2001.
- Blakeslee R.J., Christian H.J., Vonnegut B. Electrical measurements over thunderstorms // J. Geophys. Res. V. 94. № D11. P. 13135–13140. 1989. doi: 10.1029/JD094iD11p13135.
- Davydenko S.S., Thomas C.M., Maribeth S. Modeling the electric structures of two thunderstorms and their contributions to the global circuit // Atmos. Res. V. 91. № 2–4. P. 165–177. 2009.
- Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. P. 191–198. 2009. doi:10.1007/s00190-008-0300-3.
- Freund F. Pre-earthquake signals: Underlying physical processes // J. Asian Earth Sci. V. 41. № 4–5. P. 383–400. 2011. doi:10.1016/j.jseas.2010.03.009.
- Hedin A.E., Fleming E.L., Manson A.H. et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. № 13. P. 1421–1447. 1996.
- Krider E.P., Musser J.A. Maxwell currents under thunderstorms // J. Geophys. Res. V. 87. № C13. P. 11171–11176. 1982. doi: 10.1029/JC087iC13p11171.
- Le Mouél J.-L., Gibert D., Poirier J.-P. On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity // Comptes Rendus Geosciences. V. 342. № 2. P. 95–99. 2010.
- 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. № 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–protono-

- sphere system // *J. Atmos. Terr. Phys.* V.53. N11/12. 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 // *Intern. J. Geomagn. Aeron.* V. 1. № 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. the MSTU.* V. 1. № 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. № 12. P. 1421–1440. 2010.
  - *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A12. P. 1468. 2002. doi:10.1029/2002JA009430.
  - *Prokhorov B.E., Zolotov O.V., Namgaladze A.A., Martynenko O.V.* On TEC variations prior to the Haiti earthquake, Jan. 12, 2010 // Abstracts of the 33d Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena (Apatity, March 2–5, 2010). Eds. Yahnin A.G., Mochalov A.A. P. 67. 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. URL: <http://goo.gl/c888L>
  - *Zolotov O.V., Prokhorov B.E., Namgaladze A.A., Martynenko O.V.* TEC anomalies before the Haiti Jan. 12, 2010 and China May 12, 2008 earthquakes // Abstracts of the 38th COSPAR Scientific Assembly (July 18–25 2010). Ed. Scalice D. P. C11-0162-10. Bremen, Germany. 2010.