

УДК 550.510.535

ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: СРЕДНИЕ ШИРОТЫ

© 2012 г. О. В. Золотов¹, А. А. Намгаладзе¹, И. Е. Захаренкова²,
О. В. Мартыненко¹, И. И. Шагимуратов²

¹ Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск

² ФГБУ науки ЗО ИЗМИРАН, г. Калининград

e-mail: ZolotovO@gmail.com

Поступила в редакцию 15.05.2010 г.

После доработки 29.09.2010 г.

В работе представлены результаты исследования аномальных вариаций полного электронного содержания (*TEC*) ионосферы как вероятных предвестников сильных сейсмических событий. В качестве вероятной причины наблюдаемых возмущений *TEC* рассматривается вертикальный дрейф ионосферной плазмы *F2*-слоя под действием зонального электрического поля сейсмического происхождения. Оценка эффектов такого дрейфа осуществляется методом математического моделирования с использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли (*UAM*). Моделировались среднеширотные ионосферные эффекты от двух типов (дипольного и монополярного) источников сейсмогенного электрического поля с различными магнитудами и пространственными конфигурациями размещения. Полученные результаты сравнивались с данными *GPS*-наблюдений *TEC* сети *IGS* для землетрясения 8 января 2006 г., Китира, Южная Греция (*M6.8*). Показано, что порождаемые дополнительными источниками дипольного типа возмущения согласуются с данными наблюдений; источники монополярного типа не воспроизводят некоторые характерные особенности данных наблюдений и систематически недооценивают величину отклонений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача заблаговременного прогноза землетрясений решается уже достаточно давно — несколько десятков лет. Изначально надежды на решение задачи связывались с наращиванием сетей сейсмических станций и основывались на анализе записей данных сейсмографов, а также данных по деформациям земной поверхности, геохимическим параметрам, магнитных и электрических полей и др. Поиск предвестников велся в том числе и в параметрах ионосферы, реагирующей на проникающие воздействия снизу от сильных землетрясений через нейтральную атмосферу. Об аномальных вариациях этих ионосферных параметров, — электронной концентрации в *E*, *F1* и *F2*-слоях, полного электронного содержания (*TEC*), электронной и ионной температур, критических частот *F2*-слоя, вариаций КНЧ/ОНЧ излучений, образовании спорадических слоев, крупномасштабных и среднимасштабных перемещающихся ионосферных возмущений, электрических полей и др., — ассоциируемых с подготовительными процессами сильных сейсмических событий, сообщали в работах [Гохберг и др., 1988; Afraimovich et al., 2004; Depueva and Rotanova, 2001; Depueva et al., 2007; Hayakawa and Molchanov, 2002; Krankowski et al., 2006; Molchanov et al.,

1993, 2006; Ouzounov et al., 2007; Pulinets, 1998; Pulinets et al., 2005; Ruzhin and Depueva, 1996; Zakharenkova et al., 2007].

Многими авторами проводились исследования характеристик модификаций *TEC*, предшествовавших сильным землетрясениям, [Plotkin et al., 2003; Pulinets and Legen'ka, 2003; Pulinets et al., 2003, 2005; Liu et al., 2001, 2002, 2004; Захаренкова, 2007; Zakharenkova et al., 2007; Пулинец и др., 2010] на основе данных ионозондов, спутников (специальных миссий) и др. и в последнее время особенно — при помощи глобальных навигационных систем и наземных сетей приемников сигналов этих систем. Так, согласно работам [Захаренкова и др., 2006; Захаренкова, 2007; Zakharenkova et al., 2006, 2007], для сильных землетрясений проявление эффектов в *TEC* наблюдается за несколько (обычно двое–трое) суток до землетрясения, имеет вид локального крупномасштабного долгоживущего увеличения электронной концентрации, максимум возмущенной области расположен в непосредственной близости от эпицентрального района. Пространственный масштаб — несколько тысяч километров вдоль параллели и около 1000 км вдоль меридиана. По мере приближения к моменту землетрясения амплитуда возмущения увеличивается, достигая

значения 40–100% относительно фонового уровня. За 10–30 ч до землетрясения выявлена тенденция уменьшения электронной концентрации над эпицентральной областью. Величина этого “отрицательного” эффекта может достигать минус 30% относительно невозмущенного состояния. В спокойных геомагнитных условиях смена знака сейсмо-ионосферного возмущения может трактоваться как сигнал приближающегося землетрясения. Крупномасштабные возмущения электронной концентрации в F_2 -слое ионосферы при определенных условиях наблюдаются в геомагнитно-связанных областях [Ruzhin et al., 1998; Pulinets et al., 2003; Pulinets and Legen'ka, 2003].

В настоящей работе мы исследуем эффекты в полном электронном содержании ионосферы. TEC – интегральная характеристика, преимущественно определяется максимальной электронной концентрацией F_2 -слоя, рассчитывается как количество электронов в единичном столбе от поверхности Земли. Мониторинг TEC в последнее время все чаще осуществляется при помощи глобальных навигационных систем (GPS -США, ГЛОНАСС-Россия) и наземных сетей приемников сигналов этих систем. Это позволяет вести глобальные непрерывные наблюдения TEC ионосферы с хорошим пространственным и временным разрешением, т.е. наблюдения TEC позволяют оценить пространственные масштабы и временную динамику сейсмо-ионосферных эффектов в сейсмически активных регионах. Значения TEC изначально вычисляются по пути прохождения луча по фазовым и групповым задержкам сигналов, затем, например, при помощи однослойной модели ионосферы “наклонный” TEC преобразуется в вертикальный. Результаты наблюдений (и уже обработанные карты TEC) часто размещены в свободном доступе, как например, данные сети IGS [Dow et al., 2005], использованные при подготовке настоящей статьи.

Многие авторы [Sorokin and Chmyrev, 1999; Сорокин и Чмырев, 2002; Pulinets, 1998; Pulinets and Boyarchuk, 2004; Sorokin et al., 2005, 2006] связывают физический механизм формирования предвестника в TEC с гипотетическим сейсмогенным электрическим полем. Ионосферные эффекты такого поля исследовались преимущественно на одномерных моделях, главным образом, применительно к нижней ионосфере [Ким и др., 1993; Hegai et al., 1997; Kim et al., 2002].

В настоящей статье мы исходим из гипотезы о том, что основной причиной появления наблюдаемых аномальных вариаций TEC является вертикальный дрейф ионосферной плазмы F_2 -слоя под воздействием зонального электрического поля сейсмического происхождения [Namgaladze et al., 2008]. На средних широтах вертикальная составляющая электромагнитного дрейфа, создаваемая

восточным полем и направленная вверх, приводит к увеличению электронной концентрации в максимуме F_2 -слоя (NmF_2) 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 F_2 -слое [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Поле противоположного направления (западное – вертикальная составляющая дрейфа направлена вниз) вызывает противоположный – отрицательный – эффект в TEC . Для определения пространственных распределений поля, генерирующих наблюдаемые возмущения в полном электронном содержании, а также проверки эффективности предложенного механизма воздействия на плазму ионосферной F -области, проведен ряд численных экспериментов при помощи глобальной нестационарной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли (UAM) [Namgaladze et al., 1988, 1991, 1998].

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрим землетрясение, произошедшее 8 января 2006 г., 11:35 UT (13:35 LT), Китира, Южная Греция. Эпицентр землетрясения находился на морском дне к востоку от острова Китира – ($36^\circ 20' N$, $23^\circ 20' E$), глубина – 66 км (по данным USGS), магнитуда – $M_6.8$. После основного сейсмического события регистрировались афтершоки с максимальной магнитудой $M_{5.5}$ в течение последующих трех дней.

Геомагнитная активность в период подготовки исследуемого землетрясения была слабой и умеренно менялась (см. рис. 1), т.е. можно считать, что отсутствовали возмущения, способные маскировать исследуемые сейсмо-ионосферные эффекты.

Для определения пространственных характеристик ионосферного отклика на исследуемое сейсмическое событие мы применили метод построения дифференциальных карт отклонений TEC . Значения TEC для заданного момента времени сравнивались со значениями вариаций для спокойных (вычисленных как медиана рассматриваемого диапазона) фоновых условий. Соответствующие карты отклонений TEC для 7 января 2006 г. представлены на рис. 2.

Согласно рис. 2, с 10:00 UT наблюдается формирование области положительных вариаций TEC , расположенной в околоэпицентральной области будущего землетрясения. Амплитуда аномальных вариаций TEC достигает значений 38–55% по сравнению с фоновым уровнем, наблюдается в течение последующих 10–12 ч и реализует максимальные значения возмущения в 55% для моментов 18:00 UT–20:00 UT; область имеет характерную куполообразную форму, с четко выра-

женным локальным характером и расположением максимума в непосредственной близости от эпицентра землетрясения. Характерные линейные размеры проявления аномалии (превышение фоновых значений TEC более чем на 35%) составили около 4000 км по долготе и 1500 км по широте.

Для проверки, действительно ли наблюдаемые вариации носят локальный характер, а не являются глобальными, мы применили методику расчета глобального электронного содержания (GEC), предложенную в работе [Afraimovich et al., 2006]. Анализ GEC произведен для нескольких секторов (центрированных относительно положения эпицентра землетрясения): четыре прямоугольные области (а) $10^\circ \times 10^\circ$, (б) $20^\circ \times 20^\circ$, (в) $30^\circ \times 30^\circ$, (г) $40^\circ \times 40^\circ$ и две вытянутые по долготе среднеширотные области (д) $40^\circ \times 90^\circ$, (ж) $45^\circ \times 150^\circ$. Результаты вычислений GEC для случаев (а) и (ж) представлены на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 данных следует, что с увеличением “охвата” области, привлеченной для расчета GEC , проявляется тенденция к исчезновению, “размыванию” аномалии. Для случая (рис. 3б) практически невозможно выделить видимое отклонение (превышение) вариаций TEC для 7 января 2006 г., в то время как для варианта (рис. 3а) аномалия явно различима. Указанные факты позволяют считать, что исследуемые сейсмо-ионосферные эффекты являются региональными с локализацией в околоэпицентральной области. Таким образом, ионосферная аномалия в TEC для исследуемого среднеширотного землетрясения в Греции 8 января 2006 г. является локальной, обнаружена 7 января — за день до сильного землетрясения.

3. ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Поскольку вариации TEC отражают вариации $NmF2$, то естественно искать причины обнаруженных положительных возмущений TEC среди известных механизмов формирования положительных возмущений $NmF2$, подробно рассмотренных, например, в книге [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. К последним относятся: (а) потоки плазмы из плазмосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля; (б) изменения нейтрального состава (увеличение отношения концентраций атомарных и молекулярных компонент термосферы); (в) направленные к экватору термосферные ветры; (г) перенос плазмы вверх зональным (направленным на восток) электрическим полем; (д) зональный перенос плазмы меридиональным электрическим полем.

Плазмосферные потоки, по-видимому, следует исключить, поскольку они увеличивают $NmF2$

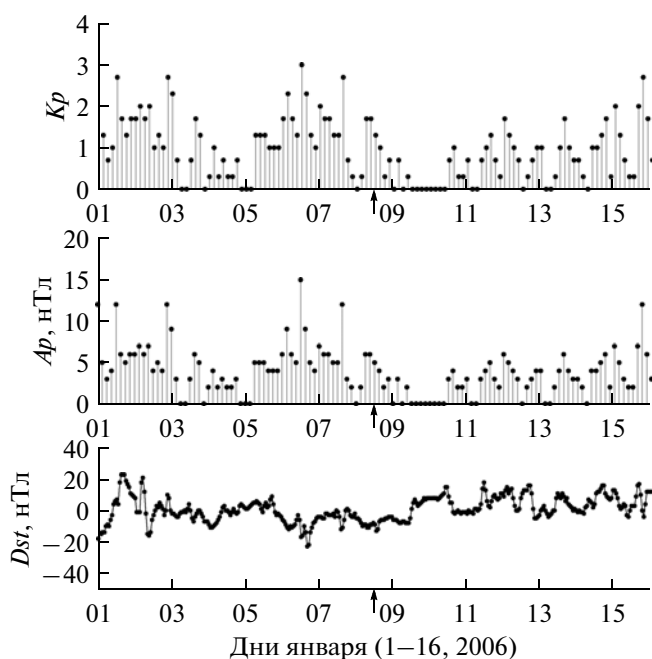


Рис. 1. Индексы геомагнитной активности для 1–15 января 2006 г.: (1) Kp -индекс; (2) A_p -индекс; (3) Dst -индекс; (4) символ “стрелка вверх”(↑) — момент землетрясения.

только ночью и не изменяют TEC , а лишь перераспределяют плазму внутри геомагнитной силовой трубки.

Изменения нейтрального состава исключать нельзя, поскольку они могут быть обусловлены изменениями режима турбулентной диффузии в нижней и средней атмосфере и, соответственно, высоты турбопаузы в околоэпицентральной области. Соответствующие эффекты нетрудно исследовать на современных глобальных ионосферно-термосферных моделях, проводя численные эксперименты с различными высотными профилями коэффициента турбулентной диффузии. Однако этот механизм не объясняет наблюдаемой магнитной сопряженности предсейсмических ионосферных эффектов.

Для генерации направленных к экватору термосферных ветров необходимы соответствующие градиенты давления нейтрального газа непосредственно на высотах $F2$ -слоя, что представляется маловероятным.

Электрические поля легко передаются из нижней ионосферы (если они там возникают) в верхнюю вдоль силовых линий геомагнитного поля и далее в противоположное полушарие, и заслуженно считаются главными претендентами на роль основной причины формирования предвестников землетрясений в TEC , поскольку обеспечивают геомагнитную сопряженность ионосферных эффектов. В $F2$ -слое ионосферная плаз-

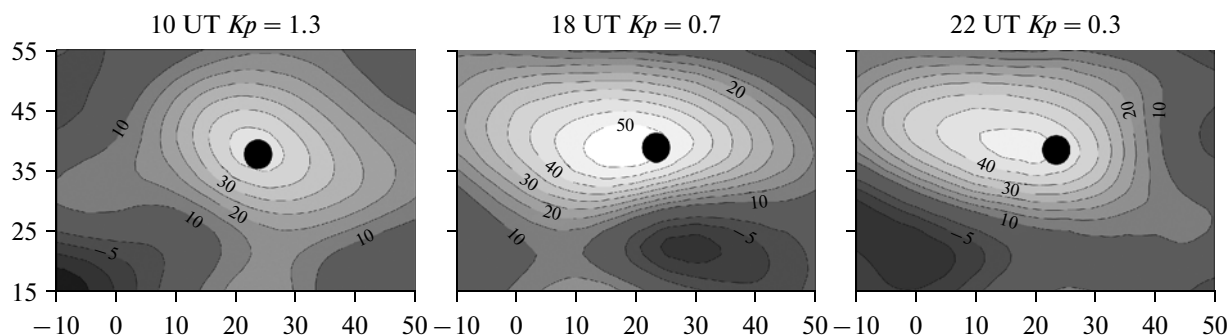


Рис. 2. Дифференциальные карты отклонений TEC по отношению к фоновой (невозмущенной) вариации для 7 января 2006 г., Китира, Греция. Ось абсцисс – географическая долгота, ось ординат – географическая широта.

ма замагничена и под действием электрического поля движется перпендикулярно геомагнитному полю со скоростью электромагнитного дрейфа. Перенос плазмы этим дрейфом может как увеличивать, так и уменьшать электронную концентрацию в $F2$ -слое в зависимости от ориентации полей. В низких широтах вертикальный перенос плазмы вверх электромагнитным дрейфом формирует в дневное время так называемую экваториальную аномалию – провал в электронной концентрации над геомагнитным экватором. На средних широтах вертикальная составляющая дрейфа, направленная вверх, приводит к увеличению электронной концентрации за счет попадания 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.

Зональный дрейф плазмы может увеличивать электронную концентрацию в областях конвергенции (стекания с противоположных сторон), т.е. при наличии смены направления движения. В силу вмороженности геомагнитного поля в плаз-

му, такое поперечное стекание плазмы в трубку будет означать ее сжатие с ростом как газового, так и магнитного давлений, и вряд ли может быть продолжительным, поскольку под действием градиентов этих давлений должно начаться обратное движение, как это происходит в магнитозвуковых волнах.

Наконец, электромагнитный дрейф вызывает Джоулев разогрев ионного и нейтрального газов, соответствующие увеличения их температур изменяют скорость амбиполярной диффузии и убыстряют протекание ионно-молекулярных реакций. Результирующий эффект в электронной концентрации будет преимущественно отрицательным (ее уменьшение) или сведется к перераспределению плазмы в геомагнитной силовой трубке, что не повлияет на TEC .

Из проведенного качественного рассмотрения следует, что наиболее вероятным электромагнитным механизмом формирования наблюдаемых увеличений TEC на средних широтах является вертикальный перенос плазмы вверх под действием зонального электрического поля, направленного на восток. Для существования такого поля в околоэпицентральной области необходимо, чтобы на западной части границы этой области были расположены положительные электрические заряды, а на восточной – отрицательные, аналогично тому, как на утренней стороне границы полярной шапки располагаются положительные, а на вечерней – отрицательные заряды, формируя электрическое поле магнитосферно-ионосферной конвекции. Картина распределения электрического потенциала в ионосфере над околоэпицентральной областью при этом будет качественно похожа на картину потенциала поля магнитосферно-ионосферной конвекции.

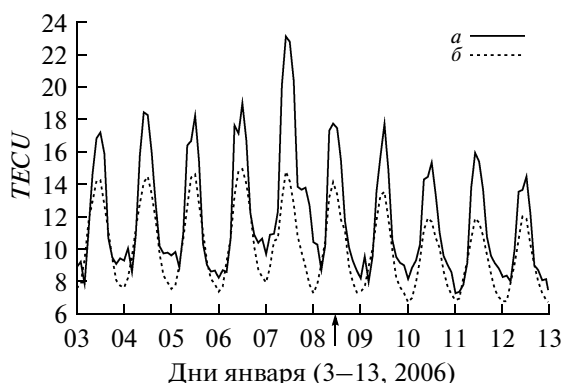


Рис. 3. Вариации GEC в (а) секторе $10^\circ \times 10^\circ$ (центрировано к эпицентру) и (б) среднеширотной области $45^\circ \times 150^\circ$ для 3–13 января 2006 г. Символ “стрелка вверх” (↑) – момент землетрясения.

4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования представленного выше электромагнитного механизма формирования ано-

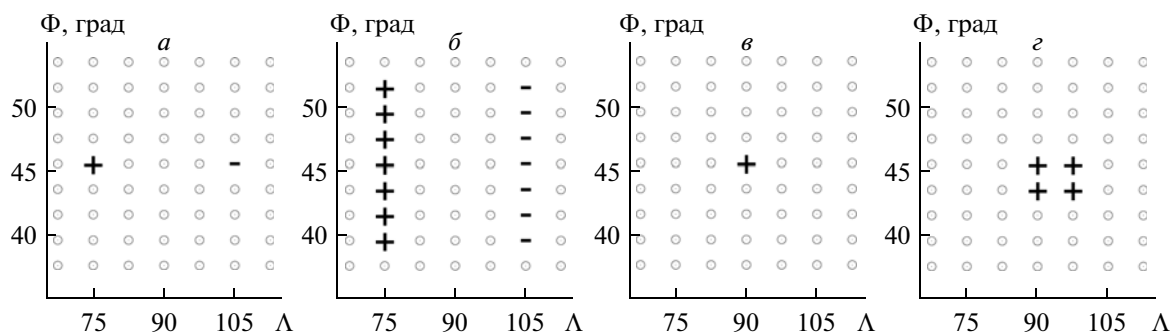


Рис. 4. Численная сетка и дополнительные (сейсмогенные) источники электрического потенциала: “+” для положительного заряда; “-” для отрицательного заряда; другие (серые точки) – узлы численной сетки без внесения дополнительных зарядов; Φ, Λ – геомагнитные координаты.

мальных вариаций *TEC* проводились методом математического моделирования при помощи глобальной физико-математической модели верхней атмосферы Земли UAM [Namgaladze et al., 1988, 1991, 1998].

Модель UAM является глобальной, трехмерной, нестационарной численной моделью, описывающей термосферу, ионосферу и плазмосферу как единую систему; модель охватывает диапазон высот от 80 км до $15R_E$ геоцентрического расстояния и учитывает несовпадение геомагнитного и географического полюсов Земли. В ней с помощью численного интегрирования системы квазигидродинамических уравнений, описывающих законы сохранения частиц, импульса и энергии (уравнения непрерывности, движения и теплового баланса), рассчитываются концентрации основных нейтральных (O_2, N_2, O) и заряженных (XU^+, O^+, H^+ и электронов) компонент атмосферы, температуры нейтрального, ионного и электронного газов, скорости движения ионов и т.д. В совокупности с ними в модели решается уравнение для потенциала ϕ электрического поля магнитосферного, термосферного (термосферное динамо) и сейсмического происхождения:

$$\nabla[\hat{\sigma}(\nabla\phi - \mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \mathbf{j}_m] = 0, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}$ – тензор ионосферной проводимости; \mathbf{V} – скорость среднемассового движения нейтрального газа; \mathbf{B} – вектор индукции геомагнитного поля; \mathbf{j}_m – плотность магнитосферного тока.

После интегрирования данного уравнения по толщине токового слоя (от 80 до 175 км) в пренебрежении высотной зависимостью компонент вектора электрического поля в этом слое задача расчета электрического потенциала сводится к двумерной. Ниже 80 км предполагается, что отсутствуют носители заряда, выше 175 км предполагается, что плазма замагничена, т.е. геомагнитные силовые линии эквипотенциальны. Ионосферные проводимости, входящие в тензор проводимости $\hat{\sigma}$, рассчитываются по стандарт-

ным формулам. Для расчета поля магнитосферной конвекции в модели UAM уравнение (1) решается с граничными условиями в виде распределений потенциала и/или продольных токов зон 1 и 2 на границе полярной шапки.

Дополнительные электрические, предположительно сейсмогенные, поля рассчитывались путем решения уравнения (1) с граничными условиями на границе околоэпицентральной области в виде гипотетических источников электрического потенциала (в сущности, электрических зарядов и соответствующих им потенциалов) различных типов и пространственных конфигураций в узлах численной сетки (на высоте 175 км над поверхностью Земли). Эти источники “включались” в 00:00 UT и действовали в постоянном режиме в течение всех модельных суток. В численном эксперименте рассматривались два типа (дипольный – состоящий из зарядов разных знаков; монополярный – состоящий из зарядов одного – положительного – знака) дополнительных источников сейсмического происхождения и 9-ть пространственных конфигураций их размещения, показанных на рис. 4. Расчеты велись для спокойных солнечных и геомагнитных условий и различных магнитуд дополнительных электрических потенциалов: (1) 10 кВ для дипольных источников и (2) 10 и 20 кВ для источников положительного типа. В результате этих экспериментов получены пространственные распределения электрических полей и генерируемых ими возмущений *TEC*. Рассчитанные возмущения *TEC* сопоставлены с данными наблюдений для среднеширотного землетрясения 8 января 2006 г., Китира, Южная Греция (рис. 5).

Ранее исследование воздействия дополнительных источников электрического поля на вариации *TEC* для среднеширотной и экваториальной областей проводилось в работе [Намгаладзе и др., 2009], но в ней не осуществлялась привязка источников к конкретным землетрясениям, рассматривалась одна конфигурация размещения и

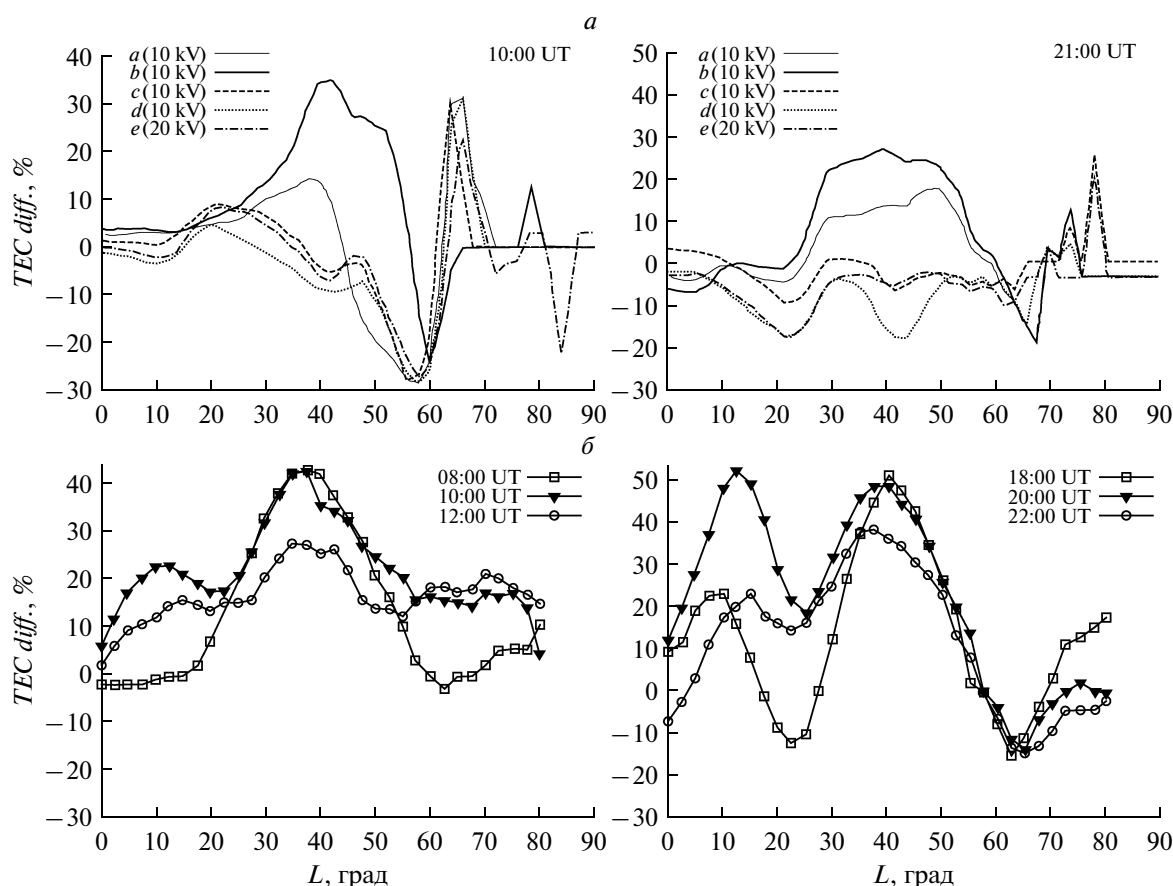


Рис. 5. Широтный ход отклонений TEC (%) по сравнению с невозмущенными условиями: (а) вычисления UAM (сверху) для 10:00 UT (слева) и 21:00 UT (справа) и (б) GPS TEC дневные (слева) и ночные (справа) наблюдения (снизу) за день до среднеширотного землетрясения 8 января 2006 г., Китира, Южная Греция.

один – дипольный – тип источников, расчет велся на грубой численной сетке и ставилась задача проверки принципиальной возможности исследуемого механизма.

Ряд исследованных нами конфигураций распределений электрических полей породил не существенно отличающиеся друг от друга возмущения TEC. Для облегчения анализа мы представили в данной работе только характерные явно различимые конфигурации: две для источников дипольного (рис. 4, а–б) и две – для дополнительных сейсмогенных источников электрического потенциала положительного типа (рис. 4, в–г).

Рассчитанные магнитуды восточной компоненты электрического поля не превосходят значений 16 мВ/м и достигают пиковой величины в отдельных изолированных точках (соответствующих узлам численной сетки, ближайшим к узлам с внесенным дополнительным потенциалом). Такие величины электрических полей согласуются с оценками других авторов [Chmyrev et al., 1989; Sogokin et al., 2005], а также ракетными измерениями электрических полей большой интенсивности

в E-слое ионосферы [Yokoyama et al., 2002], также ассоциируемых с сейсмической активностью.

Дополнительные источники дипольного типа (10 кВ) генерируют более сильные возмущения вариаций TEC ионосферы по сравнению с монополярными (положительными) источниками электрического поля как в случае магнитуды в +10 кВ заданного электрического потенциала, так и в случае +20 кВ.

На рисунке 5 представлен широтный ход возмущений TEC по сравнению со спокойными фоновыми условиями для утреннего и вечернего моментов времени для модельного случая и по данным GPS-наблюдений сети IGS для среднеширотного землетрясения 8 января 2006 г., Китира, Южная Греция.

Из рисунка 5 видно, что вариации TEC, рожденные дипольными источниками, повторяют форму и особенности данных наблюдений, положения минимумов и максимумов как для дневных, так и ночных условий (вариантов расчета). Величины отклонений вариаций TEC, рожденных этими источниками, согласуются с данными GPS-наблюдений и остаются в пределах

погрешности или, как минимум, в пределах обычной (естественной) изменчивости параметра в средних широтах для спокойных условий.

Дополнительные источники монополюсного (положительного) типа не воспроизводят магнитуду и структуру (не повторяют ряд характерных особенностей исходных данных наблюдений) как для ночных, так и для дневных условий для средних широт. Увеличение магнитуды для данного типа дополнительного электрического потенциала с +10 до +20 кВ не улучшает согласие с данными наблюдений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методом математического моделирования при помощи физико-математической модели UAM проведена проверка гипотезы о вертикальном дрейфе ионосферной плазмы F_2 -слоя под воздействием зональной компоненты сейсмогенного электрического поля как причине формирования аномальных крупномасштабных долгоживущих областей повышенного (пониженного) содержания TEC . Выполнены расчеты генерируемых гипотетическими сейсмогенными источниками электрических полей, концентраций основных нейтральных и заряженных компонент атмосферы, а также вариаций TEC , путем численного решения системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса, дополненных модифицированным уравнением для потенциала электрического поля.

Исследованы 9 пространственных конфигураций размещений, два типа (дипольный — состоящий из зарядов разных знаков, монополюсный — состоящий из зарядов одного — положительного — знака) и две магнитуды дополнительных источников электрического потенциала и соответствующие им пространственные распределения электрических полей. Генерируемые этими полями возмущения в TEC ионосферы сопоставлены с данными GPS -наблюдений сети IGS для землетрясения 8 января 2006 г., Китира, Южная Греция ($M_b 8$).

Установлено, что дополнительные источники дипольного типа порождают возмущения в среднеширотной ионосфере, хорошо (как минимум — качественно, или в пределах естественной изменчивости параметра) согласующиеся с данными наблюдений.

Монополюсные (позитивные) дополнительные источники электрического потенциала не воспроизводят некоторые присутствующие в данных наблюдений особенности, такие как положения экстремумов и магнитуда вариаций TEC для средних широт. Увеличение магнитуды дополнительного потенциала с +10 до +20 кВ на характер по-

рождаемых ионосферных возмущений влияет слабо и также не улучшает согласие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 526 с. 1988.
- Гохберг М.Б., Кустов А.В., Липеровский В.А., Липеровская Р.Х., Харин Е.П., Шалимов С.Л. О возмущениях в F -области ионосферы перед землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 4. С. 12–20. 1988.
- Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Калининград. РГУ им. Канта. 19 с. 2007. URL: <http://sites.google.com/site/zolotovo/a/Zakharenkova.pdf>
- Захаренкова И.Е., Шагмуратов И.И., Лаговский А.Ф., Кранковски А. Вариации полного электронного содержания ионосферы во время Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. // Вестн. Мурманского гос. техн. ун. Т. 9. № 3. С. 434–439. 2006. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v09_3_n23/articles/07_zakhar.pdf
- Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможности образования слоя ионов металлов в E -области ночной среднеширотной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 33. № 5. С. 114–119. 1993.
- 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., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 2. С. 240–252. 2010.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 6. С. 821–830. 2002.
- Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // Russian J. Earth Sci. V. 6. № 5. P. 339–354. 2004.
- Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Oinats A.V., Vasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Global electron content as a new index of solar activity. Comparison with IRI modeling results // IRI News. V. 13. № 1. 2006.
- Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Stanev G.A. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake center // Phys. Earth and Planet. Interiors. V. 57. P. 110–114. 1989.
- Depueva A.Kh., Mikhailov A.V., Devi M., Barbara A.K. Spatial and time variations in critical frequencies of the ionospheric F region above the zone of equatorial earthquake preparation // Geomagnetism and aeronomy. V. 47. № 1. P. 129–133. 2007.

- *Depueva A.Kh., Rotanova N.* Low-latitude ionospheric disturbances associated with earthquakes // *Ann. di Geofis.* V. 44. № 2. P. 221–228. 2001.
- *Dow J.M., Neilan R.E., Gendt G.* The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade // *Adv. Space Res.* V. 36. № 3. P. 320–326. 2005. doi:10.1016/j.asr.2005.05.125.
- *Hayakawa M., Molchanov O.A.* Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. Tokyo, Japan: TERRAPUB. 477 p. 2002.
- *Hegai V.V., Kim V.P., Nikiforova L.I.* A possible generation mechanism of acoustic-gravity waves in the ionosphere before strong earthquakes // *J. Earthquake Predict. Res.* V. 6. P. 584–589. 1997.
- *Kim V.P., Pulinets S.A., Hegai V.V.* Theoretical model of possible disturbances in the nighttime mid-latitude ionospheric D-region over an area of strong earthquake preparation // *Radiophys. Quantum Electronics.* V. 45. P. 262–268. 2002.
- *Krankowski A., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I.* Response of the ionosphere to the Baltic Sea earthquake of 21 September 2004 // *Acta Geophys.* V. 54. № 1. P. 90–101. 2006.
- *Liu J.Y., Chuo Y.J., Chen Y.I.* Ionospheric GPS TEC perturbations prior to the 20 September 1999, Chi-Chi earthquake // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. P. 1383–1386. 2001.
- *Liu J.Y., Chuo Y.J., Pulinets S.A., Tsai H.F., Zeng X.P.* A study on the TEC perturbations prior to the Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes // *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Eds. Hayakawa M. and Molchanov O.A. Tokyo, Japan: TERRAPUB. P. 297–301. 2002.
- *Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Pulinets S.A., Yu S.B.* Pre-earthquake ionospheric anomalies monitored by GPS TEC // *Ann. Geophysicae.* V. 22. № 5. P. 1585–1593. 2004.
- *Molchanov O.A., Mazhaeva O.A., Goliavin A.N., Hayakawa M.* Observation by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes // *Ann. Geophysicae.* V. 11. № 5. P. 431–440. 1993.
- *Molchanov O.A., Rozhnoi A., Solovieva M., Akentieva O., Berthelier J.J., Parrot M., Lefeuvre F., Biagi P.F., Castellana L., Hayakawa M.* Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite // *Natural Hazards Earth System Sci.* V. 6. P. 745–753. 2006.
- *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 Appl. Geophys.* V. 127. № 2/3. P. 219–254. 1988. doi:10.4007/BF00879812.
- *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M.* Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 53. № 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. Geomagn. Aeron.* V. 1. № 1. P. 53–58. 1998. doi:10.1007/BF-00879812.
- *Namgaladze A.A., Zolotov O.V., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Martynenko O.V.* Possible physical explanation and modeling of the ionospheric perturbations observed before earthquakes // *Geophys. Res. Abstracts.* V. 10. EGU2008-A-07165. Vienna: EGU. 2008.
- *Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // *Tectonophysics.* № 431. P. 211–220. 2007.
- *Plotkin V.V.* GPS detection of ionospheric perturbation before the 13 February 2001, El Salvador earthquake // *Natural Hazards Earth System Sci.* V. 3. P. 249–253. 2003.
- *Pulinets S.A.* Seismic activity as a source of the ionospheric variability // *Adv. Space Res.* V. 22. № 6. P. 903–906. 1998.
- *Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh.* Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 65. № 16–18. P. 1337–1347. 2003.
- *Pulinets S.A., Legen'ka A.D.* Spatial–Temporal Characteristics of Large Scale Disturbances of Electron Density Observed in the Ionospheric F-Region before Strong Earthquakes // *Cosmic Research.* V. 41. № 3. P. 221–229. 2003.
- *Pulinets S.A., Boyarchuk K.* Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin, Germany: Springer. 289 p. 2004.
- *Pulinets S.A., Leyva Contreras A., Bisiacchi-Giraldi G., Ciraolo L.* Total electron content variations in the ionosphere before the Coima, Mexico, earthquake of 21 January 2003 // *Geofisica Internacional.* V. 44. № 4. P. 369–377. 2005.
- *Ruzhin Yu. Ya., Depueva A.Kh.* Seismoprecursors in Space as Plasma and Wave Anomalies // *J. Atmos. Electricity.* V. 16. № 3. P. 251–288. 1996.
- *Ruzhin Yu. Ya., Larkina V.I., Depueva A.Kh.* Earthquake precursors in magnetically conjugated ionosphere regions // *Adv. Space Res.* V. 21. № 3. P. 525–528. 1998.
- *Sorokin V.M., Chmyrev V.M.* Modification of the ionosphere by seismic related electric field // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. Hayakawa M. Tokyo: TERRAPUB. P. 805–818. 1999.
- *Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K.* Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67. № 14. P. 1259–1268. 2005.
- *Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M.* Formation mechanism of the lower-ionosphere disturbances by the atmosphere electric current over a seismic region // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. № 11. P. 1260–1268. 2006.
- *Yokoyama T., Yamamoto M., Pfaff R.F., Fukao S., Iwagami N.* SEEK-2 campaign measurement of the electric field in the E-region and its association with the QP echoes // *Abstracts for the 112th SGPSS Fall Meeting*. Tokyo University of Electro-Communications. P. 12–13. 2002.
- *Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I.* Modification of the low-latitude ionosphere before December 26, 2004 Indonesian earthquake // *Natural Hazards Earth System Sci.* V. 6. P. 817–823. 2006.
- *Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Krankowski A., Lagovsky A.F.* Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 ($M = 8.3$) // *Studia Geophysica et Geodaetica.* V. 51. № 2. P. 267–278. 2007.