

УДК 550.388.2

ПРОВЕРКА КОНЦЕПЦИИ СЕЙСМО-ИОНОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ В СПОКОЙНЫХ ГЕЛИОГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРИМЕРЕ ВЕНЧУАНЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В КИТАЕ 12 МАЯ 2008 г.

© 2010 г. С. А. Пулинец^{1,2}, В. Г. Бондур¹, М. Н. Цидилина¹, М. В. Гапонова¹

¹Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”, г. Москва

²Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова Росгидромета, г. Москва

e-mail: pulse1549@gmail.com

Поступила в редакцию 15.07.2009 г.

После доработки 25.08.2009 г.

Проводится детальный анализ изменчивости ионосферы в течение апреля–мая 2008 г. с целью выявления аномальных вариаций, связанных с сейсмической активностью, инициированной сильнейшим Венчуаньским (Wenchuan) землетрясением ($M = 7.9$) в провинции Сычуань, Китай, 12 мая 2008 г. В качестве источника данных использовалась информация о полном электронном содержании (ПЭС) с сети приемников GPS в регионе землетрясения, глобальные карты ПЭС в формате индекса IONEX и восстановленные вертикальные профили электронной концентрации по данным приемников GPS. Пространственная и временная локализация наблюдаемых аномалий, их морфологические особенности, отсутствие геомагнитных возмущений в течение периода наблюдений не оставляют сомнения в том, что источником наблюдаемых вариаций являлась сейсмическая активность.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что факт существования специфических вариаций в ионосфере, связанных с сейсмической активностью и появляющихся в ионосфере над областью подготовки землетрясения за несколько суток до сейсмического толчка, доказан и многочисленными публикациями [Pulinets et al., 1994; Chuo et al., 2001; Zakharenkova et al., 2006], и статистическими исследованиями [Пулинец и др., 2002; Liu et al., 2004; Liu et al., 2006], а также наличием физического механизма [Pulinets and Boyarchuk, 2004; Pulinets, 2009a], он все еще подвергается сомнениям в литературе, в том числе и в недавних публикациях [Afraimovich and Astafyeva, 2008]. Основным аргументом “против” по-прежнему выдвигается высокая изменчивость ионосферы и эффекты, связанные с солнечной активностью. Поэтому большой интерес вызывают периоды, когда такая активность была минимальна, а эффекты в ионосфере — значительны, что снимает с повестки дня аргументы, выдвигаемые в подобных публикациях.

Последний минимум солнечной активности характеризуется необычайно большой длительностью (задержка порядка 2-х лет), и чрезвычайно низкой активностью Солнца (практически полным отсутствием солнечных пятен и заметных событий на Солнце). Это предоставляет шанс для проверки различных источников изменчивости ионосферы, не связанных с солнечной активностью. Одним из таких источников яв-

ляется атмосферное электрическое поле [Пулинец и др., 1998a], и один из его генераторов — сейсмическая активность [Pulinets, 1998].

2007–2008 гг., совпадающие с глубоким минимумом солнечной активности, характеризуются весьма высокой глобальной сейсмической активностью. Одним из проявлений этой активности было разрушительное Венчуаньское землетрясение в Китае в провинции Сычуань 12 мая 2008 г. Основные параметры землетрясения будут приведены в следующем разделе, а сейчас рассмотрим морфологические признаки ионосферных предвестников, тестирование которых и будет основным предметом рассмотрения в данной работе.

2. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В данном разделе мы будем пользоваться результатами работ [Пулинец и др., 1998b; Пулинец и Легенька, 2002; Пулинец и Легенька, 2003; Pulinets et al., 2003; Liu et al., 2004]. Первыми и основными признаками, естественно, являются пространственная и временная локализация аномальных вариаций, наблюдаемых в ионосфере относительно положения эпицентра и времени сейсмического толчка. Как было продемонстрировано с помощью данных спутникового картирования ионосферы [Пулинец и Легенька, 2003], аномальные вариации появляются над областью

подготовки землетрясения, размер которой определяется соотношением $R = 10^{0.43M}$ (R – радиус области подготовки землетрясения, M – магнитуда землетрясения) [Добровольский, 1991]. Размер аномалии в ионосфере по порядку величины соответствует оценке R , однако его форма и положение зависят от широты: в низких широтах электромагнитная природа экваториальной аномалии приводит к возникновению аномальных вариаций не только над эпицентром, но и в магнитосопряженной области. Кроме того, в низкоширотной ионосфере проявляется долготный эффект, связанный с появлением зонального электрического поля [Pulinets, 2009b]. В любом случае ионосферные вариации над областью подготовки землетрясения отличаются от глобальных вариаций в ионосфере, и это служит одним из признаков, позволяющих идентифицировать ионосферные предвестники.

Как показали статистические исследования [Pulinets, 1998; Liu et al., 2004; Liu et al., 2006], в среднем ионосферные предвестники появляются за 5 суток до сейсмического толчка. При этом, в отличие от эффектов магнитных бурь, когда отрицательная фаза в ионосфере может длиться сутки и более, ионосферные предвестники кратковременны (порядка 4-х часов, но зато появляются ежедневно (или через день) в течение нескольких дней, обычно в одно и то же время суток [Pulinets et al., 2003]. На средних и в высоких широтах наблюдаются отрицательные отклонения электронной концентрации в предвосходные часы (3–5 ч утра) [Пулинец и др., 1998б], а в низкоширотной ионосфере – в послеполуденные часы (14–18 ч) [Liu et al., 2004; Liu et al., 2006]. Положительные вариации обычно наблюдаются в предполуденные часы (10–12 ч) [Пулинец и др., 1998б].

Если эпицентр землетрясения находится в низких широтах, необходимо учитывать электродинамические эффекты в экваториальной аномалии, приводящие к изменению положения и формы горбов экваториальной аномалии [Пулинец и Легенька, 2002]. В частности, отмечается движение горбов экваториальной аномалии перед землетрясением по направлению к геомагнитному экватору, что и является основной причиной отрицательных аномалий в послеполуденные часы в точках, расположенных внутри и на внешнем спаде горба, и может привести к положительным аномалиям в точках вблизи геомагнитного экватора. В случае, если в низких широтах сейсмо-ионосферный эффект связан с изменением проводимости воздуха в столбе земля-ионосфера, эффекты в ионосфере (изменение формы и интенсивности экваториальной аномалии) могут проявляться не точно над эпицентром, а на западе или на востоке от него [Pulinets, 2009b].

Сейсмо-ионосферные эффекты охватывают не только максимум электронной концентрации в ионосфере (хотя в области пика концентрации амплитуда вариаций максимальна), но распространяются по всей толще ионосферы: от области D вплоть до магнитосферы [Pulinets and Boyarchuk, 2004]. Одним из индикаторов таких изменений являются вариации шкалы высот вертикального профиля электронной концентрации в ионосфере. Отрицательные вариации электронной концентрации в максимуме области F ионосферы (и отрицательные вариации полного электронного содержания ПЭС) сопровождаются увеличением шкалы высот [Pulinets et al., 2007], что является еще одной из отличительных особенностей ионосферных предвестников. Изменение шкалы высот обычно связывают с изменением средней массы ионов. В частности, увеличение шкалы высот может быть объяснено увеличением доли легких ионов в общем ионном содержании. Эффект появления легких ионов в области F ионосферы перед сильными землетрясениями неоднократно фиксировался в различных космических экспериментах [Bošková et al., 1993].

Таким образом, в настоящей работе будут исследованы следующие морфологические признаки ионосферных предвестников:

1. Локализация в пространстве и времени, в том числе заблаговременность появления предвестников перед сейсмическим толчком.
2. Зависимость предвестников от местного времени и регулярность их проявления в течение нескольких суток перед землетрясением.
3. Эффекты в экваториальной аномалии (искажения ее формы и интенсивности), магнитосопряженные эффекты.
4. Вариации формы вертикального профиля электронной концентрации.

В случае обнаружения регулярности в наблюдаемых аномальных вариациях будет сделана попытка разработки маски ионосферного предвестника для данного региона.

3. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ПРОВИНЦИИ СЫЧУАНЬ (КИТАЙ) 12 МАЯ 2008 г.

Вэнчуаньское землетрясение с магнитудой $M = 7.9$ по шкале Рихтера произошло 12 мая 2008 г. в точке с координатами 31.015° N, 103.365° E (рис. 1) в зоне разлома Лунмэньшань (Longmenshan), образованного в результате столкновения Евразийской и Индо-Европейской тектонических плит. Разлом проходит по западному краю Сычуаньской котловины, отделяя ее от Сино-Тибетских гор. Отличительной особенностью этого землетрясения явилось практическое отсутствие форшоков, и исключительно высокая афтершоковая активность. Фактически главный толчок

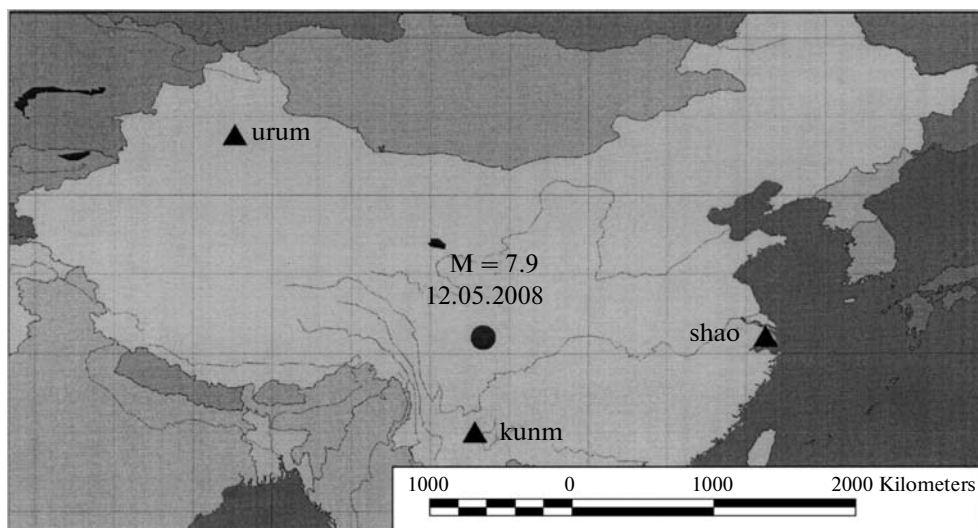


Рис. 1. Карта расположения эпицентра Венчуаньского землетрясения 12 мая 2008 г. и приемных станций GPS.

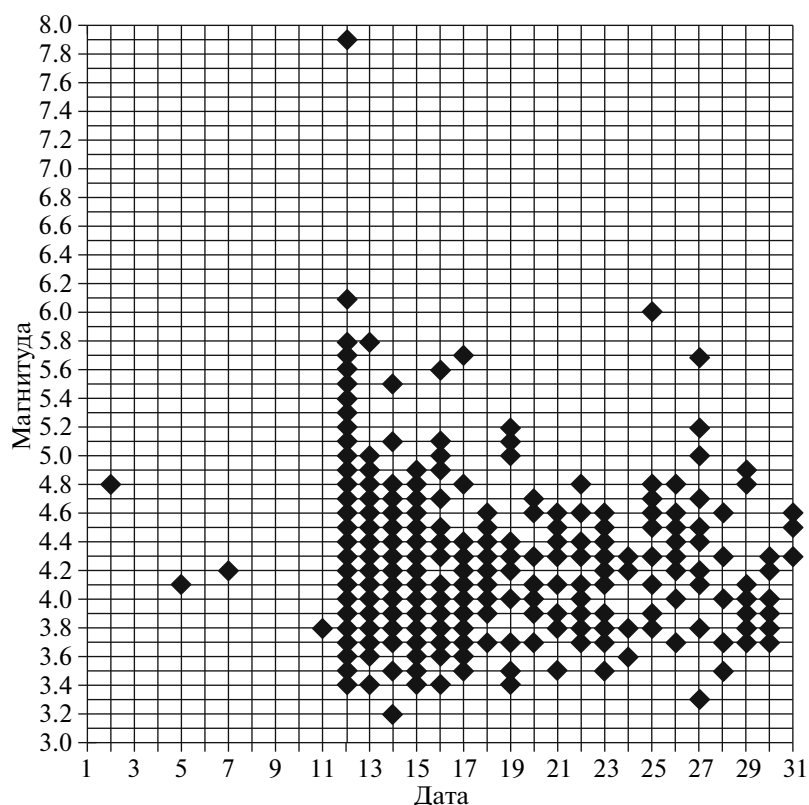


Рис. 2. Землетрясения, произошедшие в Китае, с $M > 3$ в период с 1 по 31 мая 2008 г.

стимулировал всплеск сейсмической активности в данном регионе, продолжавшийся до конца мая. В течение этого периода было зарегистрировано 697 землетрясений [http://neic/usgs.gov/], в том числе 126 землетрясений с магнитудами $3 \leq M < 4$, 521 землетрясение с магнитудами $4 \leq M < 5$, 48 землетрясений с магнитудами $5 \leq M < 6$ и 2 земле-

трясения с магнитудами $M = 6.0$ и $M = 6.1$. Распределение сейсмической энергии по времени и магнитудам показано на рис. 2, а пространственное распределение сейсмических толчков — на рис. 3. Практически все толчки после основного 12 мая концентрируются вдоль разлома Лунмэньшань, что свидетельствует об их генетической

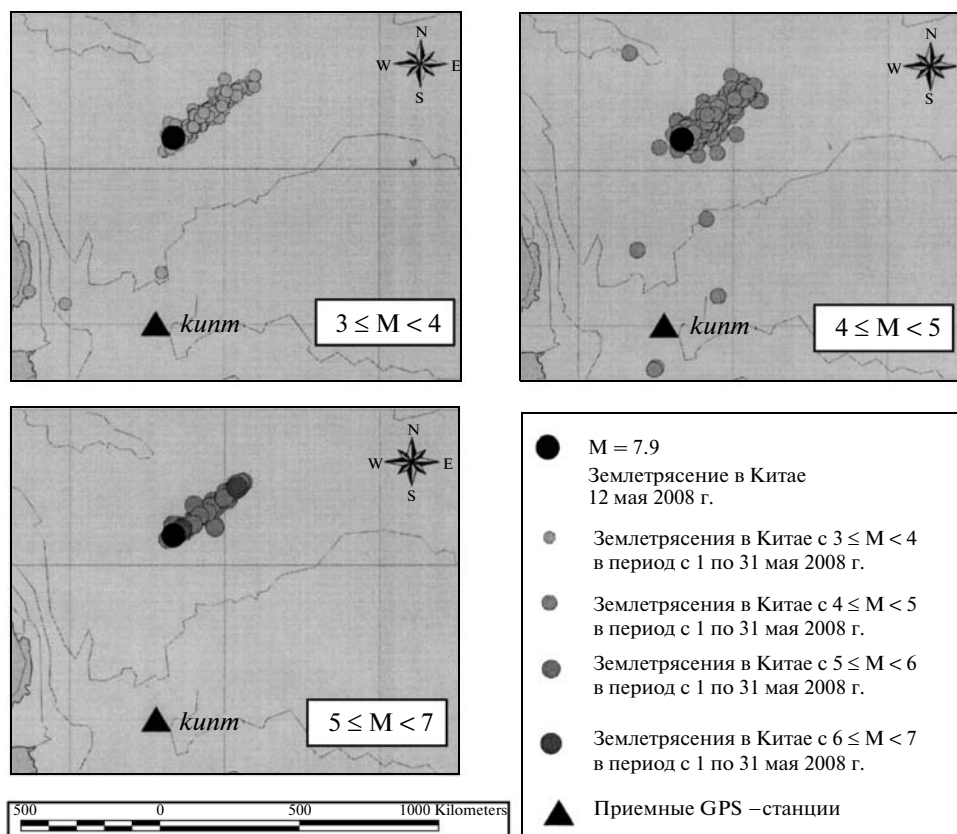


Рис. 3. Карты расположения эпицентров землетрясений в Китае с магнитудами $M > 3$ в период с 1 по 31 мая 2008 г.

взаимосвязи и принадлежности к одному процессу тектонической перестройки в данной области земной коры.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

В связи с отсутствием доступа к данным наземного вертикального зондирования в Китае, основным источником информации об ионосферных вариациях были данные приемников навигационной системы GPS сети IGS, находящиеся в свободном доступе. Для анализа были использованы данные приемников *kunm*, *urum* и *shao*. Их географическое положение показано на рис. 1. Ближайшей к эпицентру станцией была станция *kunm*, к тому же находящаяся в одном долготном секторе с эпицентром. Полное электронное содержание в вертикальном столбе рассчитывалось по методике [Ciraolo and Spalla, 1997]. Кроме того, для анализа глобальных вариаций в ионосфере использовались глобальные ионосферные карты в формате индекса IONEX (The IONosphere Map EXchange). В качестве источника данных применялся индекс, рассчитанный в Политехническом университете Барселоны [Hernández-Pajares, 2003]. Для восстановления вертикальных профилей

электронной концентрации из данных GPS использовалась методика двухчастотного просвечивания [Бондур и Смирнов, 2005], позволяющая для периода нахождения одного из спутников GPS над горизонтом рассчитывать вертикальные профили электронной концентрации в подионосферной точке на линии, соединяющей спутник и наземный приемник. При этом положение подионосферной точки подбирается в области подготовки землетрясения.

Геомагнитная обстановка в период подготовки землетрясения была спокойной. Как видно из рис. 4, где представлен экваториальный индекс геомагнитной активности Dst , начиная с 29 апреля его величина не превосходила величины ± 20 нТл. Небольшое возмущение ($Dst = -43$ нТл) не привело к изменениям электронной концентрации, выходящим за пределы нижней кватили. В пределах ± 5 дней от главного толчка геомагнитная активность практически нулевая. За весь май 2008 г. величина A_p индекса не превышала 12, а величина K_p индекса находилась в пределах $0 \dots +2$. Полный геомагнитный штиль предоставил возможность для исследования ионосферных вариаций в период сейсмической активности в провинции Сычуань. Это позволило также сравнить ионосферные

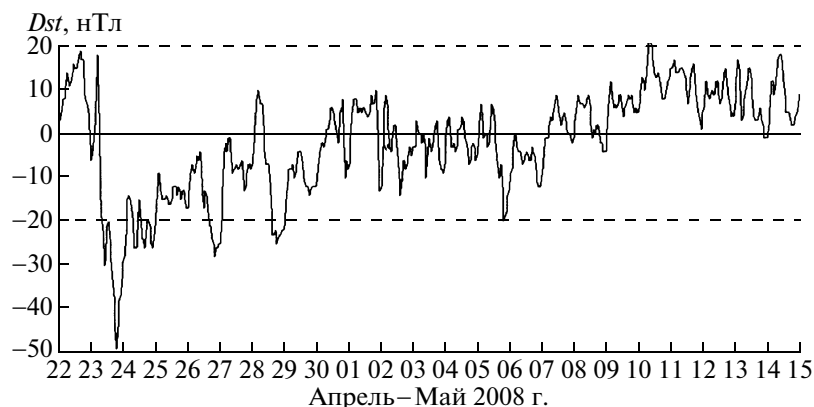


Рис. 4. Экваториальный геомагнитный Dst -индекс в период с 22 апреля по 15 мая 2008 г.

вариации над сейсмоактивной областью с одно-временными вариациями вдали от нее.

5. ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

На рис. 5а представлены вариации полного электронного содержания (ПЭС) в вертикальном столбе, рассчитанные по данным станции *kunm* (толстая сплошная линия) в течение месяца с 26 апреля по 26 мая 2008 г. Серой сплошной линией представлена текущая месячная медиана, рассчитанная за 30 суток, предворяющих текущий день представления ПЭС. Нижняя и верхняя квартили показаны на рис. 5б тонкой черной и толстой серой линиями соответственно. Как видно из рисунка, несмотря на спокойную геомагнитную обстановку регулярно наблюдаются случаи, когда текущие значения ПЭС выходят за пределы как нижней, так и верхней квартилей. При этом следует отметить, что перед землетрясением фон девиаций, в основном, негативный, а сразу после землетрясения наблюдаются интенсивные положительные отклонения. Если обратить внимание на отрицательные вариации, то можно отметить, что в течение нескольких суток перед главным толчком 12 мая отрицательные девиации появляются ежедневно в одно и то же время суток (14–16 ч по местному времени), что в соответствии с п. 2 является одним из морфологических признаков ионосферных предвестников землетрясений. Относительные девиации ПЭС показаны на рис. 5в. Местное время соответствует времени, когда отмечались отрицательные девиации ПЭС перед сильными землетрясениями на Тайване [Liu et al., 2004].

Отрицательные девиации продолжались еще в течение 3-х суток, а 16 мая наблюдалась интенсивная положительная девиация. Этот процесс прекратился к 20 мая, когда закончился основной период сейсмической активности (см. рис. 2).

6. ДИНАМИКА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

Учитывая, что эпицентр землетрясения, а также станции *kunm* и *shao* расположены на внешнем склоне северного гребня экваториальной аномалии, следует учитывать динамику аномалии в период подготовки землетрясения. Для этого нами исследовалась динамика широтного разреза экваториальной аномалии по данным IONEX на долготе 105° E, практически совпадающей с долготой эпицентра (рис. 6). Учитывая, что максимум развития экваториальной аномалии наблюдается в послеполуденные часы, широтные разрезы строились на момент 14:00 LT. Были отмечены следующие эффекты: *a* – общая депрессия электронного содержания в экваториальной аномалии; *b* – искажение формы экваториальной аномалии с сильной депрессией южного горба вплоть до его полного исчезновения; *v* – движение горбов экваториальной аномалии по направлению к геомагнитному экватору в период подготовки землетрясения и в течение периода высокой сейсмической активности.

Рассмотрим эти эффекты более подробно. Как видно из рис. 6а, где представлены все разрезы экваториальной аномалии в период с 26 апреля по 25 мая, электронное содержание в экваториальной аномалии (площадь под кривой) минимально в день землетрясения 12 мая (заштриховано черным цветом). При этом южный горб аномалии практически отсутствует.

Обратимся к форме аномалии (рис. 6б). Если 26 и 27 апреля аномалия имеет форму, соответствующую сезону [Mendillo et al., 2001] (южный горб выше северного, т.к. период весеннего равноденствия пройден), то уже 29 апреля мы наблюдаем резкую депрессию южного горба. При этом форма аномалии 29 апреля такая же, как и 12 мая, но электронное содержание выше. И только к концу мая (24 мая) восстанавливается форма аномалии, соответствующая сезону. Следует иметь в ви-

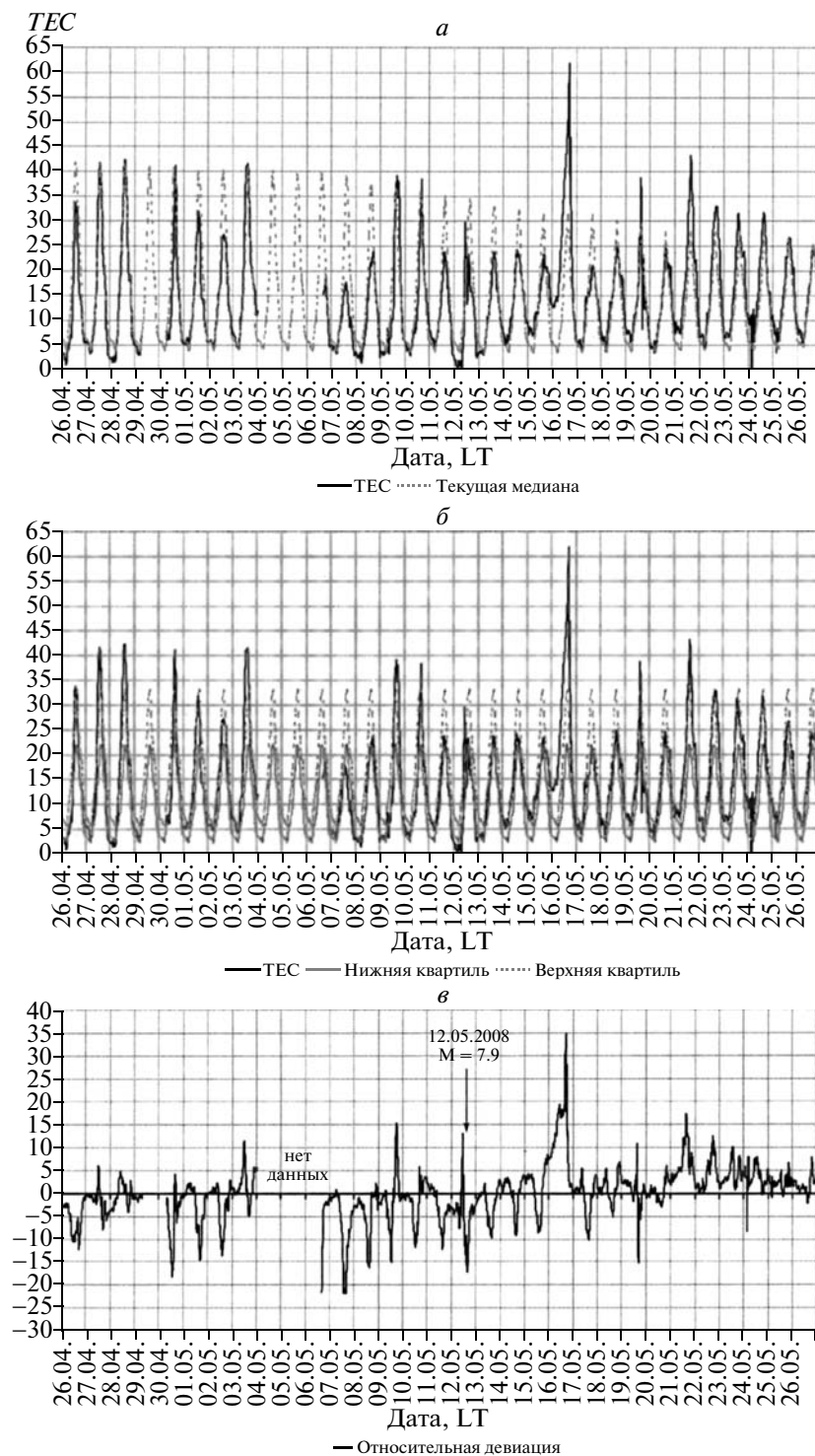


Рис. 5. *a* – Временная изменчивость *TEC* и текущей медианы с 26.04.2008 г. по 26.05.2008 г. по данным приемной *GPS*-станции *kunm*; *б* – Временная изменчивость *TEC*, нижняя квартиль и верхняя квартиль с 26.04.2008 по 26.04.2003 по данным приемной *GPS*-станции *kunm*; *в* – Временные изменения относительных девиаций с 26.04.2008 г. по 26.05.2008 г. по данным *GPS*-станции *kunm*.

ду, что сейсмическая активность продолжалась еще в течение месяца после основного толчка, что привело к возмущенному состоянию ионосферы и пониженному электронному содержанию в течение длительного промежутка времени.

Низкое пространственное разрешение индекса *IONEX* по широте (2.5°) не позволило провести детальное исследование движения горбов экваториальной аномалии в зависимости от широты, но тем не менее на рис. 6*в* явно заметно их смещение

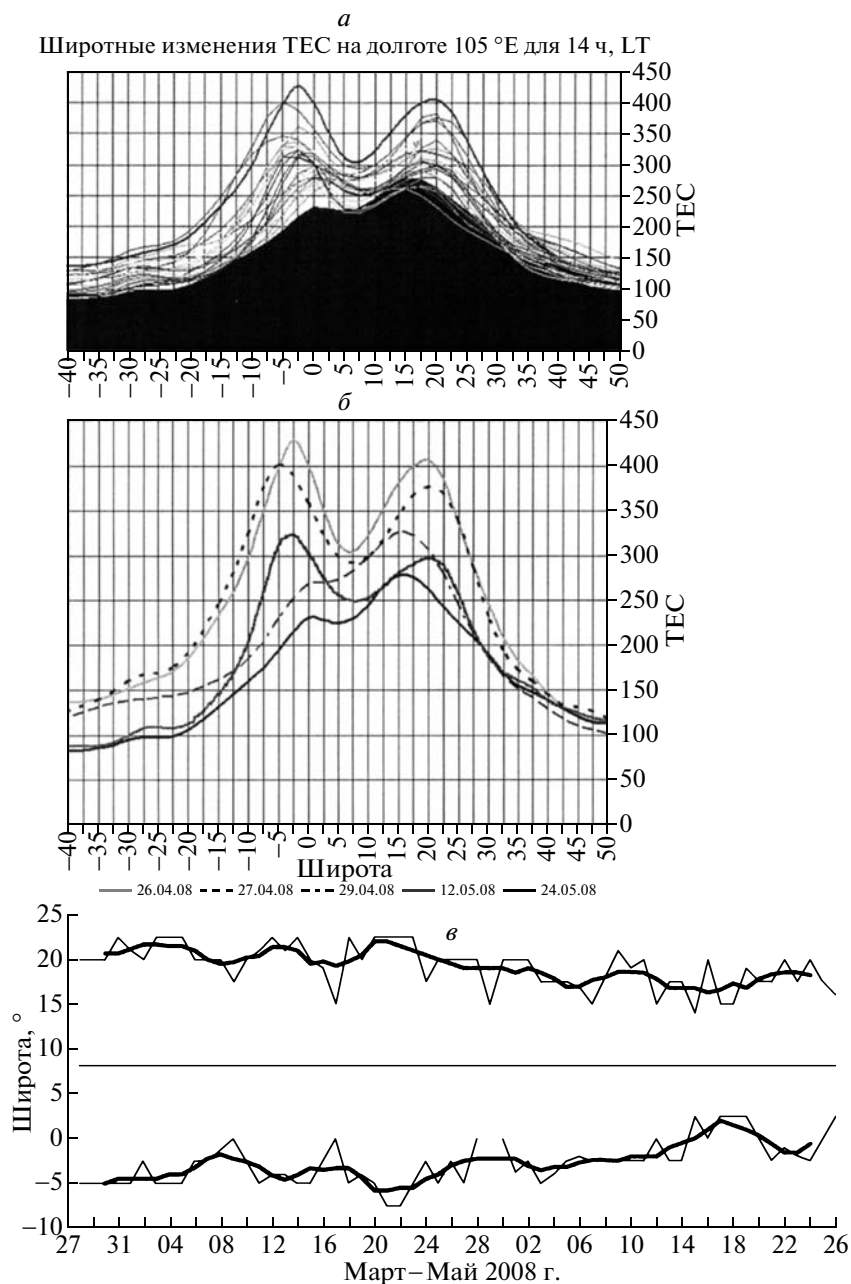


Рис. 6. *a* – широтные разрезы ПЭС на долготе 105° Е в области экваториальной аномалии в период с 26 апреля по 25 мая; *b* – Вариации формы экваториальной аномалии на долготе 105° Е перед и после Венчуаньского землетрясения; *v* – Широта положения горбов экваториальной аномалии на долготе 105° Е в период Венчуаньского землетрясения.

к геомагнитному экватору по мере приближения землетрясения и в течение всего периода сейсмической активности. На рисунке тонкой ломаной линией показаны положения северного и южного горбов экваториальной аномалии, а жирной линией – текущее среднее значение положения горбов по 5-ти дням. Прямая горизонтальная линия обозначает широту положения геомагнитного экватора на долготе 105° Е, составляющую 8.2° N. Сближение горбов экваториальной аномалии начинается с 21 апреля. Один из наиболее аномальных

дней – 29 апреля, когда южный горб экваториальной аномалии не идентифицируется. Приближение горбов к магнитному экватору продолжается в течение всего сейсмоактивного периода и достигает своего максимума 18 мая, за неделю до второго по силе ($M = 6$) толчка в серии, имевшего место 25 мая. Из рисунка видно, что в отдельные дни, и даже в течение нескольких суток широтные смещения и северного, и южного горбов экваториальной аномалии могут превышать 5°.

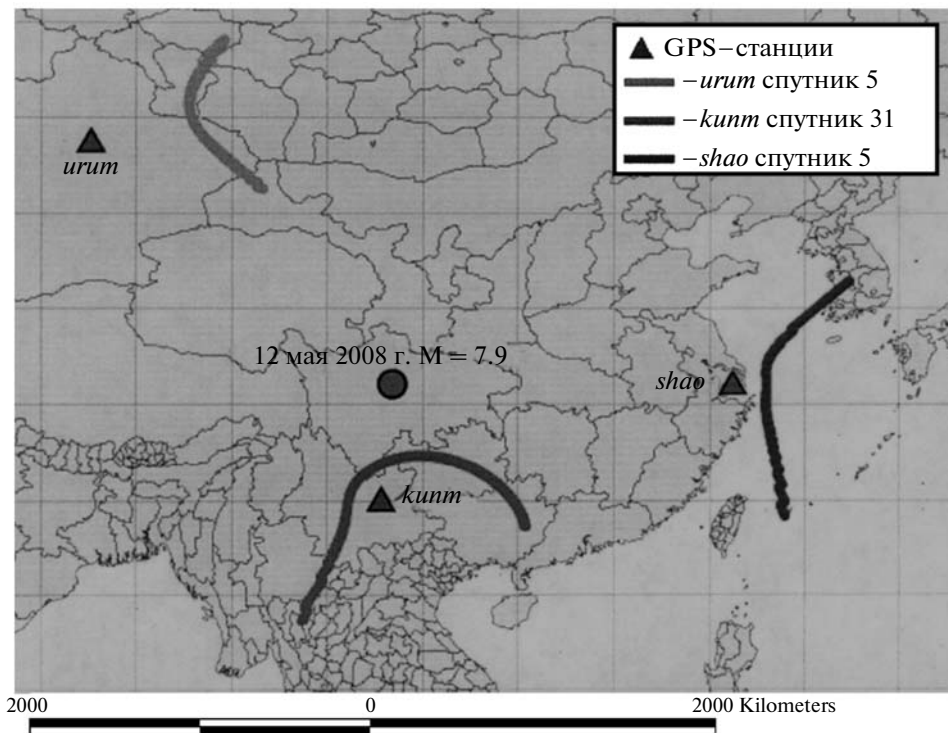


Рис. 7. Карта траекторий подионосферных точек для спутников 5 и 31 навигационной системы GPS.

Отметим, что искажение формы экваториальной аномалии (сезонная асимметрия) наблюдается только в долготном секторе вблизи эпицентра. Уже на долготе 80° E для всего периода с конца апреля по 12 мая южный горб экваториальной аномалии выше северного.

7. ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

В работе [Бондур и Смирнов, 2005] была предложена методика восстановления вертикальных профилей электронной концентрации по данным навигационных систем. Для спутника № 31 навигационной системы GPS, который в период подготовки Венчуаньского землетрясения находился над горизонтом, были рассчитаны вертикальные профили электронной концентрации для периода с 27 апреля по 14 мая для местного времени 16:00 LT. При этом положение подионосферной точки в течение нескольких часов находилось вблизи эпицентра и станции *kunm* (см. рис. 7). Динамика электронной концентрации в максимуме слоя F2 подтверждает результат, полученный по данным индекса IONEX: уменьшение электронной концентрации по мере приближения сейсмического толчка. Вариации электронной концентрации NmF2 в период с 27 апреля по 12 мая составляют ~500%. Минимальное значе-

ние электронной концентрации ($4.56 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$) наблюдалось 7 мая, за 5 суток до основного сейсмического толчка, что почти в 5 раз меньше значения концентрации, наблюдавшегося 27 апреля ($2.27 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$), см. рис. 8а.

Для рассчитанных профилей нами исследовалось поведение шкалы высот. В качестве предварительной оценки использовалась разность между высотой, где концентрация в e раз меньше концентрации в максимуме $h_{[HmF2/e]}$ и $HmF2$:

$$H = h_{[HmF2/e]} - HmF2.$$

Как видно из графика изменений величины H , шкала высот увеличивается на 15 км с приближением момента землетрясения, подтверждая зависимость, описанную в работе [Pulinets et al., 2007]. После землетрясения шкала высот начинает уменьшаться (рис. 8б).

8. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ АНОМАЛИЙ

В отсутствие спутниковых средств вертикального зондирования ионосферы, которые позволяли бы проводить глобальное картирование ионосферы и определять положение ионосферных аномалий, связанных с сейсмической активностью [Пулинец и Легенька, 2003], наиболее адекватным средством являются глобальные карты ПЭС, создаваемые с помощью индекса IONEX

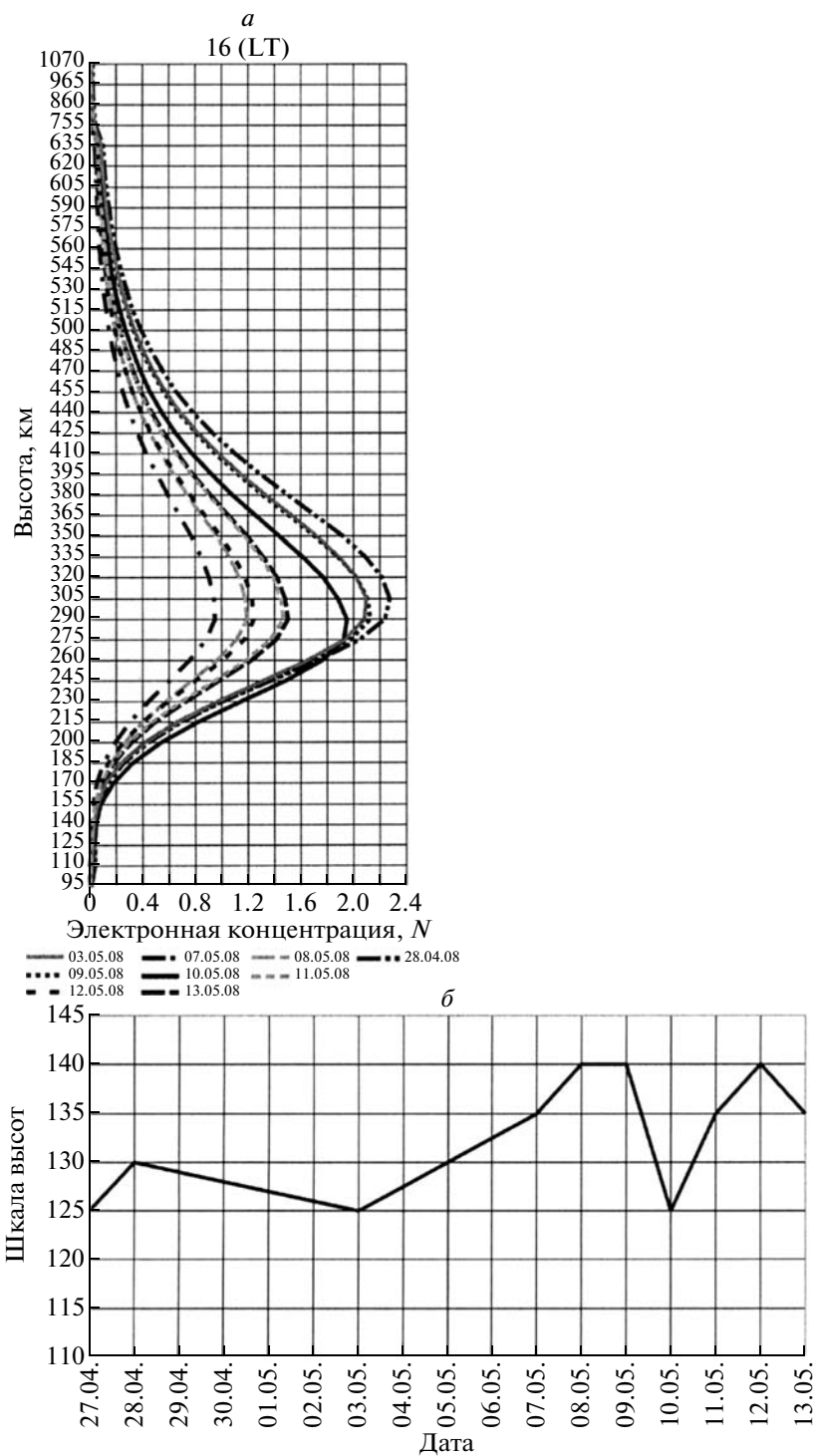


Рис. 8. *a* – вертикальные профили электронной концентрации, восстановленные по данным полного электронного содержания для 16:00 LT в период с 27 апреля по 13 мая 2008 г.; *b* – вариации шкалы высот вертикальных профилей электронной концентрации, представленных на рис. 8*a*.

[Hernández-Pajares, 2003]. Учитывая, что наибольшая изменчивость низкоширотной ионосферы связана с динамикой экваториальной аномалии, нами были проанализированы карты 08:00UT, что соответствует 16:00LT (рис. 9) для долготы поло-

жения эпицентра землетрясения и максимума в развитии экваториальной аномалии. Для выявления изменчивости ионосферы строились карты отклонения (девиации) ПЭС от среднемесячных значений. Данные точечных измерений по назем-

ным станциям уже позволили определить наиболее аномальные дни: 29 апреля, 9 мая и др. Глобальные карты в целом подтверждают замеченную динамику, но при этом выявляется целый ряд особенностей, которые невозможно определить по точечным измерениям:

1. Максимальная изменчивость наблюдается не точно над эпицентром, а южнее, в горбах экваториальной аномалии.

2. Наблюдается долготный эффект, при котором слева и справа от эпицентра заметны девиации разных знаков (3 и 9 мая).

3. В день землетрясения, через два часа после толчка в ионосфере образовалась глобальная долготная неоднородность чрезвычайно высокой амплитуды ($\sim \pm 20$ ТЕС). При этом отрицательные девиации наблюдались, в основном на западе эпицентра, а положительные – на востоке от него. Глобальная неоднородность существовала в течение 3-х дней после толчка, и затем исчезла.

4. В большинстве случаев девиация наблюдалась в обоих горбах экваториальной аномалии, а не только в ближайшем к эпицентру, северном горбе.

Как видно из рисунков, ионосферные аномалии центрированы по долготе вокруг эпицентра будущего землетрясения, их широтная протяженность достигает 40° по широте, и в различные дни от 60 до 120° по долготе. В течение 3-х дней после землетрясения возмущения в низкоширотной ионосфере имеют глобальный характер. Вся морфология наблюдаемых явлений свидетельствует о том, что главным возмущающим фактором является зональное электрическое поле, приводящее к генерации экваториального электроджета и модификации экваториальной аномалии [Клименко и др., 2006].

9. СОЗДАНИЕ МАСКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Статистические исследования ионосферных эффектов на о-ве Тайвань [Пулинец и др., 2002; Liu et al., 2006] позволили обнаружить подобие ионосферных вариаций, наблюдаемых наземной станцией (ионозонд или приемник *GPS*), для различных землетрясений в случае, если эпицентры этих землетрясений находятся в одном и том же сейсмически активном районе. Это позволило выдвинуть концепцию так называемой маски ионосферного предвестника – трехмерного представления аномальных вариаций в координатах: дни до землетрясения – местное время – амплитуда девиаций. Поскольку методика построения маски подробно описана в работе [Пулинец и др., 2002], мы не будем останавливаться на этом, а перейдем сразу к анализу полученных данных. Учитывая, что в данных станции *kunt* имеются пропуски, для построения маски Венчуаньского зем-

летрясения нами были использованы данные станции *shao*, которые представлены на рис. 10. Как и в случае о-ва Тайвань [Liu et al., 2000], основным наблюдаемым эффектом являются отрицательные вариации в послеполуденные часы. Они начинают появляться еще 29 апреля и длятся до 15 мая. Наиболее длительный интервал отрицательных вариаций в течение суток (6 часов – с 10 до 16 ч по местному времени) наблюдался 6 мая, за 6 суток до землетрясения. Полученная маска практически идентична маске для о-ва Тайвань, с той лишь разницей, что в настоящей работе рассмотрен более длительный интервал наблюдений как до, так и после землетрясения. Это подтверждает вывод о подобии ионосферных предвестников и их зависимости от местного времени.

10. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ различных ионосферных параметров, полученных с помощью навигационной системы *GPS*, показал, что все морфологические признаки ионосферных предвестников землетрясений, описанные в литературе, присутствуют в зарегистрированных вариациях в период подготовки Венчуаньского землетрясения. Очень низкий уровень солнечной и геомагнитной активности дает право утверждать, что основным источником наблюдаемых вариаций в ионосфере является сейсмическая активность. Местное время, когда наблюдаются максимальные вариации, соответствует времени максимального развития экваториальной аномалии, а глобальные карты и широтные профили экваториальной аномалии позволяют утверждать, что источником наблюдаемых вариаций являются дополнительные электрические поля, которые нарушают нормальный суточный ход развития экваториальной аномалии. Обычно сезонную асимметрию экваториальной аномалии связывают с термосферным ветром, направленным из летнего полушария в зимнее [Mendillo et al., 2001], однако в данном случае нарушение формы гребней экваториальной аномалии трудно объяснить термосферными ветрами. Скорее всего, следует также рассматривать возможность появления аномальных электрических полей как в зональном, так и в меридиональном направлении. По крайней мере, следует рассмотреть возможность меридионального градиента зонального электрического поля. Подобный подход при моделировании эффектов электрических полей позволяет объяснить наблюдаемые аномалии перед землетрясениями в низкоширотной ионосфере [Намгаладзе и др., 2009]. Механизм генерации аномального электрического поля перед землетрясениями описан в работе [Pulinets, 2009a]. Таким образом, можно считать, что наблюдаемые эффекты в настоящее время получили свое объ-

$\Delta\text{TEC}, t = 8\text{h (UT), China, 12.05.08, } M = 7.9$

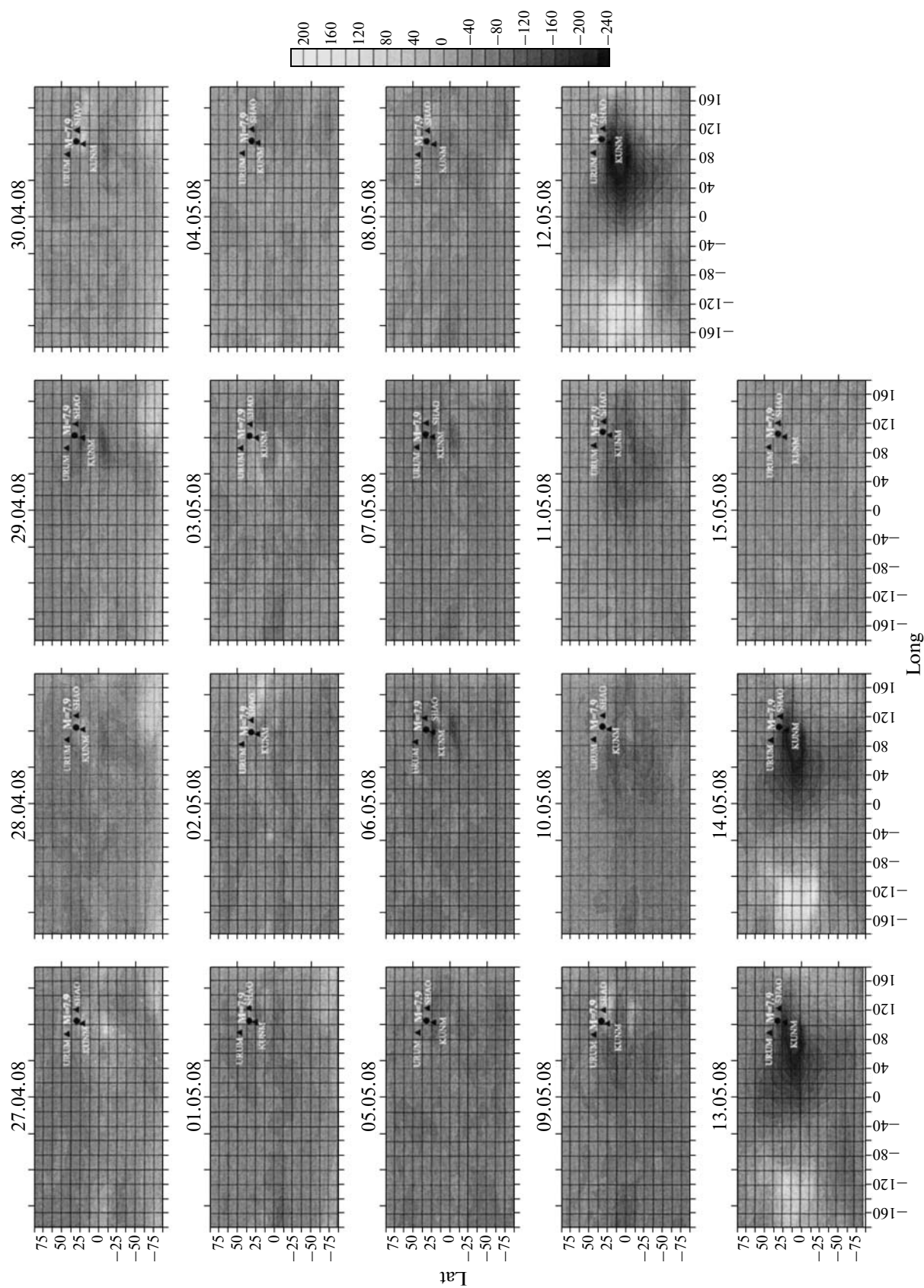


Рис. 9. Вариации глобального распределения отклонения полного электронного содержания от среднемесячного значения по данным индекса IONEX для периода с 27 апреля по 15 мая 2008 г.

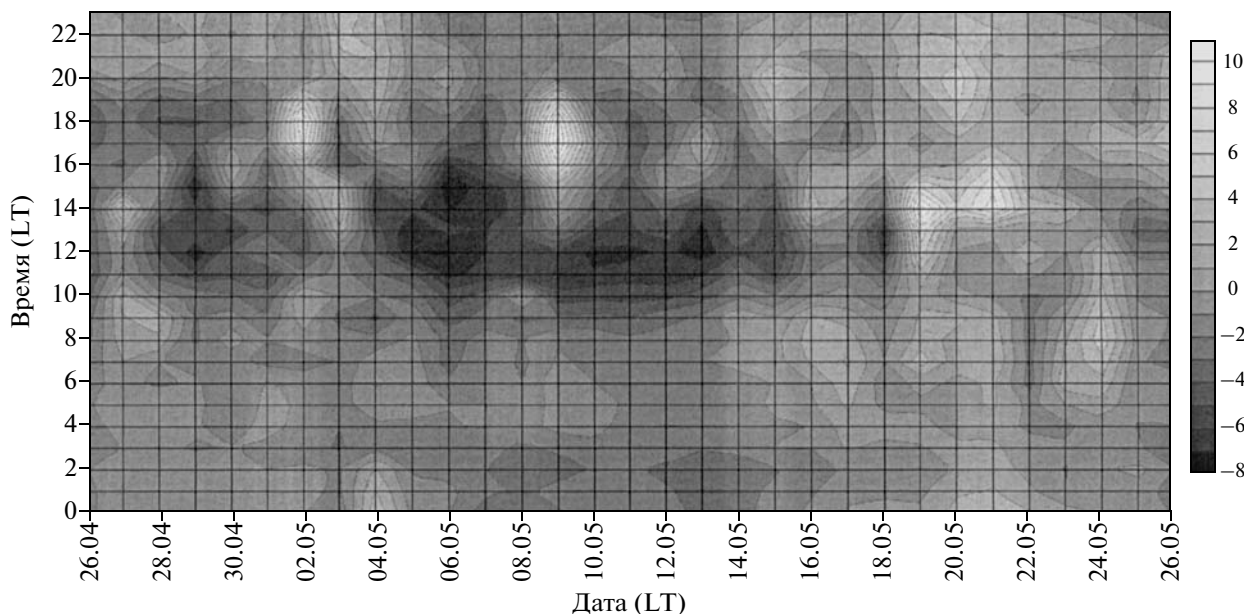


Рис. 10. Маска ионосферного предвестника в период с 26 апреля по 26 мая 2008 г. при подготовке землетрясения в Китае, произошедшего 12 мая 2008 г. ($M = 7.9$). Данные получены с GPS-станции *shao*.

яснение в рамках предлагаемых физических моделей.

Помимо подобия основных признаков ионосферных предвестников Венчуаньского землетрясения, обнаруженным ранее и описанным в литературе, следует отметить ряд новых результатов и отличий. Отрицательные девиации начинают проявляться задолго до статистически определенного периода упреждения 5 суток. Они появляются с 29 апреля, т.е. за 2 недели до главного толчка. Обнаружена долготно-широтная асимметрия области подготовки землетрясения в ионосфере. Если по широте область подготовки соответствует оценкам [Добровольский, 1991], то в зональном направлении она намного превосходит эти оценки, что, по-видимому, связано с механизмами формирования экваториального электроджета. Совершенно неожиданным является эффект глобального возмущения низкоширотной ионосферы в течение трех дней после землетрясения. Такое явление наблюдается впервые и требует своего осмысления.

Статья написана по материалам НИР в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // ДАН. Т. 402. № 5. С. 675–679. 2005.

– Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: АН СССР. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. 224 с. 1991.

– Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли: динамо-поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 46. № 5. С. 457–466. 2006.

– Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и численное моделирование ионосферных предвестников землетрясений, наблюдаемых в полном электронном содержании электронов // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 49. № 2. С. 267–277. 2009.

– Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Успехи физич. наук. Т. 41. № 5. С. 515–522. 1998а.

– Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 38. № 3. С. 188–193. 1998б.

– Пулинец С.А., Легенька А.Д. Динамика приэкваториальной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 42. № 2. С. 227–232. 2002.

– Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лью Я.Й. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ критических частот f_oF_2 на наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (остров Тайвань) // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 42. № 4. С. 508–513. 2002.

– Пулинец С.А., Легенька А.Д. Пространственно-временные характеристики крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации, наблю-

- даемых в области F ионосферы перед сильными землетрясениями // Космич. исслед. Т. 41. № 3. С. 221–229. 2003.
- *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I.* TEC anomalies – Local TEC changes prior to earthquakes or TEC response to solar and geomagnetic activity changes? // Earth Planets Space. V. 60. P. 961–966. 2008.
 - *Bošková J., Šmilauer J., Jiříček F., Trška P.* Is the ion composition of outer ionosphere related to seismic activity // J. Atmos. Terr. Physics. V. 55. P. 1689–1695. 1993.
 - *Chuo Y.J., Chen Y.I., Liu J.Y., Pulinets S.A.* Ionospheric f_oF_2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area // Adv. Space Res. V. 27. P. 1305–1310. 2001.
 - *Ciraolo L., Spalla P.* Comparison of ionospheric total electron content from the Navy Navigation Satellite System and the GPS // Radio Sci. V. 32. P. 1071–1080. 1997.
 - *Hernández-Pajares M.* Performance of IGS Ionosphere TEC Maps // IGS IONO WG Report, March 2003. http://maite152.upc.es/~iones3/doc/IGS_IONO_report_April2003_7.pdf.
 - *Liu J.Y., Chen Y.I., Pulinets S.A., Tsai Y.B., Chuo Y.J.* Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6$ Taiwan earthquakes // Geophys. Res. Lett. V. 27. P. 3113–3116. 2000.
 - *Liu J.Y., Chjo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulinets S.A., Yu S.B.* Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements // Ann. Geophysicae. V. 22. P. 1585–1593. 2004.
 - *Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.* A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. A05304. doi:10.1029/2005JA011333. 2006.
 - *Mendillo M., Meriwether J., Miodni M.* Testing the thermospheric neutral wind suppression mechanism for day-to-day variability of equatorial F // J. Geophys. Res. V. 106. P. 3655–3663. 2001.
 - *Pulinets S.A.* Seismic activity as a source of the ionospheric variability // Adv. Space Res. V. 22. P. 903–906. 1998.
 - *Pulinets S.A.* Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) Model // Electromagnetic phenomena associated with Earthquakes. Research Signpost. Japan. P. 328–338. 2009a.
 - *Pulinets S.A.* Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults // Adv. Space Res doi:10.1016/j.asr.2009.04.038.2009.
 - *Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.K.* Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atm.-Solar Terr. Phys. V. 65. P. 1337–1347. 2003.
 - *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric Precursors of Earthquakes // Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 315 p. 2004.
 - *Pulinets S.A., Biagi P., Tramutoli V., Legen'ka A.D., Depuev V.Kh.* Irpinia earthquake 23 November 1980 – Lesson from Nature revealed by joint data analysis // Annals of Geophysics. V. 50. P. 61–78. 2007.
 - *Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I.* Modification of the low-latitude ionosphere before the 26 December 2004 Indonesian earthquake // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 6. P. 817–823. 2006.