

ИЗМЕНЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ НАД ИРКУТСКОМ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ТУВЕ

¹Л.В. Чистякова, ²Л.П. Корсунова, ¹А.В. Подлесный, ²В.В. Хегай

IONOSPHERIC VARIATIONS OVER IRKUTSK BEFORE STRONG EARTHQUAKES IN TUVA

¹L.V. Chistyakova, ²L.P. Korsunova, ¹A.V. Podlesny, ²V.V. Khegai

На основе результатов измерений на двух близко расположенных станциях вертикального зондирования ионосферы (Иркутск, Торы) и слабонаклонной трассе Усолье–Торы получены данные об изменениях ионосферных параметров за несколько суток до землетрясений в Туве 27.12.2011 г. и 26.02.2012 г. магнитудой $M>6$. Измерения проводились с различным временным разрешением, что позволило изучить изменения как в суточных вариациях основных ионосферных параметров, так и в неоднородной структуре на высотах 100–200 км. Получено, что за 1–2 сут до моментов землетрясений наблюдаются существенные отклонения как в параметрах спорадического слоя E, так и в критической частоте слоя F2. Отмечается также рост степени неоднородности в нижней ионосфере.

Measurements made at two closely-spaced vertical-incidence sounders (Irkutsk, Tory) and in the low-inclined path Usolye-Tory have yielded data on changes of ionospheric parameters occurring several days before the earthquakes of magnitude $M>6$ in Tuva on December 27, 2011 and February 26, 2012. The measurements were carried out with different time resolutions that allowed us to examine changes both in diurnal variations of main ionospheric parameters and in an inhomogeneous structure at heights 100–200 km. We have found out that 1–2 days before earthquakes there are considerable deviations both in the sporadic E-layer and in the F2-layer critical frequency. Also noted is an increase in the degree of inhomogeneity in the lower ionosphere.

Введение

Эффекты в ионосфере, предшествующие сильным землетрясениям, изучаются уже несколько десятилетий. Обнаружены изменения в различных ионосферных параметрах как в слое F2, так и в области E на значительном удалении от эпицентра землетрясения [Пулинец, Лью, 1999; Silina et al., 2001; Ondoh, 2003, 2006; Pulinets, Boyarchuk, 2004; Chen et al., 2004; Корсунова, Хегай, 2005, 2008; Liu et al., 2006; Blaunstein, Hayakawa, 2009; Perrone et al., 2010]. Кроме того, в последние годы с помощью спутников интенсивно исследуются аномалии полного электронного содержания (TEC) в различных сейсмоактивных зонах [Liu et al., 2004; Sarkar et al., 2007; Saroso et al., 2008]. Тем не менее наиболее полные сведения о поведении различных слоев ионосферы в период подготовки землетрясений получены по данным наземного радиозондирования. Благодаря этим исследованиям существует феноменологическое описание ионосферных предвестников землетрясений и выявлен ряд закономерностей их появления [Pulinets, Boyarchuk, 2004; Liu et al., 2006; Korsunova, Khegai, 2006; Корсунова, Хегай, 2008; Liporovskaya et al., 2009].

Обнаружено, что предвестниковые аномалии в ионосферных параметрах чаще всего отмечаются за 3–5 сут до землетрясений магнитудой $M>5$. В [Liu et al., 2006] показано, что отклонения критической частоты слоя F2, превышающие фоновые значения на величину стандартного отклонения, с вероятностью более 50 % являются предвестниками землетрясений. Отмечено также, что появление таких аномалий связано с магнитудой готовящегося землетрясения и расстоянием R до его эпицентра. Этот факт согласуется с результатами, полученными по наблюдениям за спорадическим слоем E в [Корсунова, Хегай, 2005; Korsunova, Khegai, 2006, 2008; Perrone et al., 2010]. С одной стороны, при изучении ионосферных эффектов, предшествовавших земле-

трясениям с $M>5.0$ (в эпигнозе), было обнаружено, что значимые аномалии в Es появлялись тем раньше, чем больше магнитуда землетрясения и чем ближе к эпицентру находился пункт наблюдения [Korsunova, Khegai, 2006].

С другой стороны, в [Hobara, Parrot, 2005] приведены данные, свидетельствующие о том, что для сверхсильного землетрясения с $M=8.3$ аномальные отклонения в F2-слое наблюдаются за четыре дня до толчка на расстояниях в тысячи километров от эпицентра практически в одно и то же время. При этом были рассмотрены результаты ионосферных измерений на десяти станциях вертикального зондирования ионосферы. Эффекты, предваряющие землетрясение, отмечались на всех станциях, входящих в зону подготовки землетрясения, определяемую радиусом Добровольского:

$$\lg(r)=0.43M,$$

где r – радиус зоны подготовки (в км) [Добровольский и др., 1980]. Из этих данных следует, что заранее появление предвестников не зависит от расстояния до эпицентра. В то же время ионосферные наблюдения для ряда менее сильных землетрясений ($5 < M < 7$), произошедших на $R < 500$ км от пункта регистрации, показали, что чаще всего аномалии, предшествующие землетрясениям, появлялись за 1–5 сут до главного подземного удара [Silina et al., 2001; Liu et al., 2006].

По данным наблюдений в Иркутске перед Култукским землетрясением 27.08.2008 г. ($M=6.1$, $R \sim 100$ км) наблюдались аномальные изменения ионосферных параметров с различным временем упреждения момента землетрясения [Корсунова и др., 2010]. Представляется интересным рассмотреть результаты ионосферных измерений за несколько дней до сильных землетрясений с $M>6.0$ в Туве, так как Иркутск попадает в зону подготовки этих землетрясений.

Малоизученным является вопрос об изменениях неоднородной структуры ионосферы перед землетрясениями. Сведения о неоднородностях электронной концентрации в нижней ионосфере можно получить при исследовании поведения диапазона полупрозрачности слоя Es, характеризующего степень неоднородности слоя [Горбунова, Швед, 1984], и такого редкого явления, как Es-рассеяние [Липеровская и др., 2000]. Рассеяние радиоволн происходит на неоднородностях с характерными масштабами десятки-сотни метров, возникающих в результате турбулизации на высотах Е-области ионосферы.

В результате специальных измерений [Липеровская и др., 2000] было установлено, что непрерывные интервалы наблюдения Es-рассеяния составляют 1–2 мин, так что при стандартных ионосферных наблюдениях это явление не может быть обнаружено. В ходе этих же измерений не удалось сделать однозначный вывод об изменениях в неоднородной структуре ионосферы в период подготовки землетрясений. В некоторых случаях за 1–3 сут до момента землетрясения наблюдался рост числа рассеянных отражений, в других случаях этого не отмечалось. Вместе с тем по наблюдениям радиосигналов в полосе частот 150–180 кГц и 5–40 МГц за 20–24 ч до сейсмического события отмечались аномальные эффекты в ионосферной плазме: стратификация квазирегулярных структур, генерация дополнительных спорадических образований, увеличение числа нерегулярных всплесков [Blaunstein, Hayakawa, 2009]. Отмечался также рост величины диапазона полупрозрачности Е-спорадического, совпадающий по времени с всплесками и федингом радиосигналов.

Есть уникальная возможность исследовать эффекты подготовки сильных коровых землетрясений как с помощью стандартного цифрового ионозонда DPS-4 в Иркутске, так и по учащенным (1 мин) измерениям на экспериментальной установке «Моностат» в Торах. Кроме того, в декабре 2011 г. и феврале 2012 г. проводился прием радиосигналов в минутном режиме на короткой трассе Усолье–Торы. Одновременные наблюдения на этих установках позволяют исследовать изменения как в регулярных вариациях параметров ионосферы, так и в неоднородной структуре нижней ионосферы.

Целью работы является изучение изменений в параметрах Е-спорадического и F2-слоя различной продолжительности на заключительном этапе подготовки двух сильных коровых землетрясений в Туве по данным ионосферных измерений в Иркутске и Торах.

Анализ данных и результаты

Землетрясения в Туве произошли 27.12.2011 г. в 15:22 UT ($\varphi=51.84^\circ$ N, $\lambda=95.91^\circ$ E, глубина гипоцентра $h=15$ км, $M=6.6$) и 26.02.2012 г. в 06:17 UT ($\varphi=51.73^\circ$ N, $\lambda=95.92^\circ$ E, глубина гипоцентра $h=12$ км, $M=6.7$) на расстоянии $R \approx 560$ км от Иркутска (по данным USGS, сайт [\[http://neic.usgs.gov\]](http://neic.usgs.gov)). Ионосферные эффекты подготовки землетрясений в диапазоне магнитуд $5 \leq M \leq 7$ в других сейсмоактивных зонах (Япония, Камчатка) в настоящее время в определенной мере изучены [Корсунова, Хегай, 2008; Korsunova et al., 2010], однако для Байкаль-

ского региона детальные исследования таких эффектов еще не проводились. Поэтому нами исследовалось поведение ионосферы над Иркутском за несколько суток до моментов землетрясений в Туве с целью выявления аномальных отклонений в параметрах Es- и F2-слоев, предшествовавших этим землетрясениям.

Анализировались данные вертикального зондирования ионосферы, полученные с помощью стандартного цифрового ионозонда DPS-4 в Иркутске ($\varphi=52.47^\circ$ N, $\lambda=104.03^\circ$ E), работающего в 15-минутном режиме, и экспериментального цифрового ионозонда «Моностат» в Торах ($\varphi=51.8^\circ$ N, $\lambda=103.04^\circ$ E). Описание и характеристики «Моностата» приведены в [Подлесный и др., 2008; Куркин и др., 2010]. Расстояние между пунктами наблюдений составляет около 150 км, поэтому получаемые ионосферные характеристики должны быть близки между собой. Преимущество наблюдений на «Моностате» в том, что измерения на нем производятся с дискретностью 1 мин, что позволяет изучать кратковременные процессы в ионосфере. Одновременно были получены ДЧХ на короткой трассе Усолье–Торы, средняя точка которой отстоит от Иркутска на ~ 60 км. Измерения на трассе проводились в одноминутном режиме. Поиск эффектов подготовки тувинских землетрясений продолжительностью более часа проводился по 15-минутным измерениям на цифровом ионозонде и минутным на «Моностате» и на трассе Усолье–Торы.

В качестве иллюстрации получаемых первичных данных на рис. 1 представлен суточный ход критической частоты слоя F2 (f_0F2) за 27 декабря 2011 г. Момент землетрясения отмечен стрелкой. Все наблюдения дают практически одинаковые результаты, а из рисунка следует, что и в день землетрясения сохраняются характерные временные изменения критической частоты слоя F2 с максимумом в дневные часы ($\sim 11:00$ – $15:00$ LT) и минимумом в ночные часы ($\sim 20:00$ – $23:00$ LT). Можно лишь отметить резкое повышение f_0F2 около 12:45 LT на ~ 1.5 МГц с последующим уменьшением на ~ 0.5 МГц около 13:15 LT относительно средних дневных значений. Частота экранирования f_b Es увеличивается в дневное время и еще сильнее возрастает в ночные часы.

На рис. 2 приведены суточные изменения действующей высоты слоя Es за тот же день по данным DPS-4 (косые крестики) и «Моностата» (треугольники

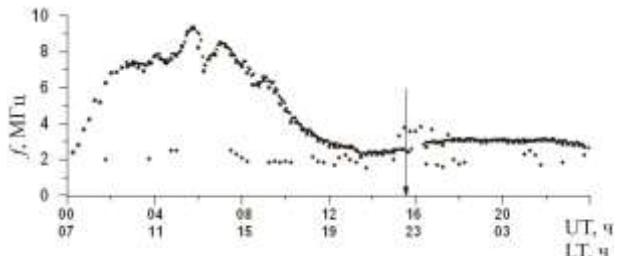


Рис. 1. Суточный ход критической частоты слоя F2 27.12.2011 г. по наблюдениям с помощью цифрового ионозонда DPS-4 (\times), «Моностата» (\blacktriangle), на трассе Усолье–Торы (\blacksquare) и частоты экранирования f_b Es по измерениям DPS-4 (\blacklozenge). Момент землетрясения показан вертикальной линией со стрелкой.

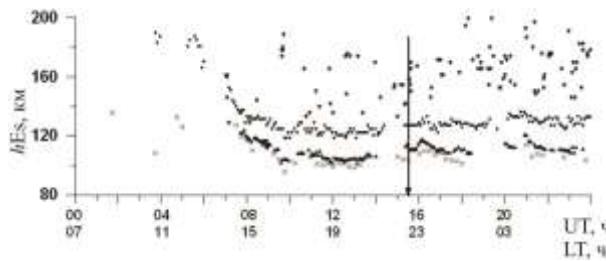


Рис. 2. Суточные изменения действующей высоты слоя Es 27.12.2011 г. по данным DPS-4 и «Моностата» и дальностей распространения сигнала через Es на слабонаклонной трассе Усолье–Торы. Обозначения те же, что и на рис. 1. Нерегулярные кратковременные отражения показаны звездочками.

ки – регулярные отражения, нерегулярные отражения – звездочки), а также дальности отражений от Es (квадратики) на трассе Усолье–Торы. Здесь также наблюдается характерный для средних широт суточный ход $h'E$ s с максимумом в интервале ~11–15 LT с последующим уменьшением в темное время суток. При этом данные DPS-4 и «Моностата» практически совпадают. Суточные изменения дальностей распространения радиосигнала через Es на слабонаклонной трассе Усолье–Торы коррелируют с соответствующими изменениями $h'E$ s по данным вертикального зондирования ионосферы, хотя их абсолютные значения, естественно, различаются. На рис. 2 показаны также нерегулярные отражения от аномально высокого Es (звездочки), зарегистрированные «Моностатом». Область появления этих отражений ~120–200 км. Время их существования в среднем менее двух минут, поэтому они не регистрируются DPS-4. Частота появления этих отражений максимальна вочные часы (00–07 LT).

Представленные выше рис. 1 и 2 приведены лишь для визуализации исходных экспериментальных данных, получаемых на задействованных установках. Для детального рассмотрения предполагаемых ионосферных эффектов подготовки землетрясений необходимо найти отклонения всех исследуемых параметров от их фоновых значений в течение нескольких дней, предшествовавших землетрясениям. С этой целью были вычислены отклонения действующей высоты ($h'E$ s), частоты экранирования (f_0E s), предельной частоты отражения от Es (f_0 Es), величины диапазона полупрозрачности ($\{f_0-f_b\}E$ s) и критической частоты слоя F2 (f_0F 2) по измерениям DPS-4 в течение четырех дней перед обоими землетрясениями. Выбор временного интервала объясняется тем, что краткосрочные предвестники землетрясений обнаруживаются в ионосфере обычно именно в такой промежуток времени. В качестве фоновых величин использовались медианы, вычисленные по магнитоспокойным дням ($A_p \leq 15$ нТл) месяцев, в которые произошли землетрясения. Для частотных параметров определялась относительная величина отклонений: $\{\Delta f_0F2/f_{0med}\}$, $\{\Delta f_0Es/f_{0med}Es\}$, $\{\Delta f_bEs/f_{bmed}Es\}$, $\{f_0-f_b\}Es/f_{bmed}Es$. Данная процедура аналогична той, которая применялась при исследовании эффектов подготовки Култукского землетрясения 27.08.2008 г. [Корсунова и др., 2010].

На рис. 3 представлены временные изменения отклонений исследуемых параметров Es- и F2-слоев за 24–27 декабря 2011 г. Соответствующие стандартные отклонения показаны горизонтальными штриховыми линиями. Вертикальной линией со стрелкой указан момент землетрясения. Видно, что за 1.2–1.5 сут до толчка во всех параметрах Es отмечаются положительные всплески длительностью 1–1.5 ч, превышающие стандартные отклонения. Всплески в параметрах Es-слоя сопровождаются понижениями критической частоты слоя F2, что характерно для краткосрочных предвестников землетрясений [Liu et al., 2006]. Следует отметить также значительное повышение f_0F 2 в 22–24 UT 25.12.2011 г., сопровождаемое ростом величины диапазона полупрозрачности Es. Всплески в $h'E$ s, наблюдающиеся в ~02 UT и ~6–7 UT 24–25.12.2011 г., не сопровождаются значимыми отклонениями в частотных параметрах Es в течение этих суток, а потому не могут быть отнесены к предвестниковым эффектам согласно критериям выбора предвестников [Корсунова, Хегай, 2008]. Небольшие отклонения в параметрах ионосферных слоев наблюдаются и за 3–4 ч до момента землетрясения. Предполагаемые предвестники землетрясения на рис. 3 затемнены.

На рис. 4 показаны временные изменения тех же ионосферных параметров, что и на рис. 3, за 23–26 февраля 2012 г., т. е. перед вторым сильным землетрясением в Туве. И хотя спорадический слой появлялся в эти дни довольно редко, значимые всплески в его параметрах отмечаются 24.02.2012 г. в интервале 8–9 UT. За этими всплесками следует значимый рост критической частоты слоя F2 в ~12 UT, продолжающийся до ~17 UT. Это означает, что указанное увеличение критической частоты слоя F2, возможно, является откликом на подготовку землетрясения, как и предшествующие ему эффекты в слое Es. Увеличение диапазона полупрозрачности Es наблюдается за сутки до других эффектов в E-спорадическом. За 5 ч до толчка наблюдаются всплески в частотных параметрах Es и в критической частоте слоя F2, превышающие стандартные отклонения. Предполагаемые предвестники землетрясения на рис. 4 затемнены.

Несмотря на различия во временных изменениях ионосферных параметров за несколько суток до моментов указанных землетрясений, можно выделить и некоторые общие черты. Во-первых, это появление высокого спорадического слоя E, сопровождаемое всплесками в его частотных параметрах, за 1–2 сут до главного подземного удара. При этом изменения в слое F2 запаздывают относительно изменений в Es-слое. Во-вторых, за несколько часов до моментов обоих землетрясений отмечаются значимые изменения как в параметрах Es, так и в f_0F 2.

Обсуждение результатов

Как показали исследования 30 коровых землетрясений с $M \geq 5$ в Японии [Korsunova, Khegai, 2006], для ионосферных предвестников землетрясений характерно появление аномально высокого Es с $\Delta h \geq 10$ км, сопровождаемое значимыми всплесками в частотных параметрах Es- и F2-слоев продолжитель-

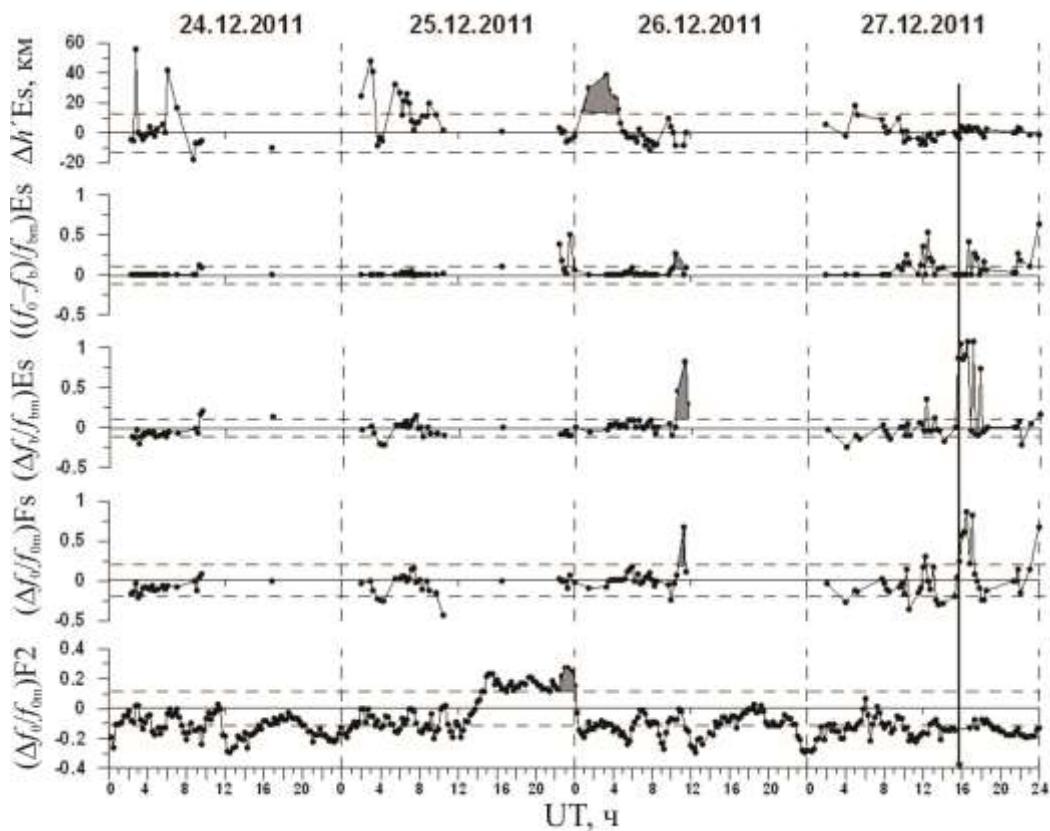


Рис. 3. Временные изменения отклонений в параметрах Es- и F2-слоев в период с 24 по 27 декабря 2011 г. по данным DPS-4. Момент землетрясения отмечен вертикальной линией со стрелкой.

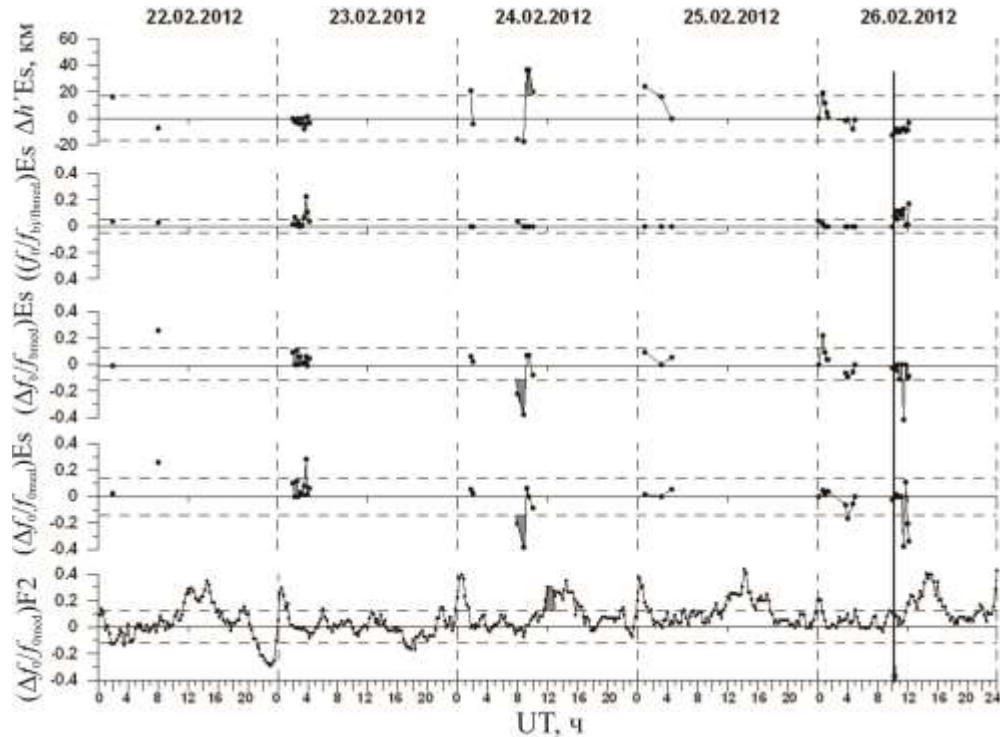


Рис. 4. Временные изменения отклонений в параметрах Es- и F2-слоев в период с 23 по 26 февраля 2012 г. по данным DPS-4. Момент землетрясения отмечен вертикальной линией со стрелкой.

ностью 1–2 ч в те же самые сутки. Все эти особенности можно видеть на рис. 3–4 за 1.2 и 1.9 сут соответственно перед землетрясениями 27.12.2011 г. и 26.02.2012 г. в Туве. Кроме того, характер изменений частотных параметров спорадического слоя Е и

f_0F2 на заключительном этапе подготовки землетрясений соответствует описанному в [Silina et al., 2001] для ряда среднеазиатских коровых землетрясений. Учитывая все вышесказанное, выявленные особенности в изменениях ионосферных параметров можно отнести

к вероятным предвестникам рассмотренных выше Тувинских землетрясений.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что в отсутствие данных по слою Es выделить предвестники в F2-слое даже в спокойных геомагнитных условиях крайне затруднительно. Можно видеть несколько значимых отклонений в f_0F2 (положительных и отрицательных), превышающих стандартные отклонения, в течение трех суток перед землетрясениями. Неясно вне связи с Es, какие из них имеют сейсмогенное происхождение, а какие обусловлены другими геофизическими факторами. Поэтому крайне важно, чтобы исследование ионосферных эффектов, предшествующих землетрясениям, проводилось на основании анализа нескольких параметров, отражающих изменения состояния нижних и верхних слоев ионосферы (Es и F2).

Как следует из рис. 3, одновременно с резким увеличением f_0F2 в 22–24 UT 25.12.2011 г. происходит рост величины диапазона полупрозрачности слоя Es, характеризующего степень неоднородности слоя. Всплески в f_0F2 и $(f_0-f_b)/f_{bmed}$, которые превышают соответствующие стандартные отклонения, наблюдались и 23.02.2012 г., за трое суток до второго землетрясения (см. рис. 4). Аналогичный характер изменений этих параметров при подготовке сильных коровых землетрясений отмечался и в работе [Silina et al., 2001] по наблюдениям в Средней Азии. Об увеличении степени неоднородности нижней ионосферы свидетельствует также рост числа аномальных отражений на трассе Усолье–Торы. Таким образом, можно констатировать, что на интервале от одного до трех дней до сильного землетрясения происходят существенные изменения в неоднородной структуре Е-области ионосферы.

Обращает на себя внимание различие в поведении частотных параметров Es- и F2-слоев при подготовке землетрясений практически одинаковой мощности с одним и тем же очагом. Геофизическая обстановка была спокойной как в декабре 2011 г., так и в феврале 2012 г., так что отрицательные отклонения частотных параметров Es перед землетрясением 26.02.2012 г., по-видимому, не связаны с геомагнитной активностью. Возможно, различные эффекты подготовки указанных землетрясений обусловлены разными условиями формирования приземных электрических полей сейсмического источника, которые могли оказать влияние на ионосферу. Расчеты, проведенные в работе [Ким и др., 1994], показали, что знак отклонений электронной концентрации в области Е определяется направлением E_z -компоненты приземного электрического поля. При E_z , направленной вверх, электронная концентрация понижается над областью локализации поля, при направлении E_z вниз происходит ее увеличение. В отсутствие измерений приземного электрического поля в эпицентральной области указанных землетрясений можно лишь отметить, что на практике отмечаются оба типа изменений атмосферного электрического поля перед землетрясениями [Руленко, 2000].

Сравним эффекты подготовки сильных коровых землетрясений в ионосфере над Иркутском, эпицен-

тры которых находились на различных расстояниях от пункта наблюдения. Култукское землетрясение 27.08.2008 г. с $M=6.1$ произошло вблизи Иркутска ($R\sim 100$ км), а тувинские землетрясения с $M=6.6$ –6.7 произошли на значительном удалении от него ($R\sim 560$ км). Предполагаемый краткосрочный предвестник Култукского землетрясения появился за 1.12 сут до момента землетрясения [Корсунова и др., 2010], а времена упреждения предвестниками тувинских землетрясений составляют ~1.2 и 1.9 сут соответственно. По-видимому, ионосферные предвестники на заключительном этапе подготовки коровых землетрясений магнитудами в диапазоне 6.0–7.0 появляются за 1–2 сут до момента главного подземного удара. Знание этого факта является немаловажным для обеспечения сейсмической безопасности населения. Однако пока ничего определенного нельзя сказать о том, как различать эффекты подготовки для близких и далеких землетрясений. Это может быть задачей последующих исследований.

Заключение

В данной работе приведены результаты исследования эффектов в ионосфере над Иркутском в периоды подготовки сильных коровых землетрясений в Туве 27.12.2011 г. и 26.02.2012 г. магнитудами $M=6.6$ и 6.7 соответственно. Были рассмотрены результаты одновременных измерений на двух расположенных близко ионозондах вертикального зондирования в Иркутске и Торах (с различной дискретностью по времени), дополненные наблюдениями распространения радиоволн на короткой трассе Усолье–Торы. Все эти измерения позволили обнаружить значимые изменения ионосферных параметров за несколько дней и часов до момента главного подземного удара.

В первую очередь следует отметить рост высоты спорадического слоя Е, который сопровождается изменениями частотных параметров Es (f_b, f_0) такой же продолжительности. Это свидетельствует о существенных изменениях электронной концентрации и структуры слоя на заключительной стадии подготовки землетрясений. Кроме того, аномалии в Es сопровождаются соответствующими изменениями критической частоты слоя F2. Соответствие этих эффектов критериям идентификации ионосферных предвестников землетрясений [Корсунова, Хегай, 2008] позволяет отнести рассмотренные эффекты в ионосфере к краткосрочным предвестникам землетрясений с временами упреждения моментов землетрясений $\Delta T=1$ –2 сут.

За несколько суток до указанных землетрясений обнаружены также значительные изменения диапазона полупрозрачности Es, обусловленные увеличением степени неоднородности слоя, и рост числа рассеянных отражений на высотах 100–200 км. Изменения неоднородной структуры слоя опережают изменения основных параметров Е-спорадического примерно на 0.5 сут.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 11-05-00892-а, а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты № 8388 и 16.518.11.7097). Авторы

благодарят К.Г. Ратовского за предоставленные данные, полученные на цифровом ионозонде DPS-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горбунова Т.А., Швед Г.М. Анализ полупрозрачности слоя Es как индикатора турбулентности при динамически однородных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24, № 1. С. 30–34.

Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячким В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений // Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 7–24.

Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможности образования слоя ионов металлов в Е-области ночной среднеширотной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, № 5. С. 114–119.

Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможном ионосферном предвестнике землетрясений // Физика Земли. 1994. № 3. С. 37–40.

Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмоионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 5. С. 706–711.

Корсунова Л.П., Хегай В.В. Анализ сейсмоионосферных возмущений на цепочке японских станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 3. С. 407–415.

Корсунова Л.П., Чистякова Л.В., Хегай В.В. Эффекты в спорадическом слое Е в период подготовки землетрясения 27.08.2008 по наблюдениям в Иркутске // Солнечно-земная физика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. Вып. 16. С. 149–153.

Куркин В.И., Пирог О.М., Подлесный А.В. и др. Спорадические явления в ионосфере над Тункинской долиной, зарегистрированные во время специального эксперимента в августе 2009 г. // Материалы Российской научной конференции «Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой» (6–10 сентября 2010 г., г. Улан-Удэ). М., 2010. С. 570–579.

Липеровская Е.В., Силина А.С., Сайдшоев А. и др. Об эффекте Es-рассеяния ночных спорадических слоев // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40, № 1. С. 120–122.

Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 2. С. 111–118.

Подлесный А.В., Медведев А.В., Брынько И.Г. Реализация однопозиционного ЛЧМ-ионозонда вертикального зондирования ионосферы // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2008), Воронеж. 2008. Т. 3. С. 2455–2461.

Пулинец С.А., Лью Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. акад. В.Н. Страхова и д.ф.м.н. В.А. Липеровского М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 37–55.

Пулинец С.А., Романов А.А., Урличич Ю.М. и др. Первые результаты пилотного проекта по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 1. С. 123–132.

Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.

Blaunstein N., Hayakawa M. Short-term ionospheric precursors of earthquakes using vertical and oblique ionosondes // Phys. Chem. Earth. V. 34, Iss. 6–7 (Special Issue): Electro-

magnetic Phenomena Associated with Earthquakes and Volcanoes. 2009. P. 496–507.

Chen Y.-I., Liu J.-Y., Tsai Y.-B., Chen C.-S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // Terr. Atmos. Ocean. Sci. J. 2004. V. 15, N 3. P. 385–396.

Hegai V.V., Kim V.P., Nikiforova L.I. A possible generation mechanism of acoustic-gravity waves in the ionosphere before strong earthquake // J. Earthquake Prediction Research. 1997. N 6. P. 584–589.

Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y. The ionospheric effect of atmospheric gravity waves excited prior to strong earthquake // Adv. Space Res. 2006. V. 37, N 4. P. 653–659.

Hobara Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67, N 7. P. 677–685. doi:10.1016/j.jastp.2005.02.006.

Kim V.P., Hegai V.V. A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude F2 region ionosphere // Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), 1999. P. 619–627.

Korsunova L.P., Khegai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. 2006. N 6. GI3005. doi:10.1029/2005GI000122.

Korsunova L.P., Mikhailov Yu.M., Experimental evidence of the correlation between possible precursors of earthquakes in near surface quasistatic electric fields and in the ionosphere // Geomagn. and Aeron. 2010. V. 50, N 7. Special Issue 1. P. 920–926.

Liperovskaya E.V., Bogdanov V.V., Biagi P.-F., et al. Day-time variations of f_0F2 connected to strong earthquakes // Natural Hazards Earth System. 2009. V. 9, N 1. P. 53–59.

Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements // Ann. Geophys. 2004. V. 22, N 5. P. 1585–1593.

Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A05304. doi:10.1029/2005JA011333.

Ondoh T. Anomalous sporadic-E layers observed before M 7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake; Terrestrial gas emanation model // Adv. Polar Upper Atmos. Res. 2003. N. 17. P. 96–108.

Ondoh T. Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and groundwater before large earthquakes of $M > 6.5$ // Adv. Space Res. 2009. V. 43, N 2. P. 214–223.

Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophys. 2010. V. 28, N. 4. P. 941–950.

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., et al. Quasielectrostatic model of atmosphere–thermosphere–ionosphere coupling // Adv. Space Res. 2000. V. 26, N 8. P. 1209–1218.

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer, 2004. P. 315.

Sarkar S., Gwal A.K., Parrot M. Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69, N 13. P. 1524–1540.

Saroso S., Liu J.Y., Hattori K., Chen C.H. Ionospheric GPS TEC anomalies and $M \geq 5.9$ earthquakes in Indonesia during 1993–2002 // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2008. V. 19, N 5. P. 481–488. doi: 10.3319/TAO.2008.19.5.481(T).

Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2001. V. 1, N 3. P. 113–118.

Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M. Formation mechanism of the lower ionospheric disturbances by the atmospheric electric current over a seismic region // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, N 11. P. 1260–1268.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Россия