

## Атмосферные и ионосферные аномалии, предшествующие сильному экваториальному землетрясению на Суматре

С. А. Имашев<sup>1</sup>, Л. Г. Свердлик<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, 720049, Кыргызстан

<sup>2</sup> Кыргызско-российский славянский университет, Бишкек, 720000, Кыргызстан  
E-mail: l.sverdlik@mail.ru

Спутниковое дистанционное зондирование играет важнейшую роль в изучении динамических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы/ионосферы, и взаимодействия между этими слоями и литосферой. Представляем результаты сравнительного анализа аномальных вариаций температуры в нижней атмосфере и полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, основанных на глобальных данных реанализа MERRA-2 и навигационной системы GNSS/GPS и относящихся к периоду сильной сейсмической активности. Задача выделения и идентификации предсейсмических возмущений, которые наблюдались в процессе подготовки крупного низкоширотного землетрясения магнитудой  $M = 8,6$  и его афтершока  $M = 8,2$ , произошедших на Суматре (Индонезия) 11 апреля 2012 г., решалась на основе применения разработанных и апробированных ранее алгоритмов. Реакция верхней тропосферы/нижней стратосферы (UTLS) и ионосферы на предстоящее сильное землетрясение при спокойных геомагнитных условиях проявлялась в аномальном изменении температуры и ПЭС соответственно. Аномалии располагались вблизи эпицентра землетрясения и достигали максимума 6 апреля 2012 г. (за 6 дней до события). В отличие от мезомасштабного температурного возмущения в UTLS аномалия ПЭС имела значительно больший горизонтальный размер, составляющий несколько тысяч километров. При всём различии пространственных масштабов и динамики временной эволюции возмущений в ионосфере и атмосфере области аномальных значений исследуемых параметров в момент максимального развития располагались вблизи эпицентра и были достаточно близки по форме. В качестве вероятного механизма взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы рассматривалось усиление активности процесса генерации длиннопериодных атмосферных гравитационных волн.

**Ключевые слова:** спутниковые измерения, температура, землетрясение, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, ионосфера, интегральный параметр, аномалия, геомагнитная активность,  $D_{st}$ -индекс

Одобрена к печати: 10.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327

### Введение

В последние десятилетия с расширением глобальной сети станций ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система, *англ.* GNSS — Global Navigation Satellite System) и развитием технологий обработки спутниковых данных активно проводились исследования ионосферных возмущений, связанных с процессами подготовки сейсмических событий. В частности, целый спектр работ посвящён анализу предсейсмических аномальных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере (*англ.* Total Electron Content — TEC) (например, (Yao et al., 2012)). При этом данные ГНСС-наблюдений обеспечивают эффективный способ оценки значений TEC с высокой точностью и большим пространственным и временным охватом. Физической основой зондирования атмосферы выступает задержка и рефракция навигационных сигналов в ионосфере и тропосфере (Тертышников, Пулинец, 2013).

Для исследования аномальных изменений ПЭС, связанных с активизацией сейсмического процесса, обычно анализируют временные вариации пространственного распределения ПЭС в виде наборов карт, что позволяет выделить как пространственные масштабы самих аномалий, так и их продолжительность во времени.

Глобальные карты ПЭС (*англ.* Global Ionospheric Maps — GIMs) предоставляются различными центрами анализа данных ионосферы IAACs (*англ.* Ionosphere Associated Analysis

Centers) международной службы IGS (*англ.* International GNSS Service), которые используют открытые общедоступные наблюдения глобально распределённой сети беззапросных измерительных станций ГНСС (начиная с 1998 г.) с применением разных методов и исходных данных (Тертышников, Большаков, 2010; Тертышников и др., 2019; Hernández-Pajares et al., 2009). Относительно недорогие, высокоточные, непрерывные данные ПЭС на основе ГНСС использовались во многих исследованиях ионосферных аномалий, связанных с сильными землетрясениями (Oikonomou et al., 2021; Sasmal et al., 2021; Yao et al., 2012; Zhu et al., 2013). В то же время в ряде работ отмечается, что предсейсмические ионосферные возмущения по-прежнему остаются достаточно спорными (Zhu, Jiang, 2020). До сегодняшнего дня нет общепринятой точки зрения относительно физического механизма, которым осуществляется возбуждение сейсмогенных возмущений в атмосфере и ионосфере.

С учётом того, что эффекты в ионосфере представляются частью более сложных механизмов и динамических процессов взаимодействия, происходящих в атмосфере, включая тропосферу и стратосферу (Oikonomou et al., 2021), в настоящем исследовании проведена идентификация и сопоставление пространственных и временных распределений атмосферных и ионосферных аномалий, предшествующих землетрясению магнитудой  $M = 8,6$ , которое произошло на Суматре (Индонезия) 11 апреля 2012 г.

## Данные и методика

Крупнейшее низкоширотное землетрясение магнитудой  $M = 8,6$  и его афтершок  $M = 8,2$  произошли 11 апреля 2012 г. около западного побережья Северной Суматры (Индонезия) и стали результатом активизации разлома в океанической литосфере Индо-Австралийской плиты. Эти землетрясения с уникальным ударно-сдвиговым механизмом (Sahyadi, Heki, 2013), характеристики которых приведены в *таблице*, послужили примером, выбранным для иллюстрации вероятной связи сейсмического процесса с возмущениями, генерируемыми в атмосфере и ионосфере.

Характеристики исследуемых землетрясений (EQ) магнитудой  $M > 8,0$   
(Северная Суматра, Индонезия) (<http://earthquake.usgs.gov/>)

№	Год	Месяц	День	Время	Широта	Долгота	$M$	$D$ , км	Расположение
EQ01	2012	4	11	08:38:36	2,327	93,063	8,6	20,0	Северная Суматра
EQ02				10:43:10	0,802	92,463	8,2	25,1	

Для исследования пространственно-временных аномалий в вариациях ПЭС, предшествующих рассматриваемым событиям, были проанализированы глобальные карты ПЭС, предоставляемые центром анализа Бейханского университета (*англ.* Beihang University) (<http://ionosphere.cn>), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с данными официальных центров IGS (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>) как по качеству восстановления данных, так по разрешению во времени (Hu et al., 2020). Используемые в настоящей работе глобальные карты были получены в результате совместной обработки данных нескольких центров анализа сети IGS, имели стандартное пространственное разрешение ( $2,5^\circ$  по широте и  $5^\circ$  по долготе) и дискретизацию  $\Delta t = 1$  ч.

Для выделения пространственно-временных возмущений ПЭС, предшествующих сейсмическому событию, были построены карты распределения аномалий ( $\delta T E C$ ), рассчитанных для каждого момента времени и каждой точки пространства как модуль отклонения ПЭС от своего среднего значения за предыдущие 10 дней.

Исследование атмосферных эффектов землетрясений проводилось в разделённой тропополузой области верхней тропосферы/нижней стратосферы (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere — UTLS) (Свердлик, Имашев, 2015, 2019). Информация о временных и высотных

вариациях температуры атмосферы получена по данным глобального реанализа MERRA-2 (англ. Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>) на 12 изобарических уровнях ( $p_k$ ) от 500 до 40 гПа (от ~5 до 25 км) в узлах равномерной сетки  $0,5 \times 0,625^\circ$ . Дискретизация температурных данных  $T(t)$  по времени составляла  $\Delta t = 3$  ч. Для идентификации возмущений и анализа пространственно-временных распределений предсейсмических аномалий температуры в UTLS использовался разработанный ранее алгоритм (Свердлик, Имашев, 2020; Sverdlik, Imashev, 2020), выходные параметры которого (интегральные показатели  $D$  и  $D_{CORR}$ ) сопоставлялись с сейсмичностью. Значения параметра  $D_{CORR} > 1,0$  свидетельствовали о возмущённом состоянии атмосферы.

Известно, что эффект влияния солнечной активности, сильных и умеренных геомагнитных бурь затрагивает не только ионосферу, но и распространяется до нижних слоёв атмосферы (Chetia et al., 2017). Для оценки влияния солнечной активности мы использовали индекс экваториальной геомагнитной активности  $D_{st}$  по данным Центра земного и космического магнетизма Университета Киото, Япония (англ. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan) (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

## Результаты

### Аномалии пространственно-временного распределения ПЭС в ионосфере

При анализе карт распределения аномалий ПЭС было выявлено, что за ~6 дней до основного события в магнитно-сопряжённых областях наблюдались аномалии ПЭС, локализованные в пространстве вблизи эпицентра предстоящего землетрясения (рис. 1), что соответствует результатам предыдущих исследований (Zhu et al., 2013).

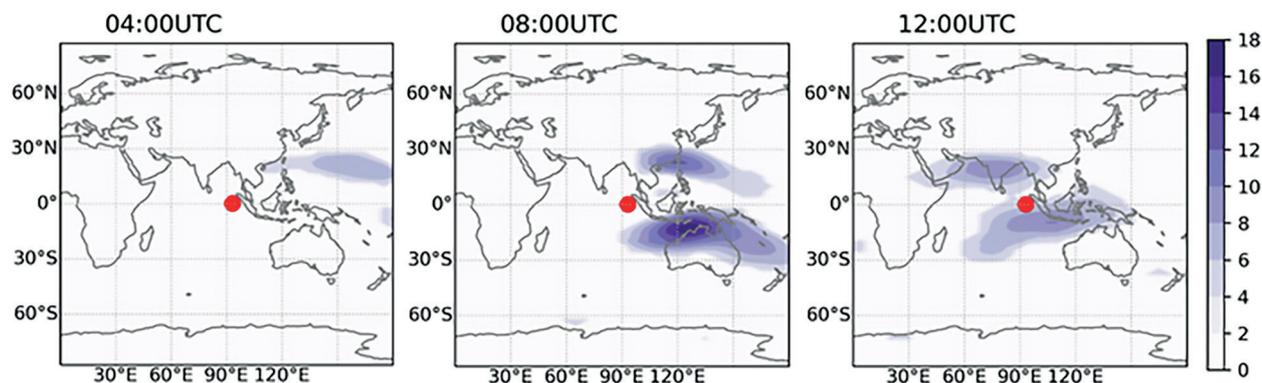


Рис. 1. Развитие во времени пространственного распределения аномалий ПЭС 05.04.2021 (за 6 дней до события  $M = 8,6$ , эпицентр которого отмечен красным маркером)

Наблюдаемые аномалии проявлялись в магнитно-сопряжённой области, как, например, в случае с ионосферными аномалиями перед катастрофическим землетрясением в Японии в 2011 г. (Yao et al., 2012). Время существования зафиксированных аномалий согласуется с результатами подобных работ (Oikonomou et al., 2021; Pulnits, Legenka, 2003), где отмечается, что характерная продолжительность предсейсмических возмущений в ионосфере составляет ~4–6 ч, тогда как ионосферные эффекты, связанные с геомагнитной активностью, проявляются более продолжительный период, составляющий 1–3 сут.

Для локализации во времени предсейсмических аномалий в вариациях ПЭС из наборов глобальных карт были извлечены временные ряды ПЭС над центрами аномалий (северная аномалия —  $(23^\circ; 120^\circ)$ ; южная аномалия —  $(-12,5^\circ; 110^\circ)$  (рис. 2, см. с. 321). Вейвлетограммы этих временных рядов, полученные с помощью вейвлета Морле, показывают,

что за 6 сут до сейсмического события наблюдалось как увеличение амплитуды самих аномалий, так и синхронное с этим уширение масштабного диапазона.

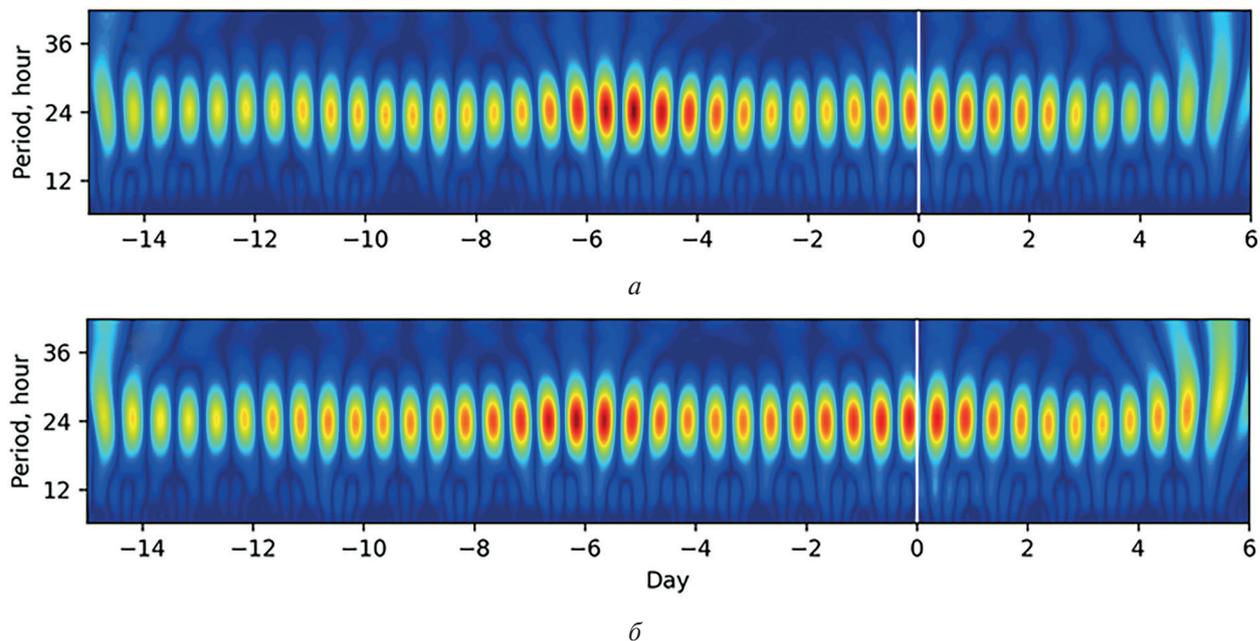


Рис. 2. Вейвлетограммы временных рядов ПЭС над центрами аномалий: *a* — северная аномалия, *б* — южная. По горизонтальной оси — дни относительно землетрясения (обозначено вертикальной линией); по вертикальной оси — временной масштаб в часах

На рис. 3 приведён временной ряд вариаций дисперсии ПЭС ( $\text{Var}(\text{TEC})$ ) в скользящем окне, равном 24 ч, над областью южной аномалии за 2 мес до и после землетрясения и соответствующие этому периоду вариации индекса  $D_{st}$ . На графике  $\text{Var}(\text{TEC})$  можно наблюдать три аномальных пика (A1, A2, A3). При сопоставлении аномалий ПЭС с вариациями  $D_{st}$  можно утверждать, что аномальные всплески A1 и A3 являются следствием сильных магнитных бурь (Chetia et al., 2017), тогда как самый значительный (по величине) аномальный пик (A2), предвещающий сейсмическое события, возникает в относительно спокойные дни, когда величина индекса  $D_{st}$  не опускалась ниже  $-50$  нТл (слабая магнитная буря).

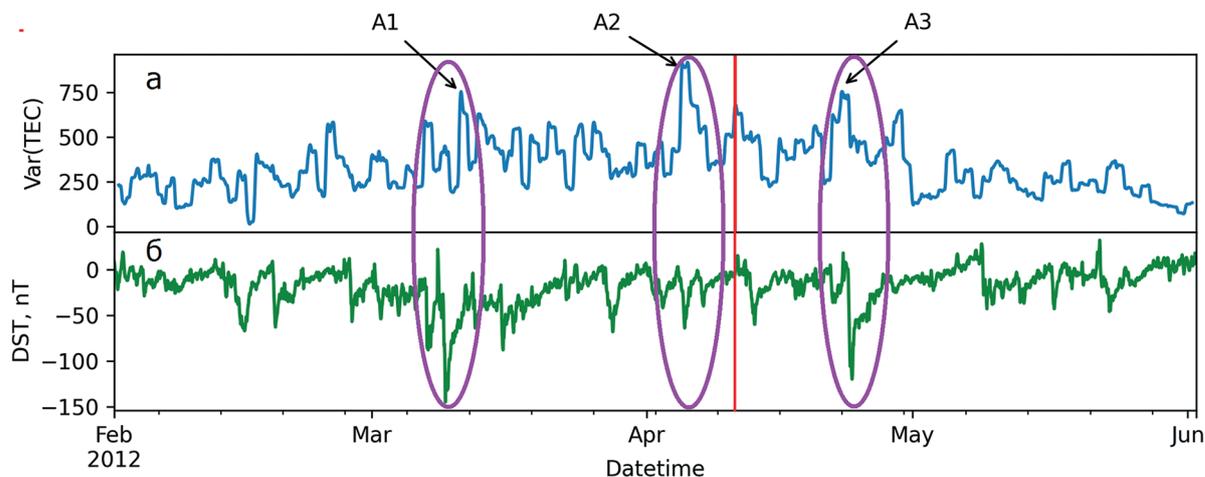


Рис. 3. Вариации дисперсии ПЭС ( $\text{Var}(\text{TEC})$ ) над южной аномалией в скользящем окне 24 ч (*a*) и индекса  $D_{st}$  (*б*). Овалами отмечены области аномальных значений ПЭС (A1, A2 и A3); вертикальная линия — момент сейсмического события  $M = 8,6$  (11 апреля 2012 г.)

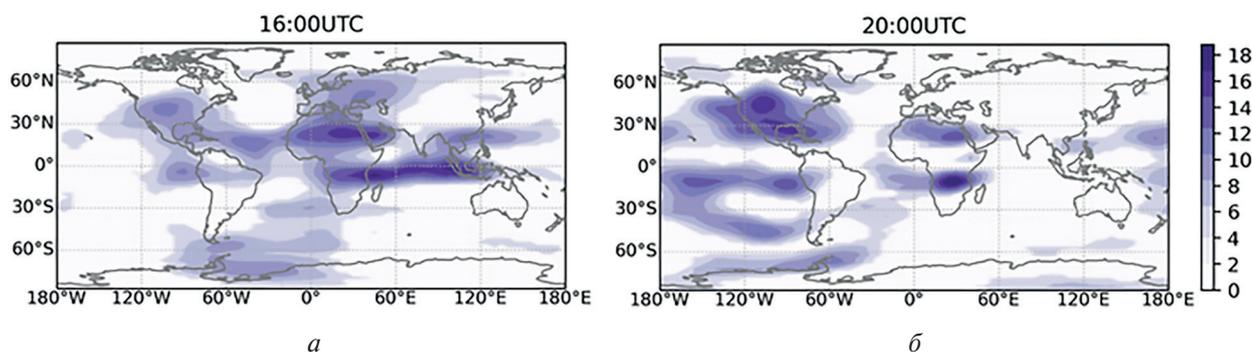


Рис. 4. Пространственное распределение аномалий ПЭС ( $\delta\text{TEC}$ ) во время магнитных бурь: *a* — 11.03.2012; *б* — 23.04.2012

Аномалии ПЭС ( $\delta\text{TEC}$ ), соответствующие двум упомянутым пикам и совпадающие по времени с магнитными бурями ( $A1$ ,  $A3$ ), отличаются от сейсмоионосферных возмущений и имеют одну характерную особенность — случайное, хаотически меняющееся во времени распределение по всему земному шару (рис. 4), тогда как предсейсмическая аномалия  $A2$  имеет отчётливые границы, в пределах которых она наблюдалась на протяжении нескольких часов (см. рис. 1).

### Возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере

Результаты спутниковых измерений температуры над эпицентральной областью землетрясений EQ01 и EQ02 на изобарических уровнях 100 и 70 гПа показаны на рис. 5а. Амплитуды короткопериодных вариаций температуры в феврале — мае 2012 г. были относительно низкими в абсолютном выражении, что характерно для измерений над океанической поверхностью, и составляли  $\pm 3,0$ – $6,0$  К.

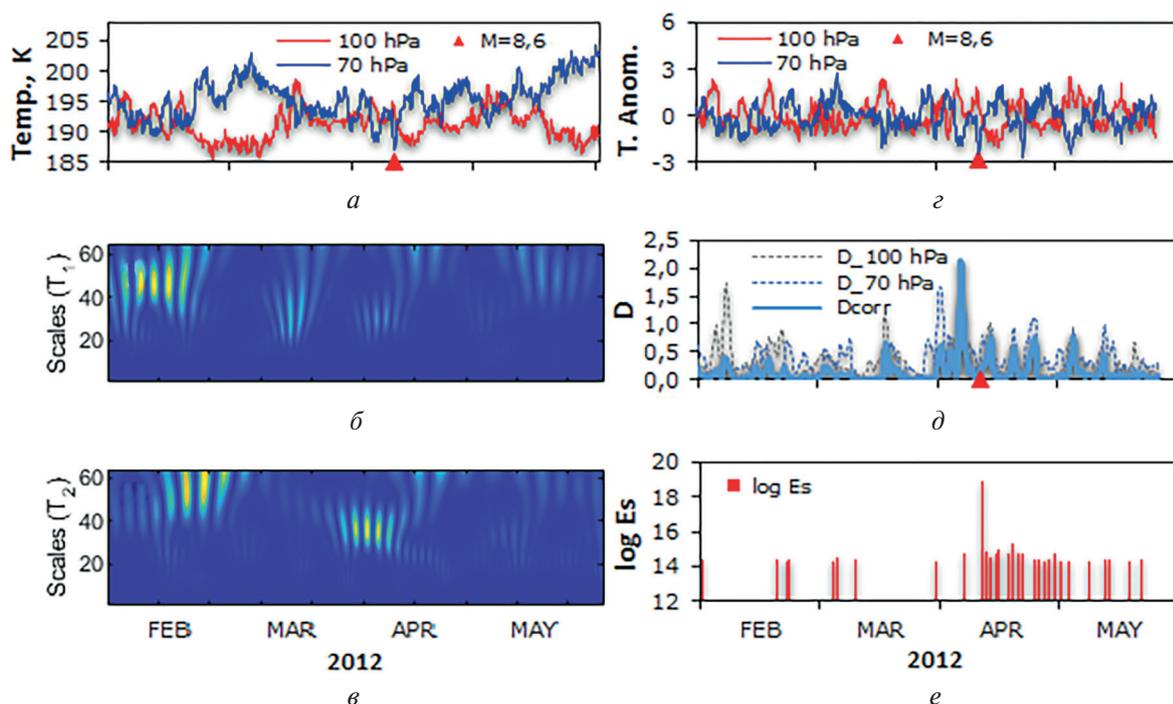
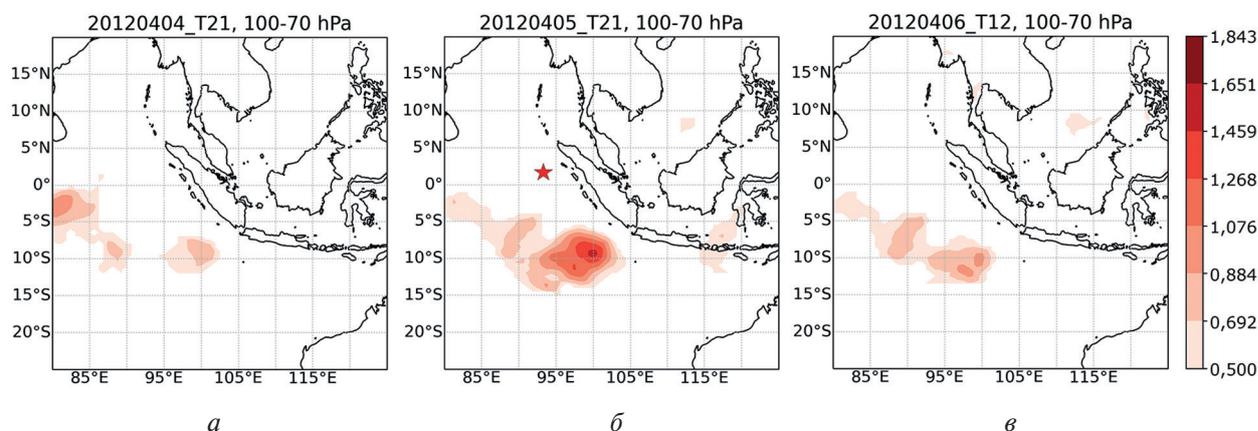


Рис. 5. Временные ряды температуры  $T_1$  и  $T_2$  на уровнях 100 и 70 гПа (*a*); спектры коэффициентов вейвлет-преобразования (*б*, *в*); аномалии температуры  $\Theta T$  (*г*); параметр  $D_{CORR}$  (*д*); логарифм сейсмической энергии  $\log E_s$  (*е*) в период с февраля по май 2012 г.

Исследование динамики периодичностей временных рядов температуры проводилось с использованием непрерывного вейвлет-преобразования (*англ.* Morlet wavelet) для диапазона периодов 1–8 сут (или от 8 до 64 отсчётов) (*рис. 5б, в*). Влияние сейсмической активности проявляется, как правило, в виде короткопериодных (4–6-суточных) спектральных компонент изменчивости температуры (Sverdlik, Imashev, 2020). Наиболее интенсивные вариации, как следует из представленных рисунков, отчётливо проявлялись на обоих изобарических уровнях и предвещали землетрясения EQ01 и EQ02. Результаты расчёта параметра  $D_{CORR}$  показали, что рассматриваемый период характеризовался единственным чётко выраженным максимумом ( $D_{CORR} > 2,0$ ), который наблюдался на протяжении 9 ч и указывал на аномальные предсейсмические изменения температуры (*рис. 5д*). Высокие значения  $D_{CORR}$  в условиях спокойной геомагнитной обстановки ( $|D_{st}| \leq 20$  нТл) могут рассматриваться как реакция верхней тропосферы/нижней стратосферы на активизацию процессов, связанных с подготовкой землетрясений (*рис. 5е*).



*Рис. 6.* Эволюция пространственного распределения температурной аномалии с 04.04.2012 (21:00 UTC) по 06.04.2012 (12:00 UTC). Эпицентр сейсмического события  $M = 8,6$  ( $93,063^\circ$  в.д.,  $2,327^\circ$  с. ш.) отмечен красным маркером

Набор карт пространственного распределения параметра  $D_{CORR}$  демонстрирует динамику процесса эволюции аномалий температуры в период с 4 апреля (21:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)) по 6 апреля (12:00 UTC) 2012 г. (*рис. 6*). Область наиболее высоких значений параметра  $D_{CORR}$  наблюдалась за 6 дней до землетрясения и была локализована в пространстве с горизонтальными размерами, составляющими порядка нескольких сот километров (см. *рис. 6б*). Её расположение оставалось достаточно стабильным на протяжении  $\sim 2$  сут.

### **Сравнение предсейсмических возмущений в атмосфере (UTLS) и ионосфере**

Результаты диагностирования предсейсмических возмущений в атмосфере (UTLS) и ионосфере представлены на *рис. 7а* в виде совмещённых карт пространственного распределения интегрального параметра  $D_{CORR}$  и аномалий  $\delta T_{ES}$  вместе с их проекциями на земную поверхность. Это позволило оценить взаимное расположение и размеры аномальных областей, относящиеся к моменту времени, когда значения исследуемых параметров были наибольшими. Максимум  $\delta T_{ES}$  был зарегистрирован в 08:00 UTC 5 апреля 2012 г., а аномальные изменения температуры в UTLS наблюдались с 00:00 UTC 4 апреля до 06:00 UTC 6 апреля 2012 г. В отличие от мезомасштабного температурного возмущения аномалия ПЭС имела значительно больший горизонтальный размер, составляющий несколько тысяч километров.

При всём различии пространственных масштабов и динамики временной эволюции возмущений в ионосфере (см. *рис. 1*) и атмосфере (см. *рис. 6*) области аномальных значений ис-

следуемых параметров в момент максимального развития (за 6 сут до землетрясений EQ01 и EQ02) располагались вблизи эпицентра, а их форма достаточно близко соответствовала друг другу. Такое совпадение двух независимо полученных результатов можно рассматривать как свидетельство корреляции между аномальными изменениями параметров атмосферы и ионосферы над эпицентральной областью предстоящего события, а соответственно, как подтверждение гипотезы о распространении возмущения через слои нижней атмосферы до ионосферных высот (Oikonomou et al., 2021; Sasmal et al., 2021).

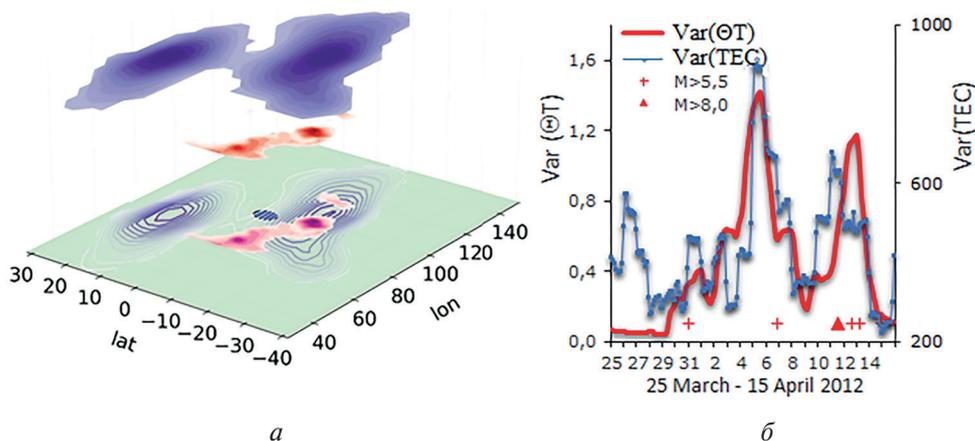


Рис. 7. Пространственное распределение аномалии ПЭС ионосферы ( $\delta\text{TEC}$ ) и температуры в UTLS ( $D_{\text{CORR}}$ ) 5 апреля 2012 г. (15:00 UTC) и их проекции на земную поверхность (высоты показаны схематично); эпицентр землетрясения  $M = 8,6$  показан синим маркером (а). Вариации дисперсии аномалии температуры  $\text{Var}(\Theta T)$  на уровне 100 гПа и дисперсии ПЭС ( $\text{Var}(\text{TEC})$ ) в период с 25 марта по 15 апреля 2012 г. (б)

В качестве вероятного механизма (канала) взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы можно в данном случае рассматривать гравитационные волны, которые распространялись наклонно вверх и возмущали нижнюю атмосферу, с некоторой задержкой вызывая аномальные изменения в ионосфере (Yang, Hayakawa, 2020). Наклонное распространение таких волн сместило зону взаимодействия с ионосферой на  $\sim 1000\text{--}1500$  км от эпицентра. Как следует из рис. 7б, максимум дисперсии температурной аномалии  $\text{Var}(\Theta T)$  на изобарическом уровне 100 гПа наблюдался 5 апреля 2012 г. с 03:00 до 06:00 UTC, т.е., на 3–6 ч опережал возмущение ПЭС ( $\text{Var}(\text{TEC})$ ).

## Выводы

Совместный анализ пространственно-временных изменений температуры в нижней атмосфере и ПЭС ионосферы показал наличие коррелированных аномальных вариаций этих параметров, свидетельствующих о вероятной связи с процессами подготовки землетрясений  $M = 8,6$  и  $M = 8,2$  на Суматре 11 апреля 2012 г. Максимумы в развитии аномалий исследуемых параметров наблюдались за 6 сут до землетрясения. Одним из возможных объяснений этой взаимосвязи может служить то, что рассматриваемое землетрясение оказалось мощным источником атмосферных гравитационных волн, которые, распространяясь через атмосферу на ионосферные высоты, привели к образованию соответствующих возмущений. Достоверность выделения вероятных сейсмически индуцированных аномалий определялась с учётом влияния солнечной и геомагнитной активности, которые также могли вызвать возмущения атмосферы/ионосферы.

Отличительной особенностью реакции нижней атмосферы и ионосферы стали значительные различия в пространственных масштабах и динамике временной эволюции предсейсмических возмущений.

В целом результаты показывают, что использование спутниковых наблюдений в различных слоях атмосферы и ионосферы обеспечивает дополнительную валидацию предсейсмических аномалий, вызванных процессами взаимодействия между геосферами.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра данных и информационных служб Годдарда по наукам о Земле (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center — GES DISC), НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration) и Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания Научной станции РАН в г. Бишкеке по теме «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах».

## Литература

1. *Свердлик Л. Г., Имашев С. А.* Динамика температуры тропопаузы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 23–27.
2. *Свердлик Л. Г., Имашев С. А.* О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
3. *Свердлик Л. Г., Имашев С. А.* Пространственно-временное распределение возмущений в атмосфере перед сильными землетрясениями в Тянь-Шане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 114–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122.
4. *Тертышников А. В., Большаков В. О.* Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // Информация и космос. 2010. № 1. С. 100–105.
5. *Тертышников А. В., Пулинец С. А.* Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации. Патент РФ 2502080. Рег. 20.12.2013.
6. *Тертышников А. В., Иванов И. И., Писанко Ю. В., Смирнов В. М., Палей А. А., Ковалев Д. С., Тертышников А. М., Дубова Ю. А., Зинкина М. Д.* Способ зондирования ионосферы и тропосферы. Патент РФ 2693842. Рег. 05.07.2019.
7. *Cahyadi M. N., Heki K.* Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network // J. Geophysical Research: Space Physics. 2013. V. 118. P. 1777–1787. DOI: 10.1002/jgra.50208.
8. *Chetia B., Devi M., Kalita S., Barbara A. K.* Magnetic storm time effect on upper and lower atmosphere: An analysis through GPS and remote sensing observation over Guwahati // Indian J. Radio and Space Physics. 2017. V. 46. P. 120–130.
9. *Hernández-Pajares M., Juan J., Sanz J., Orus R., Garcia-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S., Krankowski A.* The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. 2009. V. 83. Iss 3–4. P. 263–275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
10. *Hu Z., Fan L., Wang C., Wang Z., Shi C., Jing G.* More reliable global ionospheric maps combined from ionospheric products of the seven IGS analysis centers // Results in Physics. 2020. V. 17. Art. No. 103162. 2 p. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103162.
11. *Oikonomou C., Haralambous H., Pulinets S., Khadka A., Paudel S. R., Barta V., Muslim B., Kourtidis K., Karagiorgas A., Inyurt S.* Investigation of Pre-Earthquake Ionospheric and Atmospheric Disturbances for Three Large Earthquakes in Mexico // Geosciences. 2021. V. 11. Iss. 1. Art. No. 16. 28 p. DOI: 10.3390/geosciences11010016.
12. *Pulinets S. A., Legenka A. D.* Spatial-temporal characteristics of large scale distributions of electron density observed in the ionospheric F-region before strong earthquakes // Cosmic Research. 2003. V. 41. Iss. 3. P. 221–230. DOI: 10.1023/A:1024046814173.
13. *Sasmal S., Chowdhury S., Kundu S., Politis D. Z., Potirakis S. M., Balasis G., Hayakawa M., Chakrabarti S. K.* Pre-Seismic Irregularities during the 2020 Samos (Greece) Earthquake (M = 6.9) as Investigated from Multi-Parameter Approach by Ground and Space-Based Techniques // Atmosphere. 2021. V. 12. Iss. 8. Art. No. 1059. 34 p. DOI: 10.3390/atmos12081059.
14. *Sverdlik L., Imashev S.* Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // MAUSAM. 2020. V. 71. No. 3. P. 481–490. URL: [https://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/171310\\_F.pdf](https://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/171310_F.pdf).

15. Yang S.-S., Hayakawa M. Gravity Wave Activity in the Stratosphere before the 2011 Tohoku Earthquake as the Mechanism of Lithosphere-atmosphere-ionosphere Coupling // *Entropy*. 2020. V. 22. Iss. 1. Art. No. 110. 22 p. DOI: 10.3390/e22010110.
16. Yao Y. B., Chen P., Wu H., Zhang S., Peng W. F. Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 Mw 9.0 Japan earthquake // *Chinese Science Bull.* 2012. V. 57. P. 500–510.
17. Zhu F., Jiang Y. Investigation of GIM-TEC disturbances before  $M \geq 6.0$  inland earthquakes during 2003–2017 // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Art. No. 18038. 8 p. DOI: 10.1038/s41598-020-74995-w.
18. Zhu F., Zhou Y., Wu Y. Anomalous variation in GPS TEC prior to the 11 April 2012 Sumatra earthquake // *Astrophysics and Space Science*. 2013. V. 345. P. 231–237. DOI: 10.1007/s10509-013-1389-2.

## Atmospheric and ionospheric anomalies preceding a strong equatorial earthquake in Sumatra

S. A. Imashev<sup>1</sup>, L. G. Sverdlik<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Research Station RAS in Bishkek City, Bishkek 720049, Kyrgyzstan*

<sup>2</sup> *Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek 720000, Kyrgyzstan*  
*E-mail: l.sverdlik@mail.ru*

Satellite remote sensing plays a crucial role in study of dynamic processes occurring in different layers of the atmosphere/ionosphere and interaction between these layers and lithosphere. We present the results of a comparative analysis of anomalous temperature variations in the lower atmosphere and total electron content (TEC) in the ionosphere, based on MERRA-2 global reanalysis data and GNSS/GPS navigation system and related to the period of strong seismic activity. Identification of preseismic disturbances that were observed during the preparation of a strong low-latitude earthquake ( $M = 8.6$ ) and its aftershock ( $M = 8.2$ ) that occurred in Sumatra (Indonesia) on April 11, 2012, was carried out by application of previously developed and tested algorithms. The response of the upper troposphere/lower stratosphere (UTLS) and ionosphere to the upcoming strong earthquake under quiet geomagnetic conditions resulted in anomalous changes in temperature and TEC, respectively. These anomalies were located near the epicenter of the earthquake and reached a maximum on April 6, 2012 (6 days before the main event). In contrast to the mesoscale temperature disturbance in UTLS, the TEC anomaly had a much larger horizontal size, amounting to several thousand kilometers. With all the difference in the spatial scales and dynamics of the temporal evolution of disturbances in ionosphere and atmosphere, the areas of anomalous values of the studied parameters were located near the epicenter and were fairly close in shape during the time of maximum development. Increase in the activity of the process of generation of long-period atmospheric gravity waves was considered as a probable mechanism of interaction between lithosphere, atmosphere, and ionosphere.

**Keywords:** satellite measurements, temperature, earthquake, upper troposphere, lower stratosphere, ionosphere, integral parameter, anomaly, geomagnetic activity,  $D_{st}$ -index

Accepted: 10.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327

## References

1. Sverdlik L. G., Imashev S. A., Tropopause temperature dynamics during a seismic activity in Central Tien-Shan, *Science and new technologies*, 2015, No. 1, pp. 23–27 (in Russian).
2. Sverdlik L. G., Imashev S. A., On preseismic anomalies of atmosphere temperature, *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 19–26 (in Russian), DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
3. Sverdlik L. G., Imashev S. A., Spatial-temporal distribution of atmospheric perturbations before strong earthquakes in Tien-Shan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 114–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122.
4. Tertyshnikov A., Bolshakov V., Ionosphere monitoring technology using the signal receiver of navigation SV GPS/GLONASS (Galileo), *Information and Space*, 2010, No. 1, pp. 100–105 (in Russian).

5. Tertyshnikov A. V., Pulinets S. A., *Sposob zondirovaniya ionosfery, troposfery, geodvizhenii i kompleks dlya ego realizatsii* (Method of probing ionosphere, troposphere, geologic movements and set for implementing said method), Patent RU 2502080, Reg. 20.12.2013 (in Russian).
6. Tertyshnikov A. V., Ivanov I. I., Pisanko Yu. V., Smirnov V. M., Palei A. A., Kovalev D. S., Tertyshnikov A. M., Dubova Yu. A., Zinkina M. D., *Sposob zondirovaniya ionosfery i troposfery* (Method for probing the ionosphere and troposphere), Patent RU 2693842, Reg. 05.07.2019 (in Russian).
7. Cahyadi M. N., Heki K., Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 1777–1787, DOI: 10.1002/jgra.50208.
8. Chetia B., Devi M., Kalita S., Barbara A. K., Magnetic storm time effect on upper and lower atmosphere: An analysis through GPS and remote sensing observation over Guwahati, *Indian J. Radio and Space Physics*, 2017, Vol. 46, pp. 120–130.
9. Hernández-Pajares M., Juan J., Sanz J., Orus R., Garcia-Rigo A., Felten J., Komjathy A., Schaer S., Krankowski A., The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, No. 3–4, pp. 263–275, DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
10. Hu Z., Fan L., Wang C., Wang Z., Shi C., Jing G., More reliable global ionospheric maps combined from ionospheric products of the seven IGS analysis centers, *Results in Physics*, 2020, Vol. 17, Art. No. 103162, 2 p., DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103162.
11. Oikonomou C., Haralambous H., Pulinets S., Khadka A., Paudel S. R., Barta V., Muslim B., Kourtidis K., Karagiorgas A., Inyurt S., Investigation of Pre-Earthquake Ionospheric and Atmospheric Disturbances for Three Large Earthquakes in Mexico, *Geosciences*, 2021, Vol. 11, Issue 1, Art. No. 16, 28 p., DOI: 10.3390/geosciences11010016.
12. Pulinets S. A., Legenka A. D., Spatial-temporal characteristics of large scale distributions of electron density observed in the ionospheric F-region before strong earthquakes, *Cosmic Research*, 2003, Vol. 41, No. 3, pp. 221–230, DOI: 10.1023/A:1024046814173.
13. Sasmal S., Chowdhury S., Kundu S., Politis D. Z., Potirakis S. M., Balasis G., Hayakawa M., Chakrabarti S. K., Pre-Seismic Irregularities during the 2020 Samos (Greece) Earthquake (M = 6.9) as Investigated from Multi-Parameter Approach by Ground and Space-Based Techniques, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, Issue 8, Art. No. 1059, 34 p., DOI: 10.3390/atmos12081059.
14. Sverdlik L., Imashev S., Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan, *MAUSAM*, 2020, Vol. 71, No. 3, pp. 481–490, URL: [https://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/171310\\_F.pdf](https://metnet.imd.gov.in/mausamdocs/171310_F.pdf).
15. Yang S.-S., Hayakawa M., Gravity Wave Activity in the Stratosphere before the 2011 Tohoku Earthquake as the Mechanism of Lithosphere-atmosphere-ionosphere Coupling, *Entropy*, 2020, Vol. 22, No. 1, Art. No. 110, 22 p., DOI: 10.3390/e22010110.
16. Yao Y. B., Chen P., Wu H., Zhang S., Peng W. F., Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 Mw 9.0 Japan earthquake, *Chinese Science Bull.*, 2012, Vol. 57, pp. 500–510, DOI: 10.1007/s11434-011-4851-y.
17. Zhu F., Jiang Y., Investigation of GIM-TEC disturbances before  $M \geq 6.0$  inland earthquakes during 2003–2017, *Scientific Reports*, 2020, Vol. 10, Art. No. 18038, 8 p., DOI: 10.1038/s41598-020-74995-w.
18. Zhu F., Zhou Y., Wu Y., Anomalous variation in GPS TEC prior to the 11 April 2012 Sumatra earthquake, *Astrophysics and Space Science*, 2013, Vol. 345, pp. 231–237, DOI: 10.1007/s10509-013-1389-2.