



Казахский Национальный Исследовательский Технический
Университет,
Институт Геологии и Нефтегазового Дела
Кафедра “Геофизики”

Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

Лекция 7

**Атмосферные и ионосферные аномалии,
предшествующие сильному землетрясению**

По материалам: С. А. Имашева, Л. Г. Свердлика (2022)

**Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК**

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.

Данные и методика

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 (Sahyadī, Neki, 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)

№	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), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с данными официальных центров IGS как по качеству восстановления данных, так по разрешению во времени (Hu et al., 2020)

Данные и методика

Используемые 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° по долготе) и дискретизацию $\Delta t = 1$ ч.

Для выделения пространственно-временных возмущений ПЭС, предшествующих сейсмическому событию, были построены карты распределения аномалий (δTEC), 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 тропопаузой 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 (pk) от 500 до 40 гПа (от ~5 до 25 км) в узлах равно- мерной 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 $DCORR$) сопоставлялись с сейсмичностью. Значения параметра $DCORR > 1,0$ 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 Dst по данным Центра земного и космического магнетизма Университета Киото, Япония (*англ.* World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan).

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).

Результаты. Аномалии пространственно-временного распределения ПЭС в ионосфере

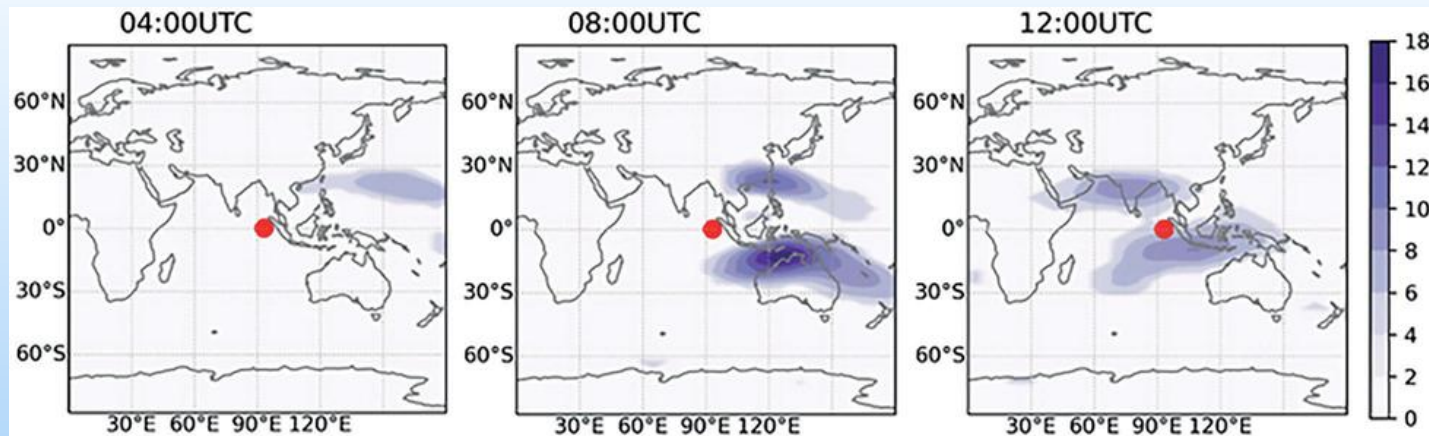


Рис. 1 - Развитие во времени пространственного распределения аномалий ПЭС 05.04.2021 (за 6 дней до события $M = 8,6$, эпицентр которого отмечен красным маркером)

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; Pulinets, Legenka, 2003), где отмечается, что характерная продолжительность предсейсмических возмущений в ионосфере составляет $\sim 4-6$ 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). 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.

Результаты. Аномалии пространственно-временного распределения ПЭС в ионосфере

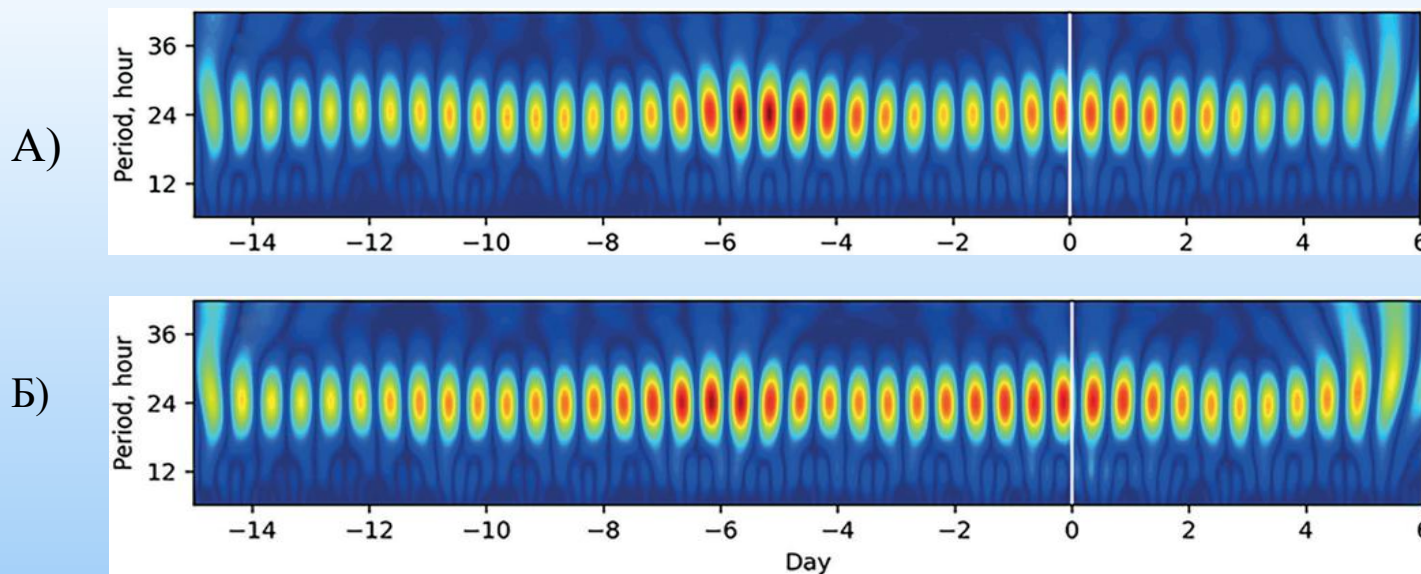


Рис. 2 - Вейвлетогаммы временных рядов ПЭС над центрами аномалий: *а* — северная аномалия, *б* — южная. По горизонтальной оси — дни относительно землетрясения (обозначено вертикальной линией); по вертикальной оси — временной масштаб в часах

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 Dst . На графике $\text{Var}(\text{TEC})$ можно наблюдать три аномальных пика (A1, A2, A3).

При сопоставлении аномалий ПЭС с вариациями Dst 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 Dst не опускалась ниже -50 нТл (слабая магнитная буря).

Результаты. Аномалии пространственно-временного распределения ПЭС в ионосфере

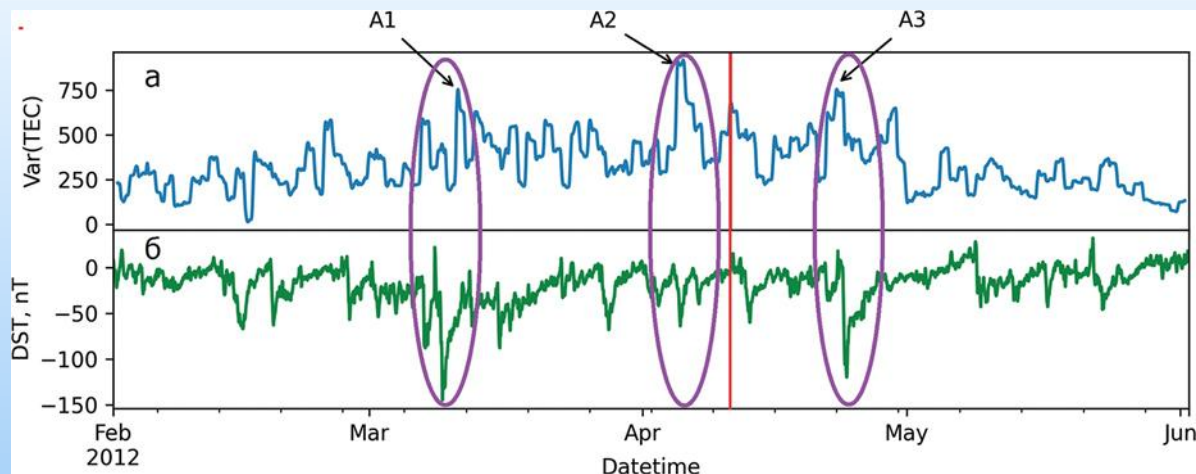


Рис. 3. Вариации дисперсии ПЭС ($\text{Var}(\text{TEC})$) над южной аномалией в скользящем окне 24 ч (а) и индекса Dst (б). Овалами отмечены области аномальных значений ПЭС (A1, A2 и A3); вертикальная линия — момент сейсмического события $M = 8,6$ (11 апреля 2012 г.)

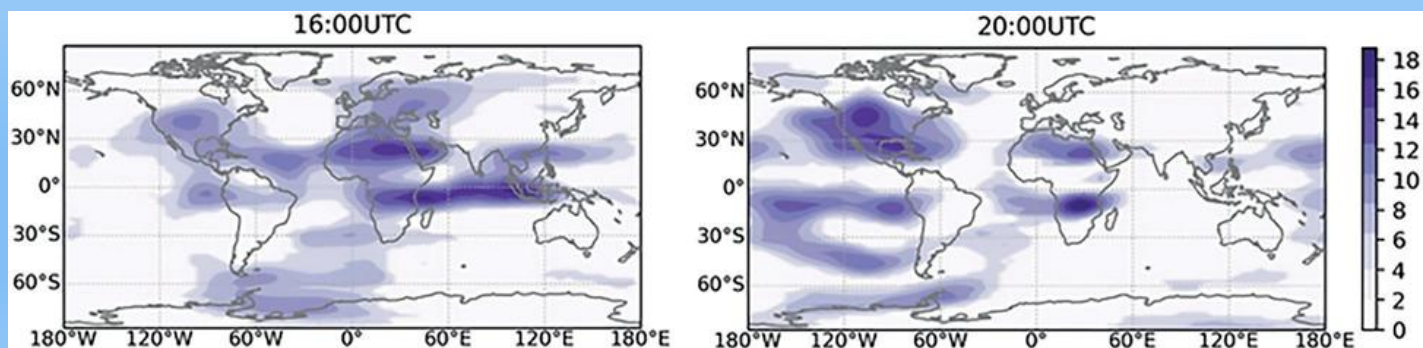


Рис. 4. Пространственное распределение аномалий ПЭС (δTEC) во время магнитных бурь: а — 11.03.2012; б — 23.04.2012

Возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере

Аномалии ПЭС (δTEC), 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.

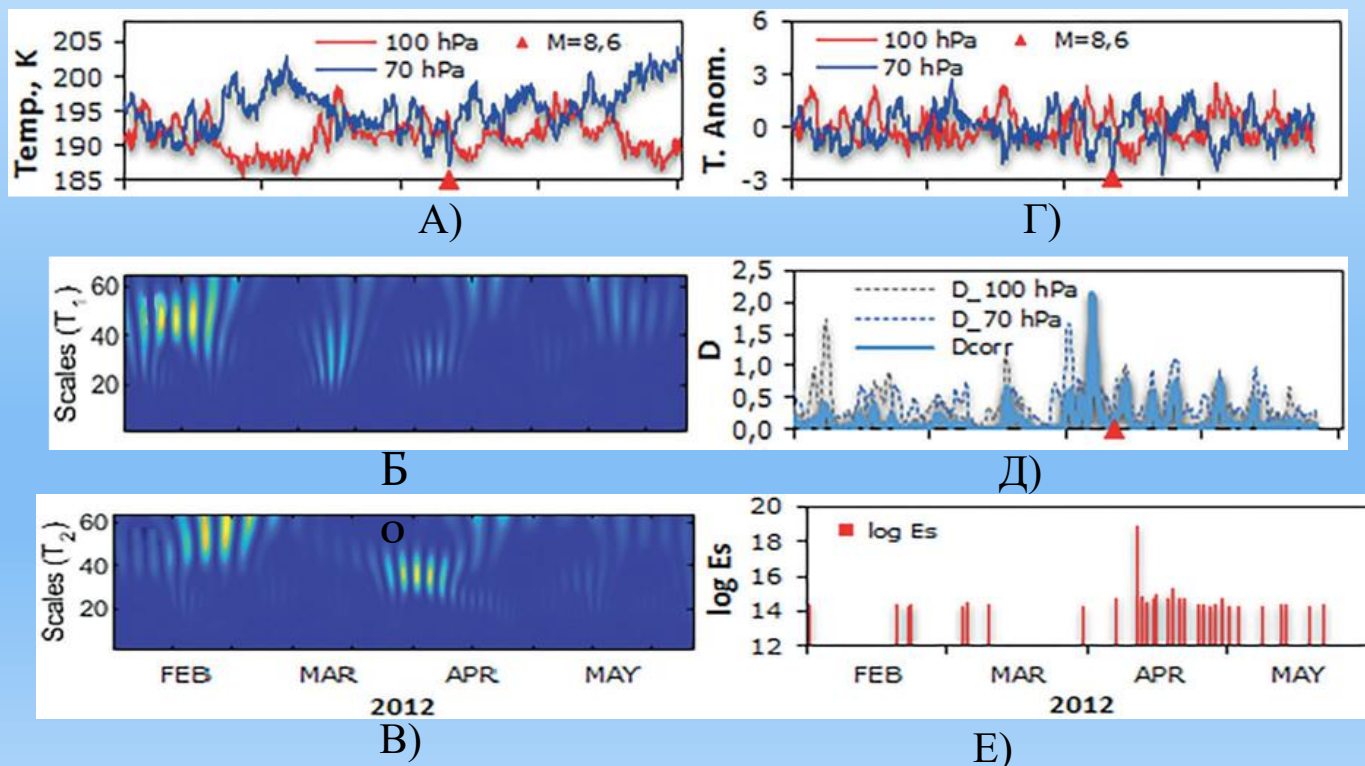


Рис. 5. Временные ряды температуры T_1 и T_2 на уровнях 100 и 70 гПа (а); спектры коэффициентов вейвлет-преобразования (б, в); аномалии температуры ΘT (г); параметр DCORR (д); логарифм сейсмической энергии $\log E_s$ (е) в период с февраля по май 2012 г.

Возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере

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 $DCORR$ показали, что рассматриваемый период характеризовался единственным чётко выраженным максимумом ($DCORR > 2,0$), который наблюдался на протяжении 9 ч и указывал на аномальные предсейсмические изменения температуры (рис. 5д).

Высокие значения $DCORR$ в условиях спокойной геомагнитной обстановки ($Dst \leq 20$ нТл) могут рассматриваться как реакция верхней тропосферы/нижней стратосферы на активизацию процессов, связанных с подготовкой землетрясений (рис. 5е).

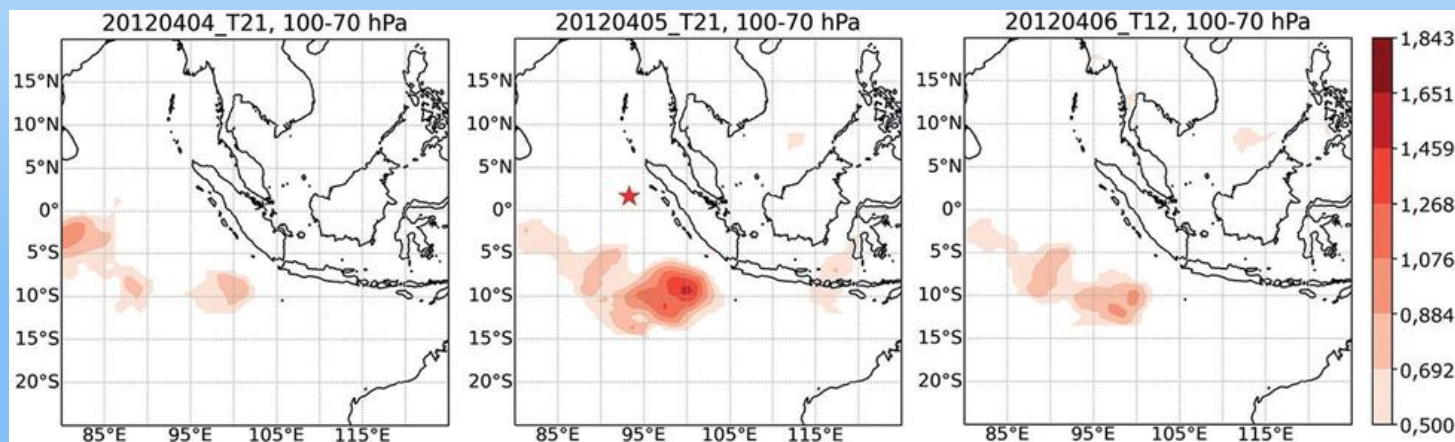


Рис. 6. Эволюция пространственного распределения температурной аномалии с 04.04.2012 (21:00 UTC) по 06.04.2012 (12:00 UTC). Эпицентр сейсмического события $M = 8,6$ ($93,063^\circ$ в. д., $2,327^\circ$ с. ш.) отмечен красным маркером

Сравнение предсейсмических возмущений в атмосфере (UTLS) и ионосфере

Набор карт пространственного распределения параметра *DCORR* 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 *DCORR* 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 ~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 *DCORR* и аномалий δT_{EC} 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 δT_{EC} 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 исследуемых 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).

Сравнение предсейсмических возмущений в атмосфере (UTLS) и ионосфере

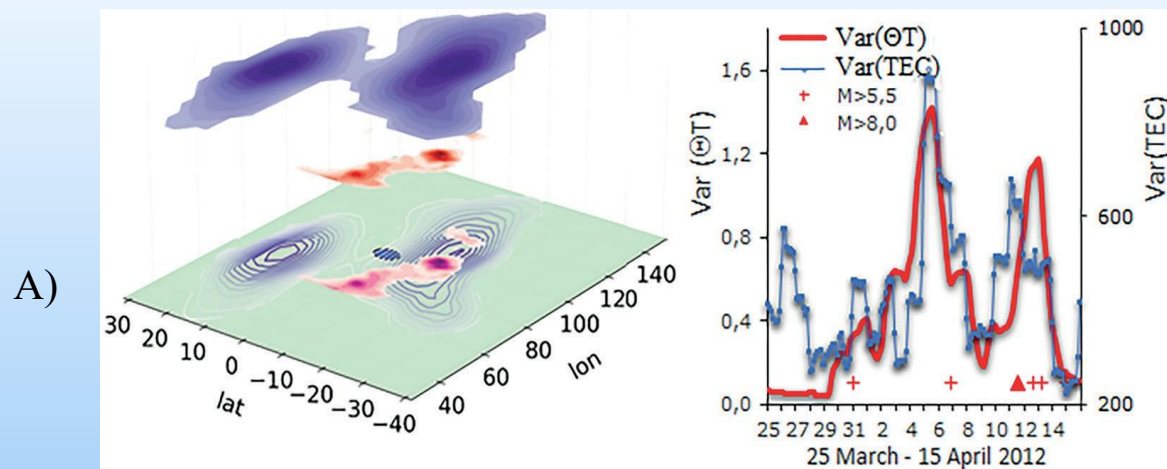


Рис. 7. Пространственное распределение аномалии ПЭС ионосферы (δTEC) и температуры в UTLS (DCORR) 5 апреля 2012 г. (15:00 UTC) и их проекции на земную поверхность (высоты показаны схематично); эпицентр землетрясения $M = 8,6$ показан синим маркером (а). Вариации дисперсии аномалии температуры $\text{Var}(\Theta T)$ 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.

Вопросы по закреплению содержания лекции 7

- ❑ Предсейсмические аномальные вариации полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере. Глобальные карты ПЭС
- ❑ Пространственно-временные возмущения ПЭС. Связь с пространственно-временных распределений предсейсмических аномалий температуры.
- ❑ Локализация во времени предсейсмических аномалий в вариациях ПЭС из наборов глобальных карт.
- ❑ Вейвлетограммы временных рядов ПЭС над центрами аномалий. Характеристики и формы проявления.
- ❑ Интерпретация аномалий DST. Сопоставлении аномалий ПЭС с вариациями Dst. Сейсмоионосферные возмущения.
- ❑ Возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Интегральный параметр DCORR как реакция верхней тропосферы/нижней стратосферы на активизацию процессов, связанных с подготовкой землетрясений.
- ❑ Сравнение предсейсмических возмущений в атмосфере (UTLS) и ионосфере. Взаимное расположение и размеры аномальных областей аномалий δT_{EC} , относящиеся к моменту времени, когда значения исследуемых параметров были наибольшими.
- ❑ Механизм (канала) взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы - распространение гравитационных волн, возмущающих нижнюю атмосферу, с некоторой задержкой вызывая аномальные изменения в ионосфере.

Библиография

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Oikonomou C., Haralambous H., Pulinets S., Khadka A., Paudel S. R., Barta V., Muslim B., Kourtidis K., Karagioras 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.
7. 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.
8. 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.

Благодарю за внимание!

Thank you for your attention!

Назарларыңызға рахмет!