



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 ТЕС 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) представляются 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 беспросых 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 (Cahyadi, 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)

№	Год	Месяц	День	Время	Широта	Долгота	М	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  $5^\circ$  по долготе) и дискретизацию  $\Delta t = 1$  ч.

Для выделения пространственно-временных возмущений ПЭС, предшествующих сейсмическому событию, были построены карты распределения аномалий ( $\delta\text{TEC}$ ), 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 тропосфера/нижней стратосфера (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  $\sim 5$  до 25 км) в узлах равно- мерной сетки  $0,5 \times 0,625^\circ$ .

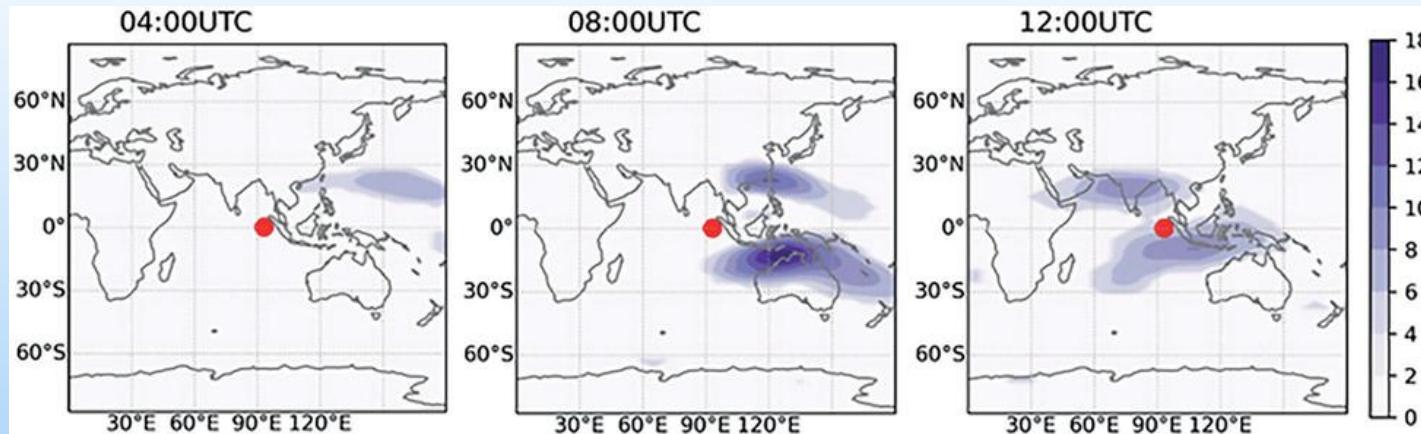
Дискретизация температурных данных  $T(t)$  по времени составляла  $\Delta t = 3$  ч. Для идентификации возмущений и анализа пространственно-временных распределений предсейсмических аномалий температуры в UTLS использовался разработанный ранее алгоритм (Свердлик, Имашев, 2020; Sverdlik, Imashev, 2020), 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  $\sim 6$  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



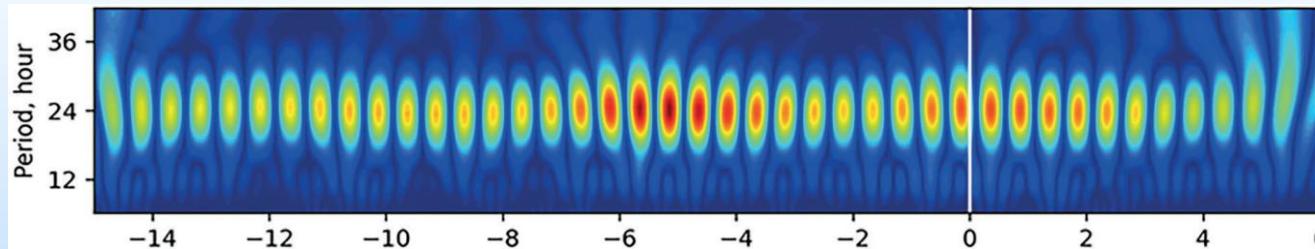
**Рис. 1** - Развитие во времени пространственного распределения аномалий ПЭС 05.04.2021 (за 6 дней до события  $M = 8,6$ , эпицентр которого отмечен красным маркером)

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; Pulinet, Legenka, 2003), где отмечается, что характерная продолжительность предсейсмических возмущений в ионосфере составляет  $\sim 4\text{--}6$  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

А)



Б)

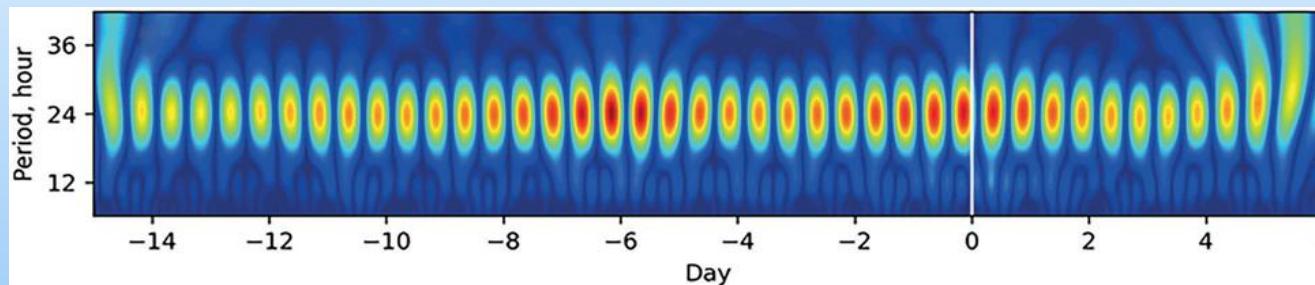


Рис. 2 - Вейвлетограммы временных рядов ПЭС над центрами аномалий: *а* — северная аномалия, *б* — южная. По горизонтальной оси — дни относительно землетрясения (обозначено вертикальной линией); по вертикальной оси — временной масштаб в часах

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), предваряющий сейсмическое событие, 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

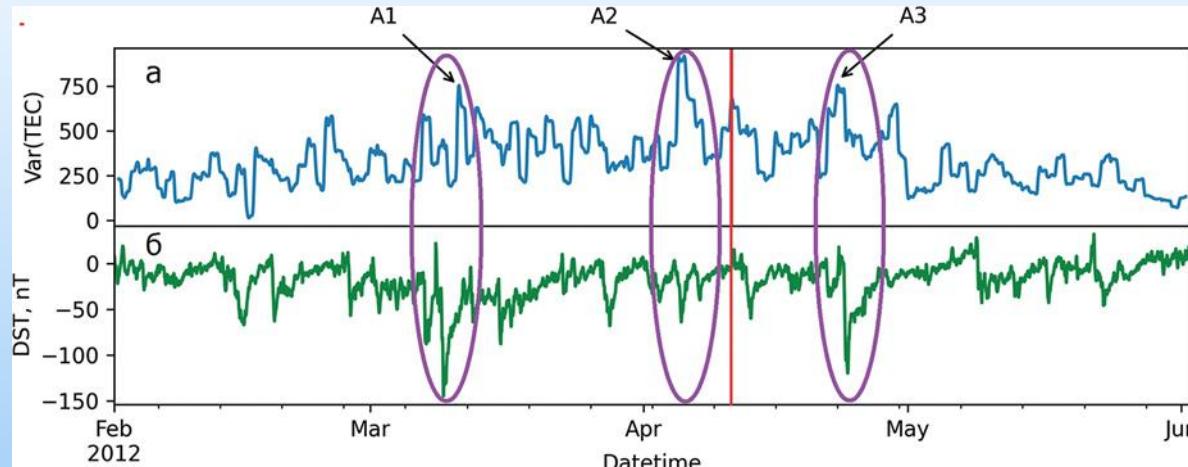


Рис. 3. Вариации дисперсии ПЭС (Var(TEC)) над южной аномалией в скользящем окне 24 ч (а) и индекса  $Dst$  (б). Овалами отмечены области аномальных значений ПЭС (A1, A2 и A3); вертикальная линия — момент сейсмического события  $M = 8,6$  (11 апреля 2012 г.)

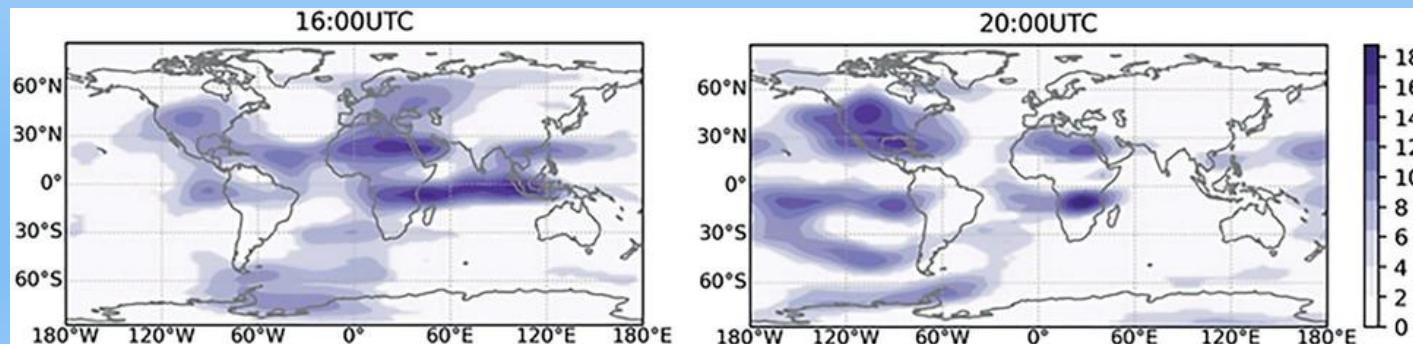


Рис. 4. Пространственное распределение аномалий ПЭС ( $\delta$ ТЕС) во время магнитных бурь: а — 11.03.2012; б — 23.04.2012

# Возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере

Аномалии ПЭС ( $\delta$ 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.

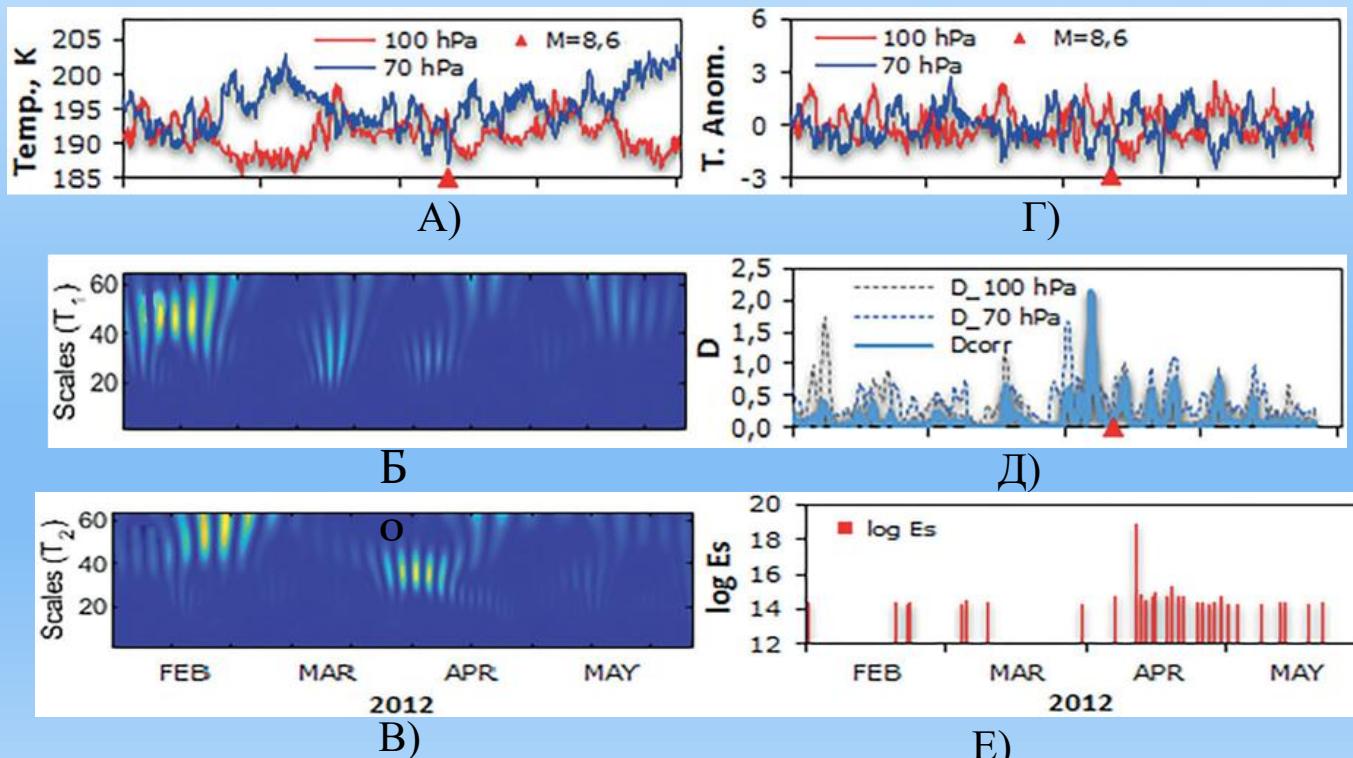


Рис. 5. Временные ряды температуры  $T_1$  и  $T_2$  на уровнях 100 и 70 гПа (а); спектры коэффициентов вейвлет-преобразования (б, в); аномалии температуры  $\Theta T$  (г); параметр DCORR (д); логарифм сейсмической энергии  $\log Es$  (е) в период с февраля по май 2012 г.

# 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 предваряли 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).

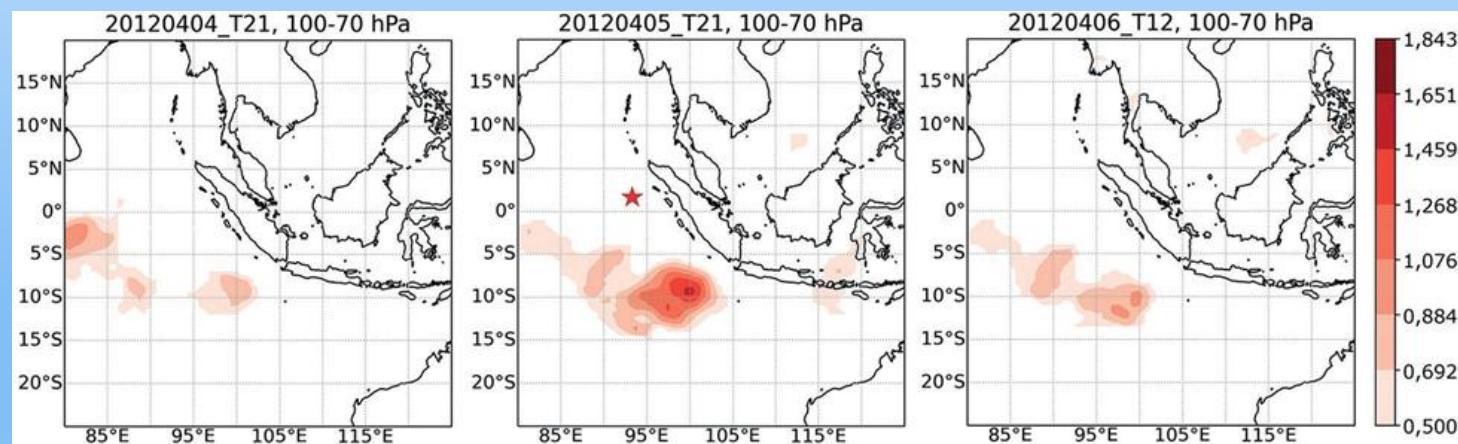


Рис. 6. Эволюция пространственного распределения температурной аномалии с 04.04.2012 (21:00 UTC) по 06.04.2012 (12:00 UTC). Эпицентр сейсмического события  $M = 8,6$  (93,063° в. д., 2,327° с. ш.) отмечен красным маркером

# 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  $\sim 2$  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  $DCORR$  и аномалий  $\delta TEC$  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  $\delta TEC$  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

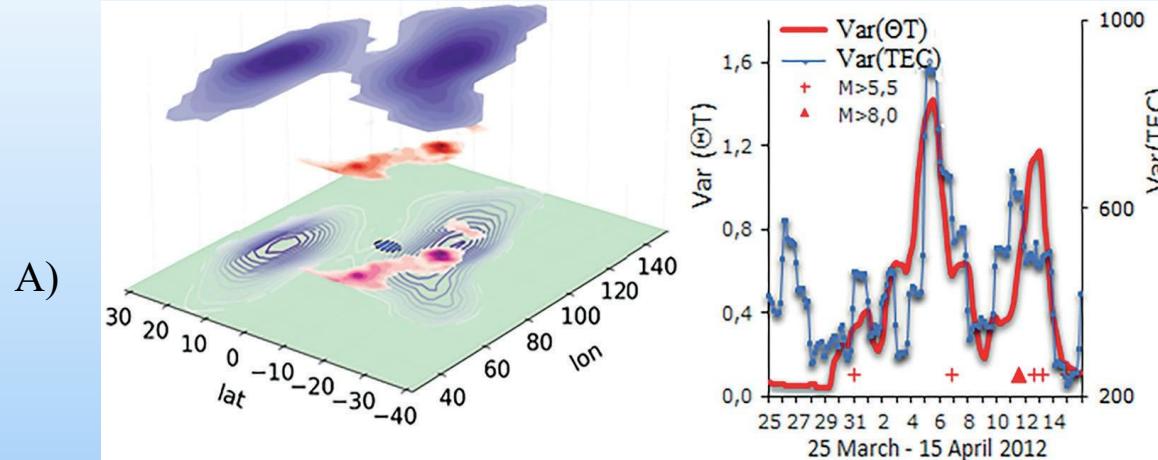


Рис. 7. Пространственное распределение аномалии ПЭС ионосферы ( $\delta\text{TEC}$ ) и температуры в UTLS (DCORR) 5 апреля 2012 г. (15:00 UTC) и их проекции на земную поверхность (высоты показаны схематично); эпицентр землетрясения  $M = 8,6$  показан синим маркером (а). Вариации дисперсии аномалии температуры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