

Динамика тепловых аномалий в сейсмически активном регионе Центральной Азии

Л. Г. Свердлик

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, 720049, Кыргызстан
E-mail: l.sverdlik@mail.ru

Кыргызско-российский славянский университет, Бишкек, 720000, Кыргызстан

Представлены результаты ретроспективного исследования аномалий в изменениях термической стратификации атмосферы в области тропопаузы над эпицентрными областями шести землетрясений с магнитудой $M > 6,0$, которые были зарегистрированы в 2015–2016 гг. на территории, протянувшейся от Памиро-Гиндукушской сейсмической зоны Афганистана на юго-западе до Восточного Памира (Таджикистан) на северо-востоке. На примере этих событий выполнена оценка пространственного масштаба, локализации, продолжительности и времени проявления аномальных возмущений температуры. Выделение сейсмо-атмосферных эффектов проводилось с использованием специально разработанного алгоритма обработки данных спутникового мониторинга (глобальный реанализ MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2)), основанного на вычислении критерия STA/LTA (*англ.* Short Time Averaging to Long Time Averaging). Результаты анализа профилей температуры на уровнях от 500 до 40 гПа показали, что перед каждым из исследованных землетрясений атмосфера находилась в возмущённом состоянии. Предсейсмические аномалии характеризовались повышенными значениями параметра δT_c ($\geq 1,5$) и проявлялись в виде хорошо выраженных мезомасштабных (300–900 км) областей. При этом пространственный масштаб тепловых аномалий перед сильными землетрясениями с глубоким гипоцентром (более 200 км) был значительно более широким. Максимумы в возмущениях температуры наблюдались за 1–5 сут до сильных землетрясений и были локализованы над эпицентрными областями либо в пределах нескольких сотен километров от эпицентров, что полностью соответствует критериям DTS-T (*англ.* Deviation-Time-Space-Thermal) и можно, вероятно, рассматривать как свидетельство взаимодействия литосферы и атмосферы в периоды подготовки сильных землетрясений. В качестве наиболее вероятного механизма формирования предсейсмических возмущений в слоях нижней атмосферы рассматривались атмосферные гравитационные волны, генерируемые медленными колебаниями земной поверхности.

Ключевые слова: спутниковые измерения, температура, землетрясение, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, критерий STA/LTA, интегральный параметр, аномалия

Одобрена к печати: 10.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-149-163

Введение

Наблюдения с использованием спутникового дистанционного зондирования имеют большое значение для мониторинга состояния атмосферы. Особую роль они играют в обнаружении изменений параметров атмосферы во время стихийных бедствий (Draz et al., 2023). В частности, имеется много свидетельств того, что атмосферные возмущения связаны с сейсмической активностью (Schekotov et al., 2006). В качестве примеров можно привести эффекты аномального изменения температуры в нижней тропосфере (например, (Lu et al., 2024; Xu et al., 2022)), яркостной температуры (Liu S. et al., 2023), поверхностного скрытого теплового потока SLHF (*англ.* Surface Latent Heat Flux) (Ghosh et al., 2022; Zhang et al., 2013), уходящего длинноволнового излучения OLR (*англ.* Outgoing Longwave Radiation) (Liu J. et al., 2023; Xiong, Shen, 2017), теплового инфракрасного (ИК) излучения TIR (*англ.* Thermal Infrared Radiation) (Genzano et al., 2021; Qin et al., 2013) и т. д., которые обычно объединяют понятием тепловые аномалии в нижней атмосфере (Chen et al., 2022).

Однако следует отметить, что, несмотря на такое разнообразие подходов к выделению сейсмо-термических атмосферных аномалий, на практике результаты исследований указывают, что существует проблема повторяемости и подтверждения заявленных разными авторами результатов (Picozza et al., 2021). Это, возможно, связано с тем, что термические аномалии возникают в течение коротких временных периодов и в ограниченных зонах вблизи эпицентров (Jiao, Shan, 2021). Поэтому во многих публикациях, наряду с результатами диагностирования возмущений в атмосфере, являющихся следствием взаимодействия литосферы и атмосферы, подчёркивается необходимость дальнейших усилий по повышению эффективности алгоритмов обнаружения аномалий, использования новых методов обработки экспериментальных данных и расширения статистики событий в различных сейсмоактивных регионах (например, (Jiao et al., 2018)).

Наш подход к исследованию возмущений, предшествующих сильным землетрясениям, основан на применении данных наблюдений за эволюцией вертикальной структуры температуры верхней тропосферы и нижней стратосферы UTLS (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere) и анализе особенностей пространственно-временной изменчивости с учётом связи между вариациями температуры на различных изобарических уровнях. Задача выделения предсейсмических возмущений в UTLS решалась с использованием специального алгоритма (Свєрдлик, 2021), который ранее уже применялся к событиям в нескольких регионах Азии и Европы (например, (Имашев, Свєрдлик, 2022; Свєрдлик, 2022, 2025)). Цель настоящего исследования состояла в дополнительном тестировании алгоритма на примере шести землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, произошедших в 2015–2016 гг. в сейсмоактивном регионе Центральной Азии.

Исследуемый регион и используемые данные

Исследование атмосферных эффектов крупных землетрясений проводилось в одном из самых активных с сейсмической точки зрения внутриконтинентальных регионов мира, расположенном в Центральной Азии и ограниченном координатами $34\text{--}42^\circ$ с. ш. и $68\text{--}76^\circ$ в. д. (*рис. 1*).

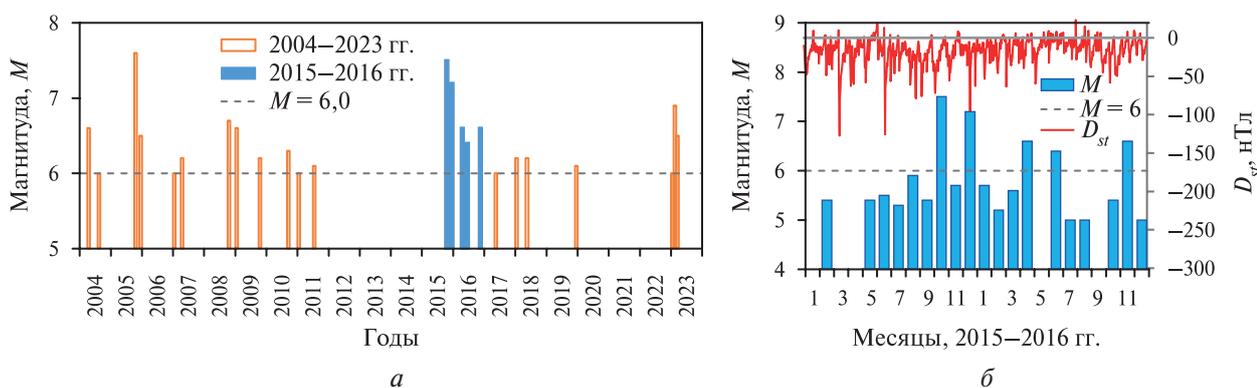


Рис. 1. Распределение по времени магнитуды землетрясений ($M \geq 6,0$), зарегистрированных в пределах территории с координатами $34\text{--}42^\circ$ с. ш., $68\text{--}76^\circ$ в. д. в 2004–2023 гг. (*а*). Последовательность магнитуды землетрясений ($M \geq 4,5$) и вариации среднесуточных значений D_{st} в 2015–2016 гг. (*б*)

Регион, являющийся частью зоны столкновения Евразийской и Индостанской тектонических плит, которые сходятся с относительной скоростью $40\text{--}50$ мм в год (Bloch et al., 2023), характеризуется высокой интенсивностью сейсмических событий (Шерман, 2016). Согласно данным онлайн-версии мирового каталога Геологической службы США USGS (*англ.* United States Geological Survey) (<http://earthquake.usgs.gov>), за последние два десятилетия здесь произошло 27 землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$ (см. *рис. 1а*). Как видно, наблюдалась суще-

ственно неравномерная динамика сильной сейсмичности и периоды активности чередовались с периодами затишья. Чтобы результаты проводимого исследования были более убедительными и корректными, в качестве примеров для демонстрации особенностей воздействия землетрясений на атмосферу выбран непрерывный период всплеска сейсмической активности с октября 2015 г. по декабрь 2016 г., в течение которого произошло 200 землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ и 6 крупных событий с $M > 6,0$ (см. *рис. 1б*), которые и были проанализированы в настоящей работе.

Характеристики этих землетрясений по данным USGS приведены в *таблице*, а расположение их эпицентров ($M > 7,0$; $6,0 < M < 7,0$ и $4,5 < M < 6,0$) показано на *рис. 2а*.

Характеристики землетрясений (EQ) $M > 6,0$ (<https://earthquake.usgs.gov>)

	Дата	Время, UTC	Координаты, град		D , км	M	Расположение эпицентров
			с. ш.	в. д.			
EQ1	26.10.2015	09:09:42	36,52	70,37	231,0	7,5	Гиндукуш, Афганистан
EQ2	07.12.2015	07:50:05	38,21	72,78	22,0	7,2	104 км от Мургаба, Таджикистан
EQ3	25.12.2015	19:14:47	36,49	71,13	206,0	6,3	42 км от Ишкашима, Афганистан
EQ4	10.04.2016	10:28:58	36,47	71,13	212,0	6,6	42 км от Ишкашима, Афганистан
EQ5	26.06.2016	11:17:11	39,48	73,34	13,0	6,4	92 км от Кызыл-Эшме, Кыргызстан
EQ6	25.11.2016	14:24:30	39,27	73,98	17,0	6,6	122 км от Мургаба, Таджикистан

Примечание: UTC (англ. Coordinated Universal Time)

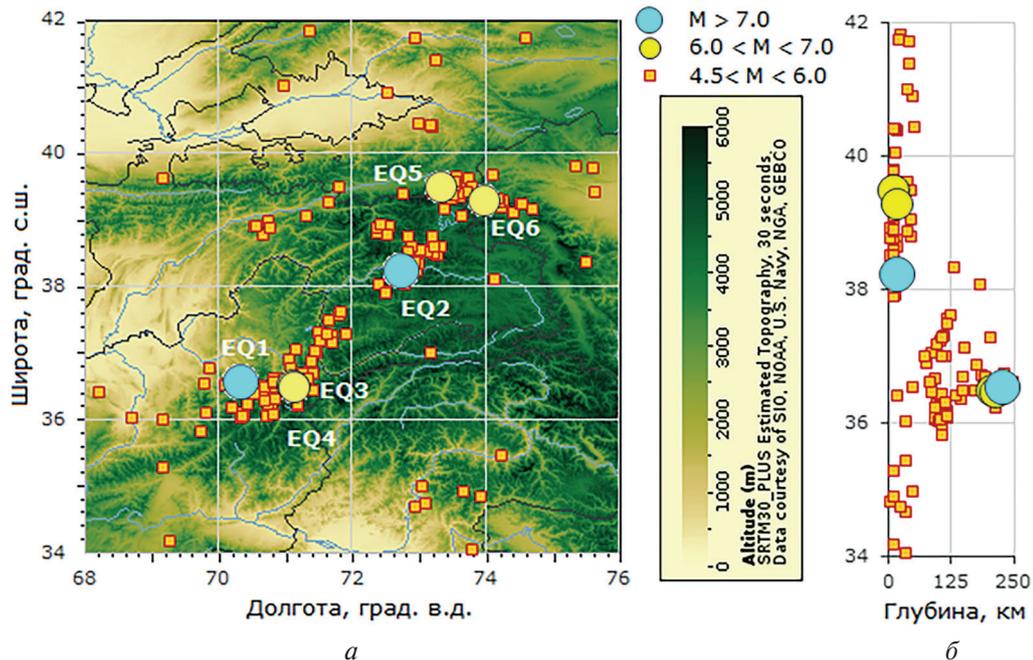


Рис. 2. Расположение эпицентров землетрясений с магнитудой $M > 4,5$ (*а*), зарегистрированных с октября 2015 г. по декабрь 2016 г., и проекции гипоцентров на вертикальную плоскость (*б*), разрез ориентирован в направлении север – юг

Эпицентры событий были сконцентрированы, главным образом, в относительно узкой полосе (шириной ~ 120 км), протянувшейся от Памиро-Гиндукушской сейсмической зоны Афганистана на юго-западе до Восточного Памира (Мургабский район Таджикистана) на северо-востоке (Sirpl et al., 2013). Распределение гипоцентров по глубине (D), построенное в виде проекции на вертикальную плоскость, ориентированную в направлении север – юг

(см. рис. 2б), свидетельствует, что очаги землетрясений под Гиндукушем достигали глубины 250 км, в то время как вдоль Главного Памирского надвига и в восточной части зоны сочленения Тянь-Шаня и Памира их глубина не превышала 30 км. Такой широкий диапазон глубины залегания гипоцентров позволил сопоставить значения этого параметра с интенсивностью и пространственной протяжённостью тепловых аномалий в UTLS.

В процессе исследования воздействия сейсмических событий на состояние атмосферы анализировались метеорологические и геомагнитные данные. Основой для изучения временных и высотных вариаций температуры в UTLS послужил глобальный реанализ MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2), в массив данных которого интегрировано большое число параметров. Данные реанализа основаны на наземных, аэростатных и спутниковых наблюдениях, прошедших обработку в глобальной модели, и представляют собой массивы синтезированных значений метеопараметров на 12 стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 гПа в узлах равномерной сетки $0,5 \times 0,625^\circ$ с временным разрешением Δt , составляющим 3 ч. Продолжительность временных серий достигала не менее ± 90 сут относительно каждого землетрясения. Исследуемая область была ограничена координатами: $15-55^\circ$ с. ш. и $20-120^\circ$ в. д.

Данные о глобальной температуре в реанализе MERRA-2 основаны на прямом усвоении многочисленных спутниковых наблюдений (McCarty et al., 2016). Поскольку значительная часть неопределённостей и пробелов в данных спутниковых измерений проистекает из входных данных и вызвана наличием облачности и аэрозолей, в реанализе MERRA-2 для описания перекрытия облаков между различными вертикальными слоями используется метод maximum-random и данные наблюдений геостационарных метеорологических спутников серии Meteosat Европейской организации спутниковой метеорологии EUMETSAT (*англ.* European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) (Feng, Wang, 2018). Алгоритм совместной обработки ассимилированных в реанализ данных ИК-зонда AIRS (*англ.* Atmospheric InfraRed Sounder) (2378 каналов в спектральном диапазоне IR (*англ.* InfraRed) (3,74–15,4 мкм) и 4 канала VIS/NIR (*англ.* Visible/Near InfraRed) (0,4–1,1 мкм)) и микроволнового радиометра AMSU-A (*англ.* Advanced Microwave Sounding Unit-A) (15 каналов в частотном диапазоне 23,8–89 ГГц), установленных на спутнике Aqua, позволял до сентября 2016 г. восстанавливать вертикальные профили температуры атмосферы даже когда 80 % области наблюдения покрыта облаками (Aumann et al., 2003).

Оценка погрешности реанализа MERRA-2 в определении вертикального распределения температуры атмосферы, проведённая сравнением с высокоточными данными Глобальной навигационной спутниковой системы GNSS RO (*англ.* Global Navigation Satellite System Radio Occultation), не подверженными влиянию облаков, показала очень хорошее согласие колебаний температуры, которые совпадали по фазе и были сопоставимы по амплитуде. Средние отклонения между температурными данными реанализа и GNSS RO в UTLS (8–30 км) составляли менее 0,1 К (Shangguan et al., 2019). По данным, приведённым в работе (Luo et al., 2020), разность между измерениями температуры атмосферы радиозондом и данными реанализа MERRA-2 в большинстве случаев не превышала 2 К.

Загрузка данных реанализа в виде файлов M2I3NPASM версии V5.12.4 в формате netCDF производилась в разработанной NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) системе GES-DISC (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM_5.12.4/summary) и с помощью интерактивного сервиса GIOVANNI (*англ.* GES-DISC Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure) (<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni>).

Дополнительно были загружены данные измерений температуры атмосферы ИК-зондом AIRS (Aqua), который обеспечивает высокоточные детальные измерения с глобальным покрытием Земли как в дневных, так и в ночных условиях (AIRX3STD v7.0 Temperature_A и AIRX3STD v7.0 Temperature_D), а также карты пространственного распределения облачности (AIRS AIRX3STD v7.0 Cloud Fraction) на исследуемой территории в рассматриваемые периоды сейсмической активности. Загруженные данные реанализа MERRA-2 сопоставлены с соответствующими результатами спутниковых измерений гиперспектрометром AIRS.

Коэффициенты корреляции между двумя наборами температурных данных на изобарических уровнях 300 и 100 гПа имели величину 0,94, абсолютная погрешность составляла ~ 1 К.

Опыт предыдущих исследований показал, что на поведение температуры влияет солнечная и геомагнитная активность, которая может существенно затруднить обнаружение сейсмогенных аномалий (Rasheed et al., 2024). Чтобы исключить влияние этого фактора предварительно анализировалась геомагнитная обстановка с использованием данных о вариациях индекса D_{st} , представленных на сайте Центра земного и космического магнетизма Университета Киото, Япония (англ. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan) (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>). Значения индекса D_{st} в исследуемые периоды сейсмической активности изменялись в пределах от -30 до 20 нТл (см. рис. 1б), что свидетельствует о спокойных геомагнитных условиях и отсутствии возмущений, способных вызвать изменения температуры в слоях нижней атмосферы (Chetia et al., 2017). Может быть отмечена только одна умеренная геомагнитная буря, зарегистрированная 20 и 21 декабря 2015 г. примерно за пять дней до землетрясения $M = 6,3$ в Афганистане, которая характеризовалась значениями индекса D_{st} , равными -60 и -110 нТл соответственно.

Методика обработки спутниковых данных

В настоящем исследовании для анализа вариаций температуры в периоды сейсмической активности использовался диапазон высот 500–40 гПа (приблизительно 5,2–22,5 км), соответствующий верхней тропосфере – нижней стратосфере (рис. 3а). Температура в этой области характеризуется большой изменчивостью во времени и пространстве, особенно вблизи тропопаузы (см. рис. 3б). Большая часть изменчивости происходит с относительно небольшими вертикальными масштабами, связанными с широким спектром волн, включая гравитационные волны, волны Кельвина и Россби, а также приливные колебания и различные циркуляционные процессы (Scherllin-Pirscher et al., 2021).

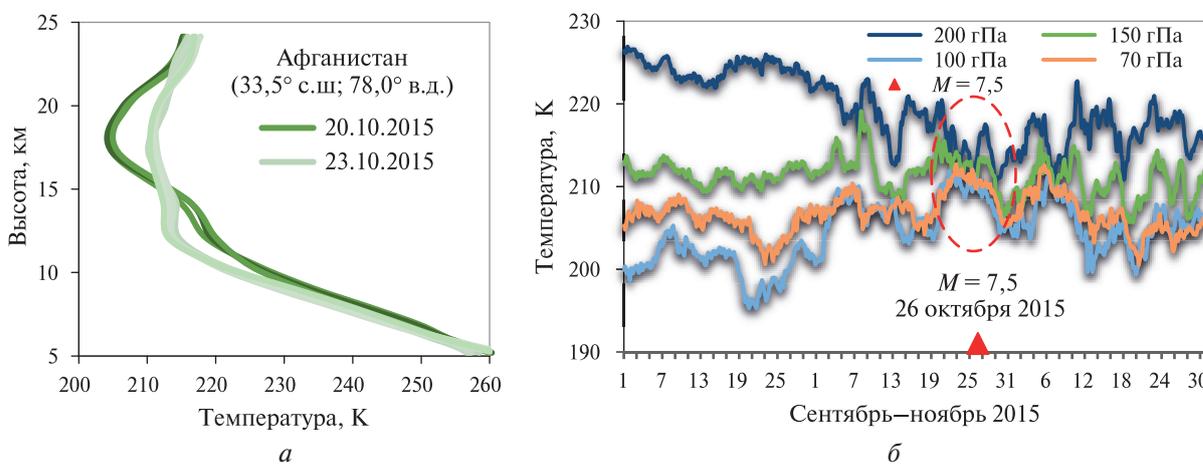


Рис. 3. Трансформация вертикальных профилей температуры перед землетрясением $M = 7,5$ (26 октября 2015 г.) в Афганистане (а) и временные ряды температуры в UTLS (б)

Особенности вертикальной структуры UTLS проявляются в изменениях профилей коэффициента линейной регрессии между высотой и температурой тропопаузы, имеющих типичную S-образную форму с отрицательными коэффициентами корреляции выше тропопаузы (~ 100 гПа) и положительными значениями в верхней тропосфере (~ 300 гПа) (Meng et al., 2021). Наблюдения за изменениями температуры на этих двух уровнях UTLS лежали в основе разработанного алгоритма обработки спутниковых данных, подробное описание которого приведено в работах (Сverdлик, 2021, 2022). Интенсивность вариаций температуры оценивалась путём сравнения скользящих дисперсий VAR (англ. Variance) в корот-

ком STA (*англ.* Short Time Averaging) и длинном LTA (*англ.* Long Time Averaging) временных окнах: $R = \text{VAR}_{\text{STA}} / \text{VAR}_{\text{LTA}}$, с последующим вычислением интегральных параметров δT_C (δT). Дисперсия температуры рассматривалась как мера активности различных возмущающих факторов, в том числе гравитационных волн, генерация которых может быть связана с сейсмической активностью (Свердловик, 2025). Возмущённому состоянию верхней тропосферы и нижней соответствовали флуктуации температуры, удовлетворяющие условиям: $R_{\text{UT}} > 1,0$ и $R_{\text{LS}} > 1,0$ соответственно, а значения параметра $\delta T_C > 1,5$ считались аномальными (Свердловик, Ибраев, 2022). Использование двухуровневого подхода повысило вероятность обнаружения тепловых аномалий, предшествующих землетрясениям, что подтверждается примерами анализа вариаций температуры в сейсмически активных регионах Европы и Азии (например, (Свердловик, 2022, 2023, 2025)). Кроме того, это позволило снизить количество ложноположительных тепловых аномалий (т.е. не сопровождающихся землетрясениями) (Genzano et al., 2021).

Идентификация предсейсмических аномалий температуры в UTLS основывалась на трёх известных положениях критерия DTS-T (*англ.* Deviation-Time-Space-Thermal): 1) значительное отклонение наблюдаемого параметра от своих фоновых значений; 2) квазисинхронное поведение аномалий во времени; 3) устойчивые в пространстве аномалии располагаются вблизи эпицентральных областей (Qin et al., 2013; Rasheed et al., 2024). С точки зрения пространственного расположения аномалий относительно эпицентров рассматриваемых событий был выбран критерий $\pm(5-15)^\circ$ по широте и долготе, соответствующий предполагаемым размерам зон подготовки землетрясений с магнитудой от 6,3 до 7,5 согласно расчётам по эмпирической формуле Добровольского (Dobrovolsky et al., 1979). Пространственные характеристики возмущений температуры определялись с помощью программного приложения IPPLA (*англ.* Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) (Свердловик, Ибраев, 2022, 2023).

Результаты выделения предсейсмических возмущений температуры в UTLS

Проанализированная в настоящей работе серия из шести землетрясений с магнитудой $M > 6,0$ была зарегистрирована в сейсмически активном регионе Центральной Азии в течение относительно короткого промежутка времени с октября 2015 г. по ноябрь 2016 г. Самыми сильными в этой последовательности были землетрясения $M = 7,5$ (26.10.2015; 09:09:42 UTC) и $M = 7,2$ (07.12.2015; 07:50:05 UTC). Результаты расчёта пространственно-временного распределения интегрального параметра δT_C в предсейсмические периоды этих событий приведены на *рис. 4* (см. с. 155). Набор карт на *рис. 4a* демонстрирует все стадии процесса эволюции аномалии температуры от развития до ослабления и постепенного распространения на восток в период с 20 по 22 октября 2015 г. Хорошо выраженная область высоких значений параметра $\delta T_C = 1,5 \dots 2,2$ с горизонтальными размерами порядка 1000 км была устойчиво локализована вблизи эпицентра землетрясения $M = 7,5$ на протяжении более 24 ч. Максимум в развитии возмущения температуры в UTLS наблюдался 21 октября 2015 г. за ~ 5 сут до события на удалении в несколько сотен километров от эпицентра. Аналогичные изменения пространственного распределения возмущения температуры в UTLS, указывающие на согласованное поведение температуры и сейсмичности, наблюдались за 2–3 сут до землетрясения $M = 7,2$ (см. *рис. 4б*). Анализ пространственно-временной изменчивости параметра δT_C позволил квалифицировать области устойчиво высоких значений ($\delta T_C \geq 2,0$) как значительные предсейсмические тепловые аномалии.

Следует отметить, что существенная изменчивость температуры в UTLS во времени и пространстве, особенно вблизи тропопаузы, связана не только с влиянием широкого спектра волн и циркуляционных процессов (Scherllin-Pirscher et al., 2021). Важную роль играет также присутствие облаков, способных формировать двойную тропопаузу (см. *рис. 3a*), связанную с инверсией в верхней части облака, и приводить к аномальным изменениям темпе-

ратуры (Shi et al., 2017). Возможная реакция облаков на процессы, происходящие при подготовке землетрясения, может быть оценена по данным спутниковых измерений AIRS. На *рис. 5* приведены карты, иллюстрирующие эволюцию пространственного распределения облачности на исследуемой территории 18–21 октября 2015 г. Сравнение данных, представленных на *рис. 4а* и *5*, свидетельствует, что явной корреляции между пространственно-временным распределением параметра δT_C и покрытием исследуемой территории облаками не наблюдалось. В то же время определённое сходство между изменениями δT_C и облачностью вблизи эпицентральной области землетрясения $M = 7,5$ (26.10.2015) всё же имеет место, но со смещением по времени $\sim 2,0$ – $2,5$ сут. Учитывая результаты нескольких сообщений об аномальных облачных образованиях над зонами разломов вблизи землетрясений, опубликованных ранее (например, (Harrison et al., 2014)), это даёт основание для проведения дополнительного более подробного исследования возможной связи облачности с изменениями температуры в UTLS и сейсмичностью.

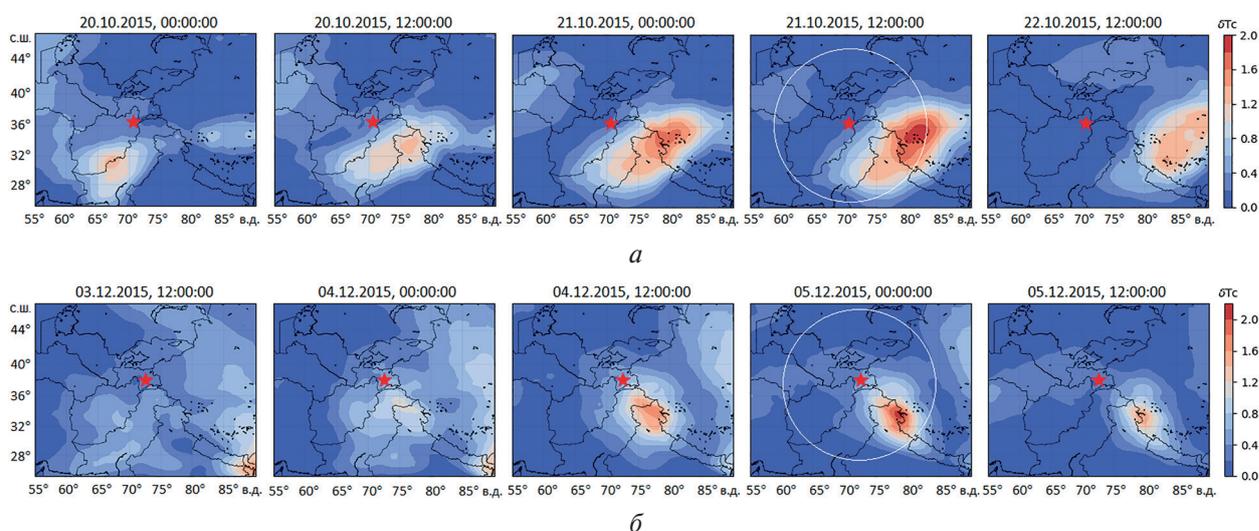


Рис. 4. Эволюция пространственного распределения параметра δT_C в период с 20 по 22 октября 2015 г. (*а*) и с 3 по 5 декабря 2015 г. (*б*). Маркерами показаны эпицентры землетрясений $M = 7,5$ (26.10.2015; 09:09:42 UTC; 36,52° с. ш.; 70,37° в. д.) в Афганистане и $M = 7,2$ (07.12.2015; 07:50:05 UTC; 38,21° с. ш.; 72,78° в. д.) в Таджикистане. Белые круги обозначают области подготовки землетрясений согласно (Dobrovolsky et al., 1979)

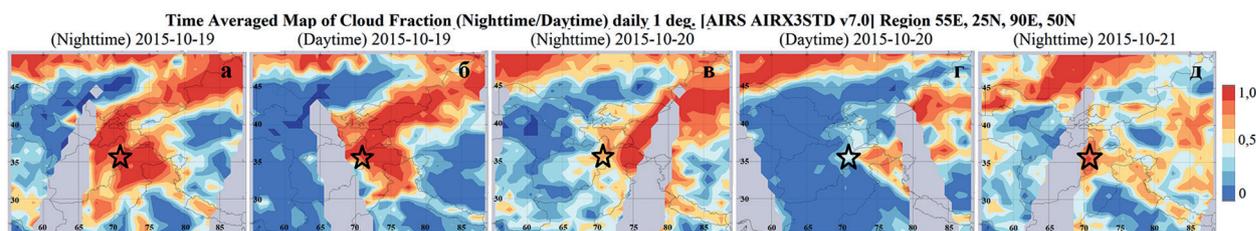


Рис. 5. Эволюция пространственного распределения облачности 19–21 октября 2015 г. по данным AIRS (Aqua) в пределах координат: 20–120° в. д. и 15–55° с. ш. Маркерами показан эпицентр землетрясения $M = 7,5$ (26.10.2015; 09:09:42 UTC; 36,52° с. ш.; 70,37° в. д.) (<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni>)

Расположение аномальных областей в моменты максимального развития в обоих представленных на *рис. 4* случаях практически совпадало и их центры находились в пределах координат: 33,0–34,0° с. ш.; 77,5–78,75° в. д. Данные спутникового мониторинга вариации температуры над этим участком с июля 2015 г. по февраль 2016 г. на уровнях 300 и 100 гПа характеризовались значительной временной изменчивостью (*рис. 6а*, см. с. 156), которая в данном случае не позволяет визуально выделить предсейсмические аномалии и тре-

бует применения специального алгоритма обработки временных рядов (Свердлик, 2021). В результате обработки данных были обнаружены возмущения температуры, отличающиеся заметным увеличением отношения $R = \text{VAR}_{\text{STA}}/\text{VAR}_{\text{LTA}} > 1,0$, синхронно проявляющимся на обоих уровнях (см. *рис. 6б*). На *рис. 6в* показана динамика изменения параметров δT_C и δT , отчётливо демонстрирующая наиболее интенсивные возмущения температуры ($\delta T_C > 3,0$), которые наблюдались за несколько суток до активизации сейсмичности (см. *рис. 6г*), но отсутствовали во все другие моменты времени исследуемого периода. Поскольку землетрясения произошли в спокойных солнечных и геомагнитных условиях, это даёт основание предполагать вероятную связь аномальных изменений температуры ($\delta T_C > 3,0$) с процессами подготовки землетрясений.

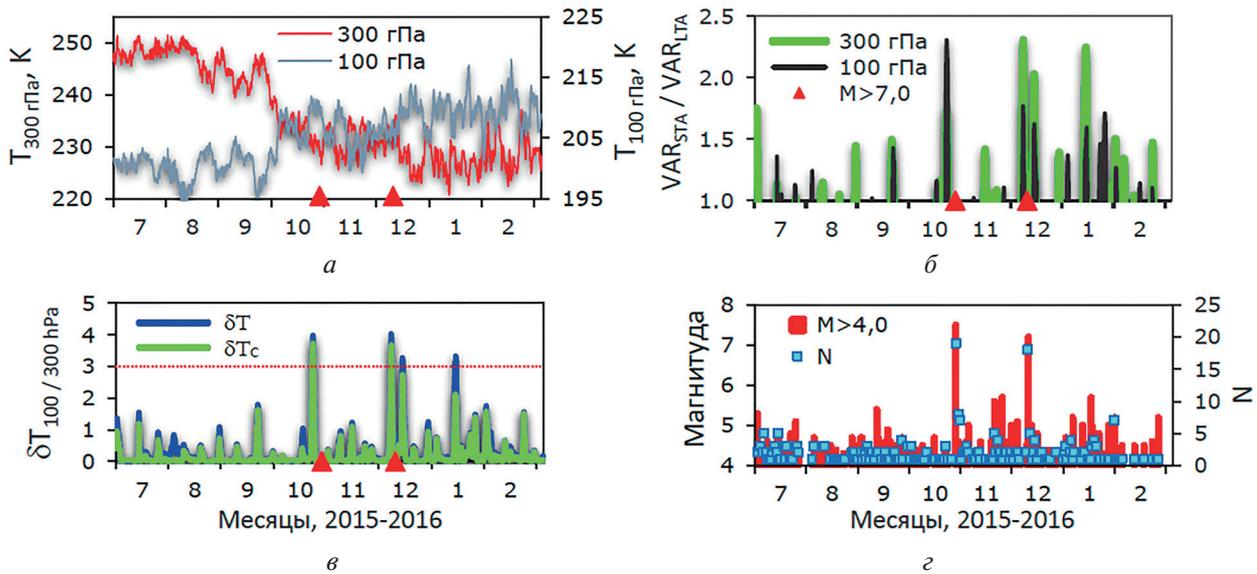


Рис. 6. Динамика изменения температуры (*а*), отношения скользящих дисперсий ($R = \text{VAR}_{\text{STA}}/\text{VAR}_{\text{LTA}} > 1,0$) (*б*) на уровнях 100 и 300 гПа, параметров δT и δT_C (*в*) и последовательности магнитуд (M) и числа землетрясений (N) (*г*) в июле 2015–феврале 2016 г. ($33\text{--}34^\circ$ с. ш.; $77,5\text{--}78,75^\circ$ в. д.). Маркерами отмечены моменты землетрясений $M > 7,0$

На *рис. 7* (см. с. 157) представлены карты пространственного распределения возмущений температуры для остальных четырёх землетрясений, коррелирующих со временем возникновения этих событий. Анализ спутниковых данных показал, что имело место несколько типичных ситуаций расположения предсейсмических аномалий, которые либо перекрывали эпицентры, либо концентрировались в непосредственной близости от них в пределах области с радиусом Добровольского (Dobrovolsky et al., 1979). Сравнивая атмосферные эффекты землетрясений, следует отметить сопоставимые по продолжительности (1–2 сут) и интенсивности возмущения с достаточно близкими максимальными значениями параметра δT_C ($\delta T_C = 1,6\text{--}2,0$). Определённое различие во времени запаздывания сейсмических событий относительно появления тепловых аномалий (от 1 до 5 сут), а также размеров возмущённых областей может быть связано с существенно отличающейся глубиной гипоцентров (см. *таблицу* и *рис. 2б*). Важная особенность выявленных предсейсмических возмущений, которая явно проявилась в результатах и согласуется с предыдущими исследованиями (например, (Свердлик, 2022; Panchal et al., 2022)), состоит в том, что пространственное распределение тепловых аномалий перед сильными землетрясениями с глубоким гипоцентром ($D > 200$ км) было более широким (см. *рис. 4* и *7*). Возмущённые области, как правило, вытянуты вдоль параллелей вследствие влияния преобладающего ветрового режима в верхней тропосфере (Свердлик, 2023, 2025). В то же время основные характеристики аномалий температуры (продолжительность, горизонтальные размеры, положение относительно эпицентра) не показали явной и устойчивой зависимости от магнитуды землетрясения (Wen et al., 2023).

Анализируя *рис. 7*, можно отметить ещё одну особенность полученных результатов, которая служит дополнительным подтверждением сейсмо-атмосферной связи. Так, на *рис. 7б* наблюдался второй максимум параметра δT_C , расположенный в пределах координат 23–27° с.ш. и 93–98° в.д. и совпадающий с эпицентрными областями землетрясений, которые по данным каталога USGS произошли в Индии 5 апреля 2016 г. ($M = 5,0$; 07:42:24 UTC; 25,76° с.ш.; 90,55° в.д.; $D = 10,0$ км) и в Мьянме 13 апреля 2016 г. ($M = 6,9$; 13:55:17; 23,09° с.ш.; 94,87° в.д.; $D = 136,0$ км).

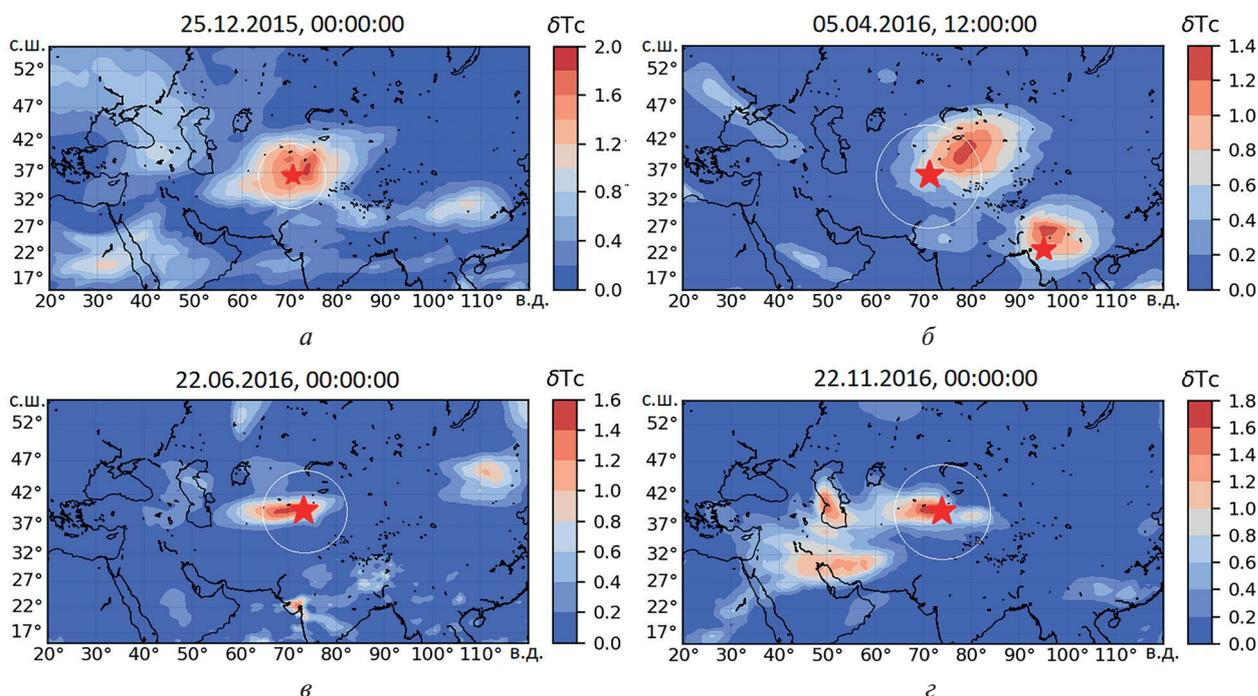


Рис. 7. Пространственное распределение параметра δT_C : *а* — 25 декабря 2015 г.; *б* — 5 апреля 2016 г.; *в* — 22 июня 2016 г.; *г* — 22 ноября 2016 г. Маркерами показаны эпицентры соответствующих землетрясений: в Афганистане $M = 6,3$ (25.12.2015; 36,49° с.ш.; 71,13° в.д.) и $M = 6,6$ (10.04.2016; 36,47° с.ш.; 71,13° в.д.), Кыргызстане $M = 6,4$ (26.06.2016; 39,48° с.ш.; 73,34° в.д.), Таджикистане $M = 6,6$ (25.11.2016; 39,27° с.ш.; 73,98° в.д.)

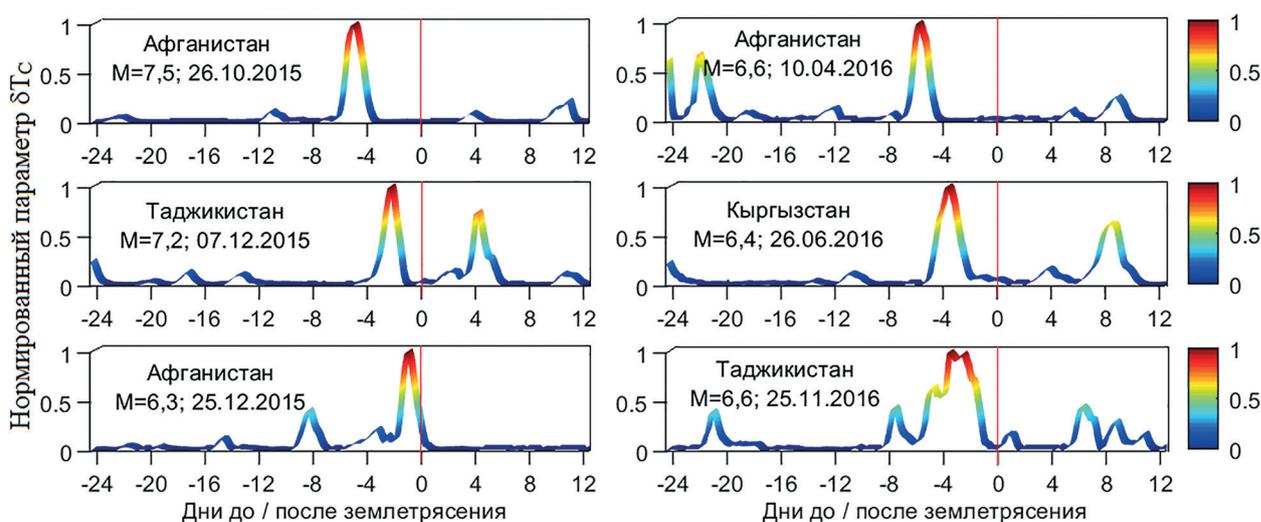


Рис. 8. Результаты диагностирования аномалий температуры в UTLS (нормированный параметр δT_C) перед сейсмическими событиями $M > 6,0$ в 2015–2016 гг., приведённые к одному моменту землетрясения (отмечен красной линией)

Таким образом, несмотря на сильную изменчивость температуры в области тропопаузы, используемый алгоритм позволил выделить и идентифицировать устойчивые в пространстве и времени тепловые аномалии, которые формировались в очевидной пространственно-временной связи с шестью землетрясениями $M > 6,0$. На *рис. 8* (см. с. 157) приведены 36-дневные (~ 24 дня до событий и 12 дней после них) фрагменты графиков нормированного параметра δT_c , которые демонстрируют в том или ином виде наличие передсейсмических аномалий температуры в UTLS. Наиболее интенсивные тепловые аномалии наблюдались за 1–5 дней до событий. Такая синхронизация температурных аномалий и сильных землетрясений по времени и в пространстве полностью соответствует критериям DTS-T и позволяет предположить единую природу формирования тепловых аномалий и общность протекающих при этом физических процессов (Свердлик, 2021). Наиболее вероятным механизмом взаимодействия литосферы и атмосферы являлись вызванные тектоническими напряжениями гравитационные волны, которые способны распространяться вверх и влиять на изменения температуры в области тропопаузы (Свердлик, 2025; Kherani et al., 2021; Korepanov et al., 2009; Picozza et al., 2021; Rasheed et al., 2024).

Заключение

Представлены результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере в периоды подготовки шести крупных землетрясений с магнитудой $M > 6,0$ в сейсмически активном регионе Центральной Азии (Афганистан, Таджикистан и Кыргызстан). Для анализа использовался набор данных реанализа MERRA-2. В качестве предсейсмических признаков в поведении температуры рассматривались пространственно согласованные противоположные по знаку аномальные короткопериодные изменения температуры, происходящие в верхней тропосфере и области тропопаузы. Результаты спутникового мониторинга температурного режима в исследуемом регионе и последующего вычисления параметров аномальных вариаций показали, что устойчивые в пространстве и времени мезомасштабные возмущения температуры отчётливо наблюдались за 1–5 сут до событий. Согласно полученным данным, важным параметром, влияющим на возмущения температуры в UTLS, является глубина очага землетрясения. Пространственный масштаб тепловых аномалий, предшествующих глубокофокусным землетрясениям ($D > 200$ км), значительно превышал размеры аномалий малоглубинных событий. В то же время выделенные во всех анализируемых случаях возмущения температуры располагались в пределах областей, рассчитанных с использованием радиуса Добровольского, и могут, вероятно, служить проявлением реакции слоёв нижней атмосферы на процессы, происходящие в литосфере при подготовке сильных землетрясений. Отклонения предсейсмических аномалий в пространстве и времени соответствовали критериям DTS-T.

В продолжение данного исследования будут проанализированы горизонтальные движения воздушных масс, которые, предположительно, играют важную роль в развитии предсейсмических возмущений температуры.

Автор выражает благодарность сотрудникам Центра данных и информационных служб Годдарда по наукам о Земле (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center — GES DISC), НАСА (Национальному управлению по авиации и исследованию космического пространства, NASA) и USGS за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) по теме № 1021052806454-2-1.5.1. В исследовании также принимали участие сотрудники Высокогорной обсерватории физики атмосферных процессов Кыргызско-российского славянского университета (КРСУ) и НС РАН в рамках проекта по программе развития КРСУ.

Литература

1. *Имашев С. А., Свердлик Л. Г.* Атмосферные и ионосферные аномалии, предшествующие сильному экваториальному землетрясению на Суматре // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 318–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327.
2. *Свердлик Л. Г.* Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
3. *Свердлик Л. Г.* Атмосферные эффекты крупнейших землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 81–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
4. *Свердлик Л. Г.* Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 144–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
5. *Свердлик Л. Г.* Предсейсмические возмущения метеопараметров в нижней атмосфере по данным спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 56–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-68.
6. *Свердлик Л. Г., Ибраев А. Э.* Использование модифицированного алгоритма STA/LTA для выделения предсейсмических возмущений температуры в нижней атмосфере // Вестн. Кыргызско-Российского Славянского ун-та. 2022. Т. 22. № 12. С. 190–196. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.
7. *Свердлик Л. Г., Ибраев А. Э.* Программа «IPPLA» (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023612499. Рег. 03.02.2023.
8. *Шерман С. И.* Тектонофизические признаки формирования очагов сильных землетрясений в сейсмических зонах Центральной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 495–512. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0219.
9. *Aumann H. H., Chahine M. T., Gautier C. et al.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 2. P. 253–264. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356.
10. *Bloch W., Metzger S., Schurr B. et al.* The 2015–2017 Pamir earthquake sequence: foreshocks, main shocks and aftershocks, seismotectonics, fault interaction and fluid processes // Geophysical J. Intern. 2023. V. 233. No. 1. P. 641–662. DOI: 10.1093/gji/ggac473.
11. *Chen H., Han P., Hattori K.* Recent Advances and challenges in the seismo-electromagnetic study: A brief review // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 22. Article 5893. DOI: 10.3390/rs14225893.
12. *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.
13. *Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure and Applied Geophysics. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
14. *Draz M. U., Shah M., Jamjareegulgarn P. et al.* Deep machine learning based possible atmospheric and ionospheric precursors of the 2021 Mw 7.1 Japan earthquake // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 7. Article 1904. DOI: 10.3390/rs15071904.
15. *Feng F., Wang K.* Merging satellite retrievals and reanalyses to produce global long-term and consistent surface incident solar radiation datasets // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 1. Article 115. DOI: 10.3390/rs10010115.
16. *Genzano N., Filizzola C., Hattori K. et al.* Statistical correlation analysis between thermal infrared anomalies observed from MTSATs and large earthquakes occurred in Japan (2005–2015) // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2021. V. 126. Iss. 2. Article e2020JB020108. DOI: 10.1029/2020JB020108.
17. *Ghosh S., Chowdhury S., Kundu S. et al.* Unusual surface latent heat flux variations and their critical dynamics revealed before strong earthquakes // Entropy. 2022. V. 24. No. 1. Article 23. DOI: 10.3390/e24010023.
18. *Harrison R. G., Aplin K. L., Rycroft M. J.* Brief Communication: Earthquake-cloud coupling through the global atmospheric electric circuit // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. V. 14. P. 773–777. DOI: 10.5194/nhess-14-773-2014.
19. *Jiao Z.-H., Shan X.* Statistical framework for the evaluation of earthquake forecasting: A case study based on satellite surface temperature anomalies // J. Asian Earth Sciences. 2021. V. 211. Article 104710. DOI: 10.1016/j.jseaes.2021.104710.
20. *Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018. V. 18. P. 1013–1036. DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
21. *Kherani E. A., Sanchez S. A., de Paula E. R.* Numerical modeling of coseismic tropospheric disturbances arising from the unstable acoustic gravity wave energetics // Atmosphere. 2021. V. 12. Iss. 6. Article 765. DOI: 10.3390/atmos12060765.

22. *Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Y., Lizunov G.* AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2009. V. 34. Iss. 6–7. P. 485–495. DOI: 10.1016/j.pce.2008.07.014.
23. *Liu J., Cui J., Zhang Y. et al.* Study of the OLR anomalies before the 2023 Turkey M7.8 earthquake // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 21. Article 5078. DOI: 10.3390/rs15215078.
24. *Liu S., Cui Y., Wei L. et al.* Pre-earthquake MBT anomalies in the Central and Eastern Qinghai-Tibet Plateau and their association to earthquakes // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 298. Article 113815. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113815.
25. *Lu X., Meng Q., Ma W., Zhang X.* Air temperature variations analysis of the Hualian M6.9 earthquake // *Atmosphere*. 2024. V. 15. Iss. 12. Article 1463. DOI: 10.3390/atmos15121463.
26. *Luo B., Minnett P.J., Szczodrak M. et al.* Accuracy assessment of MERRA-2 and ERA-Interim sea surface temperature, air temperature, and humidity profiles over the Atlantic Ocean using AEROSÉ Measurements // *J. Climate*. 2020. V. 33. P. 6889–6909. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0955.1.
27. *McCarty W., Coy L., Gelaro R. et al.* MERRA-2 input observations: Summary and initial assessment. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, V. 46. NASA/TM–2016-104606. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 2016. 61 p.
28. *Meng L., Liu J., Tarasick D.W. et al.* Continuous rise of the tropopause in the Northern Hemisphere over 1980–2020 // *Science Advances*. 2021. V. 7. Iss. 45. 9 p. DOI: 10.1126/sciadv.abi8065.
29. *Panchal H., Saraf A.K., Das J., Dwivedi D.* Satellite based detection of pre-earthquake thermal anomaly, co-seismic deformation and source parameter modelling of past earthquakes // *Natural Hazards Research*. 2022. V. 2. Iss. 4. P. 287–303. DOI: 10.1016/j.nhres.2022.12.001.
30. *Picozza P., Conti L., Sotgiu A.* Looking for earthquake precursors from space: A critical review // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. Article 676775. DOI: 10.3389/feart.2021.676775.
31. *Qin K., Wu L., Zheng S., Liu S.* A Deviation-Time-Space-Thermal (DTS-T) method for Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)-based earthquake anomaly recognition: Criteria and quantify indices // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. No. 10. P. 5143–5151. DOI: 10.3390/rs5105143.
32. *Rasheed R., Chen B., Wu D., Wu L.* A comparative study on multi-parameter ionospheric disturbances associated with the 2015 Mw 7.5 and 2023 Mw 6.3 earthquakes in Afghanistan // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 11. Article 1839. DOI: 10.3390/rs16111839.
33. *Shangguan M., Wang W., Jin S.* Variability of temperature and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere from multi-satellite observations and reanalysis data // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 6659–6679. DOI: 10.5194/acp-19-6659-2019.
34. *Schekotov A. Yu., Molchanov O.A., Hayakawa M.* A study of atmospheric influence from earthquake statistics // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2006. V. 31. Iss. 4–9. P. 341–345. DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.002.
35. *Scherllin-Pirscher B., Steiner A.K., Anthes R.A. et al.* Tropical temperature variability in the UTLS: New insights from GPS radio occultation observations // *J. Climate*. 2021. V. 34. Iss. 8. P. 2813–2838. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0385.1.
36. *Shi C., Cai W., Guo D.* Composition and thermal structure of the upper troposphere and lower stratosphere in a penetrating mesoscale convective complex determined by satellite observations and model simulations // *Hindawi Advances in Meteorology*. 2017. V. 2017. Article 6404796. 9 p. DOI: 10.1155/2017/6404796.
37. *Sippl C., Schurr B., Yuan X. et al.* Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V. 118. Iss. 4. P. 1438–1457. DOI: 10.1002/jgrb.50128.
38. *Wen T., Wei C., Wang Z. et al.* Regional thermal radiation characteristics of FY satellite remote sensing based on big data analysis // *J. Sensors*. 2023. V. 23. Article 8446. DOI: 10.3390/s23208446.
39. *Xiong P., Shen X.* Outgoing longwave radiation anomalies analysis associated with different types of seismic activity // *Advances in Space Research*. 2017. V. 59. Iss. 5. P. 1408–1415. DOI: 10.1016/j.asr.2016.12.011.
40. *Xu X., Chen S., Zhang S., Dai R.* Analysis of potential precursory pattern at Earth surface and the above atmosphere and ionosphere preceding two Mw ≥ 7 earthquakes in Mexico in 2020–2021 // *Earth and Space Science*. 2022. V. 9. Iss. 10. Article e2022EA002267. DOI: 10.1029/2022EA002267.
41. *Zhang W., Zhao J., Wang W. et al.* A preliminary evaluation of surface latent heat flux as an earthquake precursor // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. V. 13. P. 2639–2647. DOI: 10.5194/nhess-13-2639-2013.

Thermal anomaly dynamics in the seismically active region of Central Asia

L. G. Sverdlik

Research Station RAS in Bishkek City, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

E-mail: l.sverdlik@mail.ru

Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek 720000, Kyrgyzstan

The results of a retrospective study on anomalies in changes to the thermal stratification of the atmosphere in the tropopause region above the epicentral areas of six earthquakes with magnitudes $M > 6.0$, which occurred in 2015–2016 in a region stretching from the Pamir-Hindukush seismic zone in Afghanistan (southwest) to Eastern Pamir (Tajikistan) (northeast), are presented. Using these events as examples, an assessment was made of the spatial scale, localization, duration, and timing of the anomalous temperature disturbances. The identification of seismo-atmospheric effects was conducted using a specially developed MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) algorithm for processing satellite monitoring data based on calculation of the STA/LTA (Short Time Averaging to Long Time Averaging) criterion. The analysis of temperature profiles at levels from 500 to 40 hPa showed that, before each of the studied earthquakes, the atmosphere was in a disturbed state. Pre-seismic anomalies were characterized by increased values of the δT_C parameter (≥ 1.5) and manifested as well-defined mesoscale (300–900 km) areas. The spatial scale of thermal anomalies before strong earthquakes with deep hypocenters (greater than 200 km) was significantly broader. The maximum temperature disturbances were observed 1–5 days before strong earthquakes and were localized above the epicentral areas or within several hundred kilometers off the epicenters, which fully meets the DTS-T (Deviation-Time-Space-Thermal) criteria and can likely be considered as evidence of the interaction between the lithosphere and the atmosphere during the preparation periods of strong earthquakes. Atmospheric gravity waves generated by slow oscillations of the Earth's surface were considered the most likely mechanism of the formation of pre-seismic disturbances in the lower atmosphere layers.

Keywords: satellite measurements, temperature, earthquake, upper troposphere, lower stratosphere, STA/LTA criterion, integral parameter, anomaly

Accepted: 10.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-149-163

References

1. Imashev S. A., Sverdlik L. G., Atmospheric and ionospheric anomalies preceding a strong equatorial earthquake in Sumatra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 318–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327.
2. Sverdlik L. G., Identification of pre-seismic atmospheric perturbations using modified STA/LTA criterion, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
3. Sverdlik L. G., Atmospheric effects of the largest earthquakes in the Alpine-Himalayan seismic belt, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 81–90 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
4. Sverdlik L. G., Dynamics of perturbations in the lower atmosphere in seismically active regions of Asia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 144–152 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
5. Sverdlik L. G., Pre-seismic disturbances of meteorological parameters in the lower atmosphere based on satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 56–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-68.
6. Sverdlik L. G., Ibraev A. E., Use of the modified STA/LTA algorithm for detection pre-seismic temperature perturbations in the lower atmosphere, *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo slavyanskogo universiteta*, 2022, V. 22, No. 12, pp. 190–196 (in Russian), DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.
7. Sverdlik L. G., Ibraev A. E., *Programma "IPPLA" (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere)* (Program "IPPLA" (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere)), Certificate of state registration of software No. 2023612499 (RU), Reg. 03.02.2023 (in Russian).

8. Sherman S. I., Tectonophysical signs of the formation of strong earthquake foci in seismic zones of Central Asia, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2016, V. 7, No. 4, pp. 495–512 (in Russian), DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0219.
9. Aumann H. H., Chahine M. T., Gautier C. et al., AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, V. 41, pp. 253–264, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356.
10. Bloch W., Metzger S., Schurr B. et al., The 2015–2017 Pamir earthquake sequence: foreshocks, main shocks and aftershocks, seismotectonics, fault interaction and fluid processes, *Geophysical J. Intern.*, 2023, V. 233, No. 1, pp. 641–662, DOI: 10.1093/gji/ggac473.
11. Chen H., Han P., Hattori K., Recent advances and challenges in the seismo-electromagnetic study: A brief review, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 22, Article 5893, DOI: 10.3390/rs14225893.
12. 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, pp. 120–130.
13. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure Applied Geophysics*, 1979, V. 117, pp. 1025–1044.
14. Draz M. U., Shah M., Jamjareegulgarn P. et al., Deep machine learning based possible atmospheric and ionospheric precursors of the 2021 Mw 7.1 Japan earthquake, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 7, Article 1904. DOI: 10.3390/rs15071904.
15. Feng F., Wang K., Merging satellite retrievals and reanalyses to produce global long-term and consistent surface incident solar radiation datasets, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 1, Article 115, DOI: 10.3390/rs10010115.
16. Genzano N., Filizzola C., Hattori K. et al., Statistical correlation analysis between thermal infrared anomalies observed from MTSATs and large earthquakes occurred in Japan (2005–2015), *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, V. 126, Iss. 2, Article e2020JB020108, DOI: 10.1029/2020JB020108.
17. Ghosh S., Chowdhury S., Kundu S. et al., Unusual surface latent heat flux variations and their critical dynamics revealed before strong earthquakes, *Entropy*, 2022, V. 24, No. 1, Article 23, DOI: 10.3390/e24010023.
18. Harrison R. G., Aplin K. L., Rycroft M. J., Brief Communication: Earthquake-cloud coupling through the global atmospheric electric circuit, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, V. 14, pp. 773–777, DOI: 10.5194/nhess-14-773-2014.
19. Jiao Z.-H., Shan X., Statistical framework for the evaluation of earthquake forecasting: A case study based on satellite surface temperature anomalies, *J. Asian Earth Sciences*, 2021, V. 211, Article 104710, DOI: 10.1016/j.jseas.2021.104710.
20. Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X., Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, V. 18, pp. 1013–1036, DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
21. Kherani E. A., Sanchez S. A., de Paula E. R., Numerical modeling of coseismic tropospheric disturbances arising from the unstable acoustic gravity wave energetics, *Atmosphere*, 2021, V. 12, Iss. 6, Article 765, DOI: 10.3390/atmos12060765.
22. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Y., Lizunov G., AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2009, V. 34, Iss. 6–7, pp. 485–495, DOI: 10.1016/j.pce.2008.07.014.
23. Liu J., Cui J., Zhang Y. et al., Study of the OLR anomalies before the 2023 Turkey M7.8 earthquake, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 21, Article 5078, DOI: 10.3390/rs15215078.
24. Liu S., Cui Y., Wei L. et al., Pre-earthquake MBT anomalies in the Central and Eastern Qinghai-Tibet Plateau and their association to earthquakes, *Remote Sensing of Environment*, 2023, V. 298, Article 113815, DOI: 10.1016/j.rse.2023.113815.
25. Lu X., Meng Q., Ma W., Zhang X., Air temperature variations analysis of the Hualian M6.9 earthquake, *Atmosphere*, 2024, V. 15, Article 1463, DOI: 10.3390/atmos15121463.
26. Luo B., Minnett P. J., Szczo drak M. et al., Accuracy Assessment of MERRA-2 and ERA-Interim sea surface temperature, air temperature, and humidity profiles over the Atlantic Ocean using AEROSÉ Measurements, *J. Climate*, 2020, V. 33, pp. 6889–6909, DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0955.1.
27. McCarty W., Coy L., Gelaro R. et al., MERRA-2 input observations: Summary and initial assessment, *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, V. 46, NASA/TM–2016–104606, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 2016, 61 p.
28. Meng L., Liu J., Tarasick D. W. et al., Continuous rise of the tropopause in the Northern Hemisphere over 1980–2020, *Science Advances*, 2021, V. 7, Iss. 45, 9 p., DOI: 10.1126/sciadv.abi8065.
29. Panchal H., Saraf A. K., Das J., Dwivedi D., Satellite based detection of pre-earthquake thermal anomaly, co-seismic deformation and source parameter modelling of past earthquakes, *Natural Hazards Research*, 2022, V. 2, Iss. 4, pp. 287–303, DOI: 10.1016/j.nhres.2022.12.001.
30. Picozza P., Conti L., Sotgiu A., Looking for earthquake precursors from space: A critical review, *Frontiers in Earth Science*, 2021, V. 9, Article 676775, DOI: 10.3389/feart.2021.676775.

31. Qin K., Wu L., Zheng S., Liu S., A Deviation-Time-Space-Thermal (DTS-T) method for Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)-based earthquake anomaly recognition: Criteria and quantify indices, *Remote Sensing*, 2013, V. 5, No. 10, pp. 5143–5151, DOI: 10.3390/rs5105143.
32. Rasheed R., Chen B., Wu D., Wu L., A comparative study on multi-parameter ionospheric disturbances associated with the 2015 Mw 7.5 and 2023 Mw 6.3 earthquakes in Afghanistan, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Article 1839, DOI: 10.3390/rs16111839.
33. Shangguan M., Wang W., Jin S., Variability of temperature and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere from multi-satellite observations and reanalysis data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, V. 19, pp. 6659–6679, DOI: 10.5194/acp-19-6659-2019.
34. Schekotov A. Yu., Molchanov O. A., Hayakawa M., A study of atmospheric influence from earthquake statistics, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, V. 31, Iss. 4–9, pp. 341–345, DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.002.
35. Scherllin-Pirscher B., Steiner A. K., Anthes R. A. et al., Tropical temperature variability in the UTLS: New insights from GPS radio occultation observations, *J. Climate*, 2021, V. 34, Iss. 8, pp. 2813–2838, DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0385.1.
36. Shi C., Cai W., Guo D., Composition and thermal structure of the upper troposphere and lower stratosphere in a penetrating mesoscale convective complex determined by satellite observations and model simulations, *Hindawi Advances in Meteorology*, 2017, V. 2017, Article 6404796, 9 p., DOI: 10.1155/2017/6404796.
37. Sippl C., Schurr B., Yuan X. et al., Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, V. 118, Iss. 4, pp. 1438–1457, DOI: 10.1002/jgrb.50128.
38. Wen T., Wei C., Wang Z. et al., Regional thermal radiation characteristics of FY satellite remote sensing based on big data analysis, *J. Sensors*, 2023, V. 23, Article 8446, DOI: 10.3390/s23208446.
39. Xiong P., Shen X., Outgoing longwave radiation anomalies analysis associated with different types of seismic activity, *Advances in Space Research*, 2017, V. 59, Iss. 5, pp. 1408–1415, DOI: 10.1016/j.asr.2016.12.011.
40. Xu X., Chen S., Zhang S., Dai R., Analysis of potential precursory pattern at Earth surface and the above atmosphere and ionosphere preceding two Mw ≥ 7 earthquakes in Mexico in 2020–2021, *Earth and Space Science*, 2022, V. 9, Iss. 10, Article e2022EA002267, DOI: 10.1029/2022EA002267.
41. Zhang W., Zhao J., Wang W. et al., A preliminary evaluation of surface latent heat flux as an earthquake precursor, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, V. 13, pp. 2639–2647, DOI: 10.5194/nhess-13-2639-2013.