Пространственно-временной анализ атмосферных возмущений, предшествующих землетрясениям в Перу-Чилийской зоне субдукции

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

Выделение краткосрочных атмосферных эффектов, предшествующих крупным землетрясениям в зонах субдукции, представляется важной задачей снижения сейсмической опасности. Требующийся для выявления предсейсмических аномалий непрерывный мониторинг параметров атмосферы обеспечивают данные дистанционного зондирования, содержащиеся в архиве глобального реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, версия 2). В рамках данного исследования с использованием алгоритма IPPLA (*англ.* Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) были проанализированы вариации температуры атмосферы и выделены возмущения, согласованные с процессами в литосфере. Особенностью алгоритма является использование двух высотных диапазонов в верхней тропосфере и нижней стратосфере, которые определялись на основе выбора наиболее коррелированных противофазных изменений с относительно высокой интенсивностью вариаций температуры. В настоящей работе впервые были рассмотрены атмосферные эффекты, предваряющие землетрясения с магнитудой $M > 7{,}0$, произошедшие в 2021–2024 гг. в Южном полушарии на юге Перу и севере Чили. Результаты обработки данных температурных измерений показали чётко выраженную пространственную картину тепловых аномалий в зонах подготовки землетрясений. Мезомасштабные аномалии температуры, которые характеризовались максимальными значениями параметра аномальных вариаций $\delta T_C \geqslant 2{,}0$, наблюдались за несколько суток до событий. Возмущённые области температуры располагались вблизи эпицентров землетрясений и демонстрировали незначительные пространственные изменения, сохраняя свою форму, размер и положение на протяжении более 12 ч. Поскольку в качестве наиболее вероятного фактора, который приводил к нарушению термического состояния в нижней атмосфере, рассматривались волновые процессы, были проведены расчёты плотности потенциальной энергии гравитационных волн. Повышенная активность атмосферных волн, связанная, вероятно, с подготовкой землетрясений, наблюдалась вблизи эпицентров на высотах 12–17 км. Настоящее исследование может служить подтверждением того, что используемый алгоритм разработан не под конкретные условия мониторинга, а может быть применён глобально, в том числе при анализе вариаций температуры как в сейсмоактивных регионах Евразии, так и в зоне субдукции в Южной Америке.

Ключевые слова: спутниковые измерения, температура, землетрясение, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, критерий STA/LTA, интегральный параметр, аномалия, атмосферные гравитационные волны, потенциальная энергия

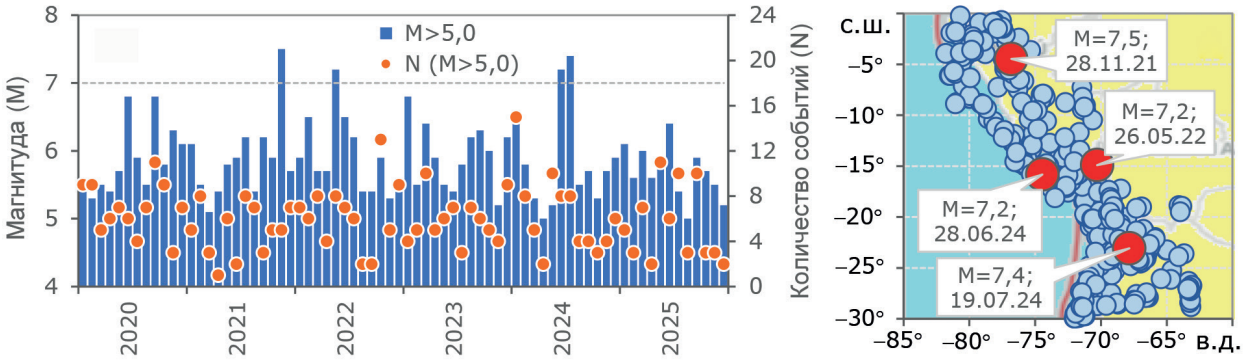
Одобрена к печати: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-244-257

Введение

Зоны субдукции считаются очагами крупнейших землетрясений на Земле вследствие конвергенции тектонических плит (Bilek, Lay, 2018). Одним из самых высоких показателей высвобождения сейсмической энергии в мире характеризуется западное побережье Южной Америки (Casarotti, Piersanti, 2003), где океаническая плита Наска (*англ.* Nazca) погружается под континентальную Южно-Американскую плиту. Этот уникальный регион, включающий территорию Чили и южную часть Перу, в котором происходят землетрясения с магнитудой $M \geqslant 8{,}0$ и регистрировались крупнейшие за всю историю сейсмических наблюдений (мега) события с магнитудой $M = 9{,}5$ (1960) (Hagen, Azevedo, 2023), изве-

стен как часть Тихоокеанского «огненного кольца». Скорость схождения плит составляет ~80 мм/год в южной части их границы и ~65 мм/год в северной части (Шерман, Злогодухова, 2011; DeMets et al., 2010; Lovery et al., 2024), что является одним из самых быстрых абсолютных движений тектонических плит (Hagen, Azevedo, 2023).

Высокая сейсмичность зоны субдукции с ежемесячно регистрируемыми несколькими землетрясениями $M \geqslant 5{,}0$ (*рис. 1*) и регулярно происходящими событиями $M > 7{,}0$ представляет интерес для различных исследований, например, сезонности землетрясений (Hagen, Azevedo, 2023), эволюции постсейсмических напряжений (Casarotti, Piersanti, 2003), вероятностной оценки сейсмической опасности (Das et al., 2020), повторяемости и частоты возникновения сильных землетрясений (Koravos et al., 2016), геомагнитных аномалий (Cordaro et al., 2021), предсейсмических (Dong et al., 2022; He, Heki, 2016, 2017) и косейсмических (Kundu, Bagiya, 2024) ионосферных возмущений и пр. Несмотря на значительный интерес к сейсмическим данным, в регионах Южной Америки очевиден недостаток информации об атмосферных эффектах сильных землетрясений.



а *б*

Рис. 1. Последовательность магнитуды и ежемесячного числа землетрясений $M \geqslant 5{,}0$ (N), зарегистрированных в пределах территории с координатами 0–30° ю.ш. и 60–85° з.д. в 2020–2025 гг. (*а*). Пространственное распределение эпицентров событий $M > 5{,}0$ и $M > 7{,}0$ (*б*)

В этой связи важным представляется проведение исследований пространственно-временной изменчивости термических и динамических параметров нижней атмосферы, что, во-первых, дополнит результаты, полученные ранее в сейсмически опасных регионах Европы и Азии и, во-вторых, позволит выявить региональные особенности предсейсмических возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (*англ.* Upper Troposphere and Lower Stratosphere — UTLS) в зоне субдукции Южной Америки.

Используемые данные и методика их обработки

В настоящей работе впервые проанализированы атмосферные эффекты, предшествующие сильным сейсмическим событиям, зарегистрированным в последние несколько лет на территории Перу и Чили. Анализ был сосредоточен на самых крупных землетрясениях с магнитудой $M > 7{,}0$, произошедших в 2020–2025 гг. в области, ограниченной координатами: 0–30° ю.ш. и 60–85° з.д. Согласно данным онлайн-версии мирового каталога Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) (http://earthquake.usgs.gov), за последние шесть лет в этой области, представляющей различные сейсмотектонические условия (Arango et al., 2011; Liu, Yao, 2020), произошло 433 землетрясения с магнитудой $M \geqslant 5{,}0$, из которых четыре события имели магнитуду $M > 7{,}0$ (см. *рис. 1а*). Характеристики этих сейсмических событий приведены в *таблице*, а расположение их эпицентров ($M > 7{,}0$ и $5{,}0 < M < 7{,}0$) показано маркерами на *рис. 1б*. Диапазон глубины залегания гипоцентров (D) варьировал от 24 до 236 км.

Характеристики землетрясений (EQ) $M > 7{,}0$ (https://earthquake.usgs.gov)

№	Дата	Время, UTC	Координаты		D, км	M	Расположение эпицентров
			с. ш.	в. д.			
EQ1	28.11.2021	10:52:14	–4,47°	–76,81°	126,0	7,5	43 км от г. Барранка (*исп.* Barranca), Перу
EQ2	26.05.2022	12:02:21	–14,91°	–70,29°	236,0	7,2	10 км от г. Асангаро (*исп.* Azángaro) Перу
EQ3	28.06.2024	05:36:37	–15,83°	–74,45°	24,0	7,2	район Атикипа (*исп.* Atiquipa), Перу
EQ4	19.07.2024	01:50:49	–23,08°	–67,84°	127,3	7,4	Сан-Педро-де-Атакама (*исп.* San Pedro de Atacama), Чили

Примечание: UTC (*англ.* Coordinated Universal Time).

В исследовании использовались трёхмерные массивы температуры из архива глобального реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, версия 2) на 12 стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 гПа с временным разрешением $\Delta t = 3$ ч. в узлах равномерной сетки 0,5×0,625°. Загрузка данных производилась в системе GES-DISC (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) (https://disc.gsfc.nasa.gov/). В каждом случае были проанализированы достаточно длительные периоды времени, превышающие 60 сут. до и после землетрясений.

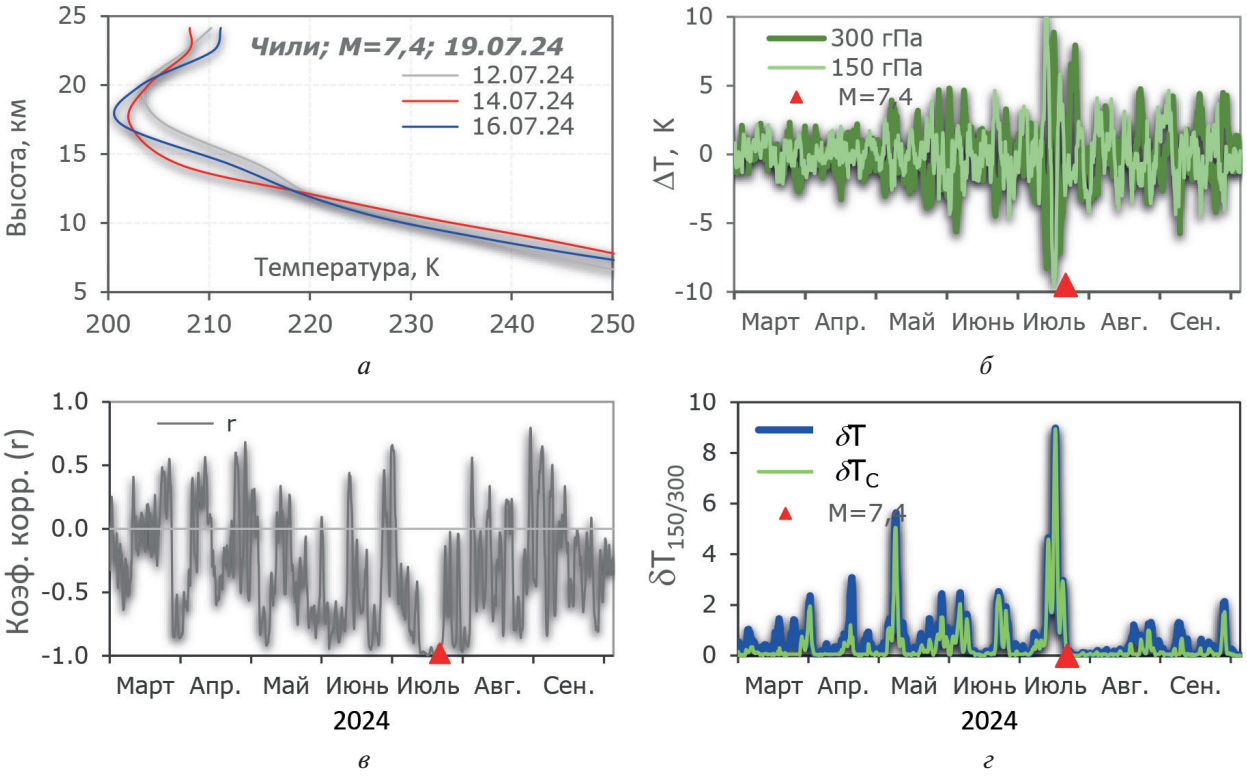


Рис. 2. Трансформация вертикальных профилей температуры (*а*), межсуточные вариации температуры ΔT на уровнях 300 и 100 гПа (*б*), коэффициент корреляции между ними (*в*) и соответствующие изменения интегральных параметров δT и δT_C (*г*) с марта по сентябрь 2024 г. Красный маркер соответствует моменту землетрясения $M = 7{,}4$ в Чили (19.07.2024)

Методика выделения возмущений, связанных с сейсмической активностью, основана на анализе пространственно-временной эволюции температуры в верхней тропосфере и области тропопаузы (*рис. 2а*). Как показала практика, использование двухуровневого подхода приводит к очевидному синергетический эффекту (Свердлик, 2021). Предполагая, что в процессе подготовки и развития сильных землетрясений происходит увеличение интенсивности

колебаний температуры, периодичность которых составляет ~4–6 сут. (Линьков и др., 1990; Свердлик, 2025), для извлечения предсейсмических возмущений из всего широкого спектра временной изменчивости температуры нами анализировались вариации в данном диапазоне периодов. Дополнительно на этапе предварительной обработки исходные временные ряды температуры преобразовывались в межсуточные вариации температуры ΔT, что обеспечило дополнительную фиксацию предсейсмической изменчивости, не подверженной воздействию более долгосрочных изменений (например, сезонных) и более короткопериодных вариаций (например, суточных) (см. *рис. 2б*) (Cattiaux et al., 2015). Высокие значения ΔT означали более интенсивные колебания температуры с большим перепадом значений в течение промежутка времени, соответствующего полупериоду предполагаемых предсейсмических колебаний (2–3 сут.).

Пространственно-временные характеристики сейсмоатмосферных возмущений определялись с помощью программы IPPLA (*англ.* Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) (Свердлик, Ибраев, 2022, 2023). Возмущения температуры в UTLS были выявлены и идентифицированы по соответствующим изменениям параметров аномальных вариаций δT и δT_C. Расчёт интегрального показателя δT_C проводился с учётом коэффициента корреляции r (см. *рис. 2в*) между изменениями температуры на рассматриваемых уровнях в соответствии со следующими условиями: $\delta T_C = 0$, если $r \geqslant 0$ и $\delta T_C = \delta T \times |r|$, если $r < 0$. То есть параметр δT_C (см. *рис. 2г*) обнулялся при положительных значениях коэффициента корреляции и корректировался в зависимости от величины r при противофазных изменениях температуры (Свердлик, 2021). Учёт корреляционной связи между вариациями температуры в верхней тропосфере и области тропопаузы позволил если не исключить, то в значительной степени ослабить проявление «ложных» (синфазных) аномалий.

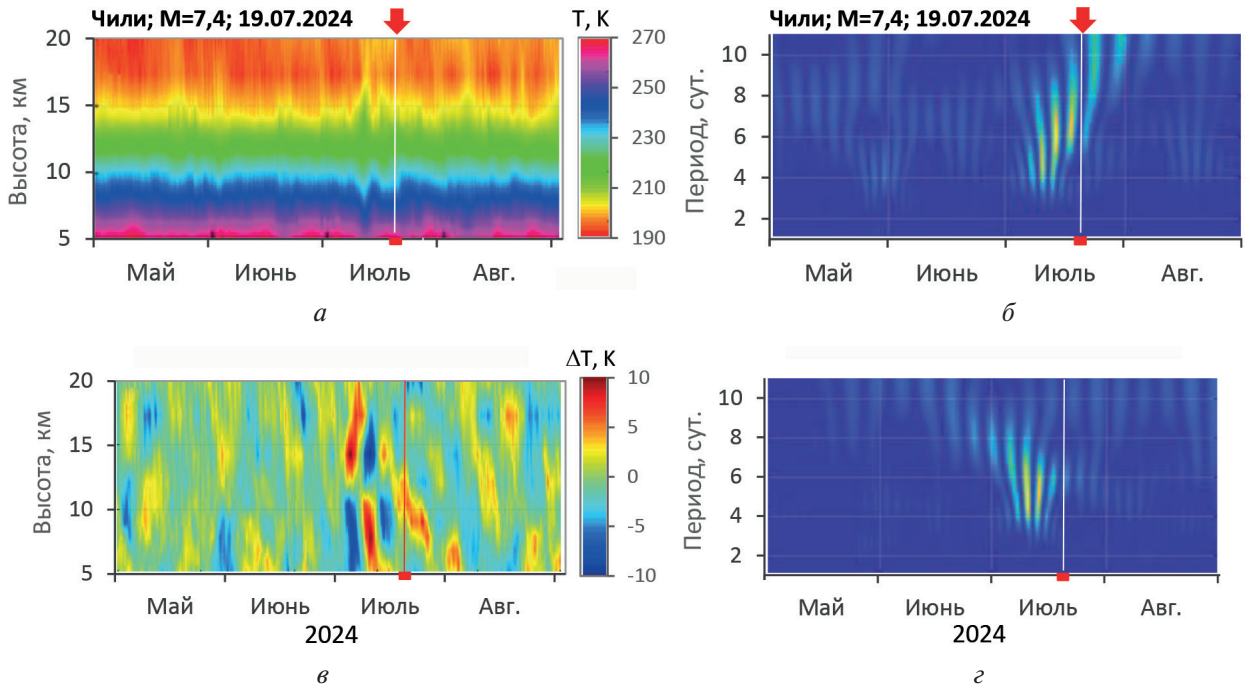


Рис. 3. Высотно-временные распределения температуры T (*а*), межсуточных вариаций температуры ΔT (*в*) и вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры на уровнях 300 гПа (*б*) и 150 гПа (*г*) в период с 1 мая по 31 августа 2024 г. Вертикальные белые линии — момент землетрясения $M = 7{,}4$ (19.07.2024)

Особенности изменения спектральных составляющих и динамики периодичностей вариаций температуры (*рис. 3а*), предшествующие сильной сейсмической активности, выявлялись с использованием непрерывного вейвлет-преобразования. В качестве примера на *рис. 3б* и *г* приведены вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры на уровнях 300 и 150 гПа

с 1 мая по 31 августа 2024 г., которые показали заметное усиление интенсивности вариаций в полосе периодов 4–6 сут. непосредственно перед сильным землетрясением с магнитудой $M = 7{,}4$ в Чили (19.07.2024). Высотно-временное распределение межсуточных вариаций ΔT также иллюстрирует характерные противофазные квазипериодические изменения пространственной структуры температуры, происходящие выше и ниже тропопаузы (см. *рис. 3в*).

Результаты выделения предсейсмических возмущений температуры в UTLS

Очевидно, что геологическая структура прилегающей к океану территории Чили и Перу гораздо более специфична, чем во внутренних материковых районах Азии, например в Китае или Центральной Азии. Ввиду особого географического положения исследуемой области можно было ожидать, что это будет сказываться на процессах формирования предсейсмических аномалий и осложнять их обнаружение (Свердлик, 2023; Liu, Yao, 2020). Однако результаты анализа спутниковых данных во всех исследуемых случаях, так же как и во внутриконтинентальных регионах (например, (Свердлик, 2022)), были в значительной степени подобны и указывали на существенные изменения температуры в UTLS в периоды сейсмической активности, как это демонстрируют приведённые выше примеры.

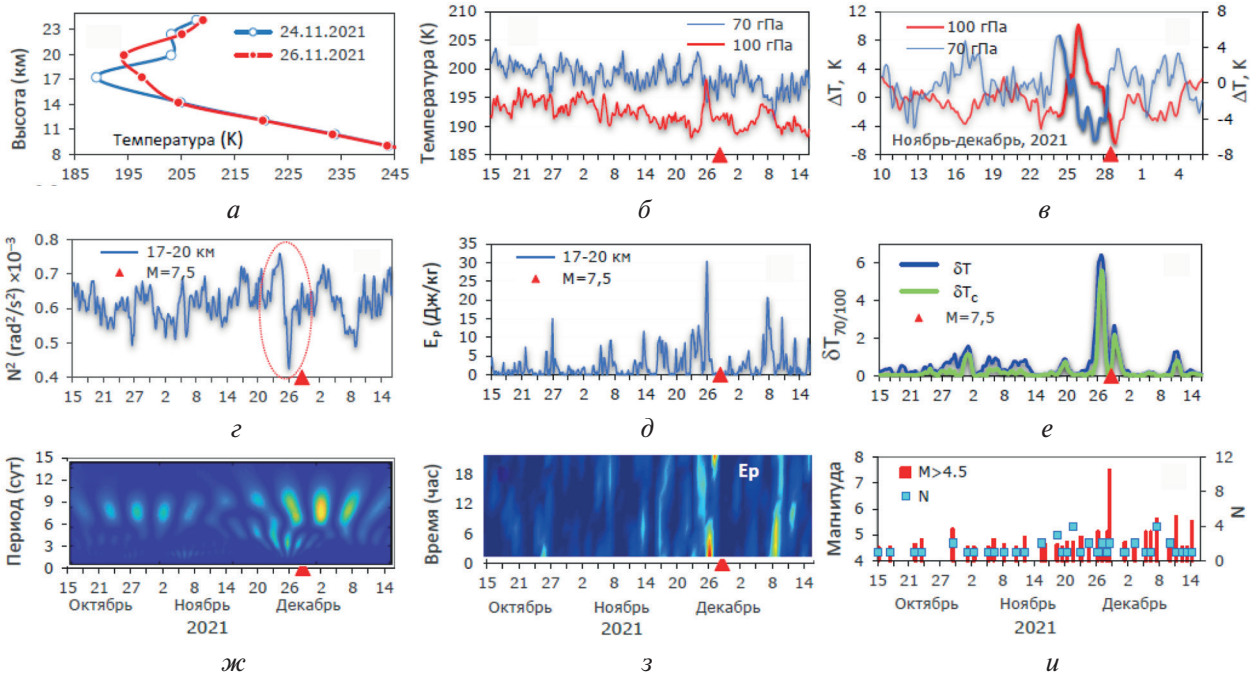


Рис. 4. Вертикальные профили температуры над эпицентром землетрясения за два и четыре дня до события (*а*), временные ряды температуры T (*б*) и приращений температуры ΔT (для 100 гПа по левой оси; для 70 гПа по правой) (*в*) на уровнях 100 и 70 гПа, квадрата частоты Брента – Вяйсяля N^2 (*г*) и плотности потенциальной энергии E_P на высоте 17–20 км (*д*), интегральных параметров δT и δT_C (*е*), вейвлет-спектрограмма временного ряда температуры на уровне 100 гПа (*ж*), вариации E_P (*з*), магнитуда M и количество землетрясений за сутки N (*и*) с 15 октября по 15 декабря 2021 г.

Прежде чем перейти к диагностированию аномалий температуры перед событием $M = 7{,}5$ в Перу (28.11.2021), важно отметить, что оно произошло достаточно близко к экватору, а, соответственно, профили температуры характеризовались типичной для экваториальных областей резкой сменой знака градиента в тропопаузе, что требовало особого подхода к выбору высот, на которых предсейсмические вариации наиболее интенсивны. В данном случае использовались уровни 100 гПа (~17 км) и 70 гПа (~20 км) (*рис. 4а–в*) (Свердлик, 2024).

Результаты совместной обработки временных рядов температуры, соответствующих этим уровням, демонстрируют, каким образом предсейсмические возмущения проявлялись в изменении различных параметров атмосферы (см. *рис. 4г–з*). Хорошо выраженный минимум в поведении квадрата частоты Брента – Вяйсяля N^2 (см. *рис. 4г*), свидетельствующий о снижении устойчивости состояния атмосферы в области тропопаузы, а также максимальные значения плотности потенциальной энергии E_P на высоте 17–20 км (см. *рис. 4д*, *з*) и интегрального параметра δT_C (см. *рис. 4е*) наблюдались за 1–2 сут. до землетрясения $M = 7{,}5$ (см. *рис. 4и*). Представленная на *рис. 4ж* вейвлет-спектрограмма подтверждает, что в изменениях температуры на исследуемых высотах, как и в ранее представленных результатах, явно просматривалась связь с сейсмичностью в интервале периодов ~4–6 сут.

Динамику процесса формирования возмущения, предшествующего землетрясению $M = 7{,}5$ в Перу (28 ноября 2021 г.), иллюстрируют карты пространственно-временного распределения интегрального параметра δT_C (*рис. 5*). Отсутствие помех, связанных с метеорологическими и геомагнитными процессами ($|Dst| < 20$ нТл) в исследуемый период, позволило надёжно выделить предсейсмическую аномалию в виде устойчивого в пространстве и времени мезомасштабного возмущения температуры, которое располагалось непосредственно над его эпицентральной областью и сохраняло свое положение на протяжении 24 ч. При этом максимум интенсивности температурного возмущения ($\delta T_C = 2{,}4$) достигал своего пика 26 ноября 2021 г., за 2 сут. до землетрясения. Существенное ослабление возмущения началось 27 ноября, и к концу дня оно полностью исчезло.

Расчёты показали, что в течение всего ноября 2021 г. на временных распределениях параметра δT_C по широте и долготе кроме выделенной предсейсмической тепловой аномалии никаких других заметных, а тем более сопоставимых по интенсивности возмущений во всей обширной исследуемой области не наблюдалось (см. *рис. 6*).

На *рис. 7* показаны карты пространственного распределения возмущений температуры для всех рассматриваемых четырёх землетрясений, которые, как хорошо видно, также коррелировали со временем и местом возникновения событий.

Обработка данных спутниковых измерений показала, что в зонах подготовки землетрясений, оцениваемых по эмпирической формуле Добровольского (Dobrovolsky et al., 1979), формировались мезомасштабные тепловые аномалии, которые характеризовались максимальными значениями параметра $\delta T_C \geqslant 2{,}0$ и наблюдались за 2–9 сут. до событий. Это может служить подтверждением, что выделенные возмущения температуры в UTLS связаны с процессами подготовки сильных землетрясений в регионе.

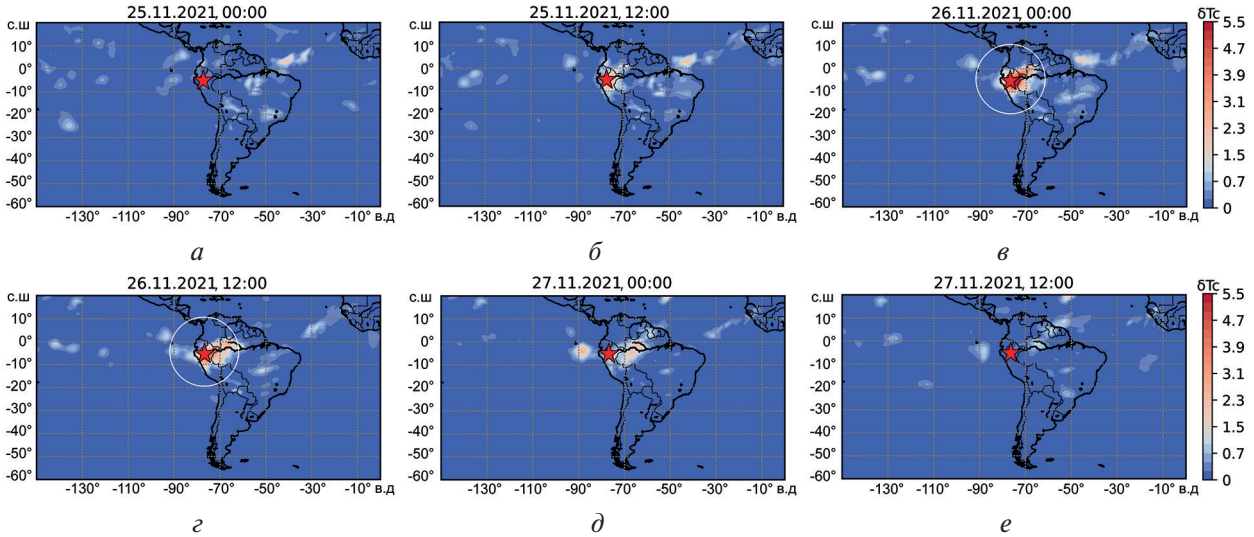
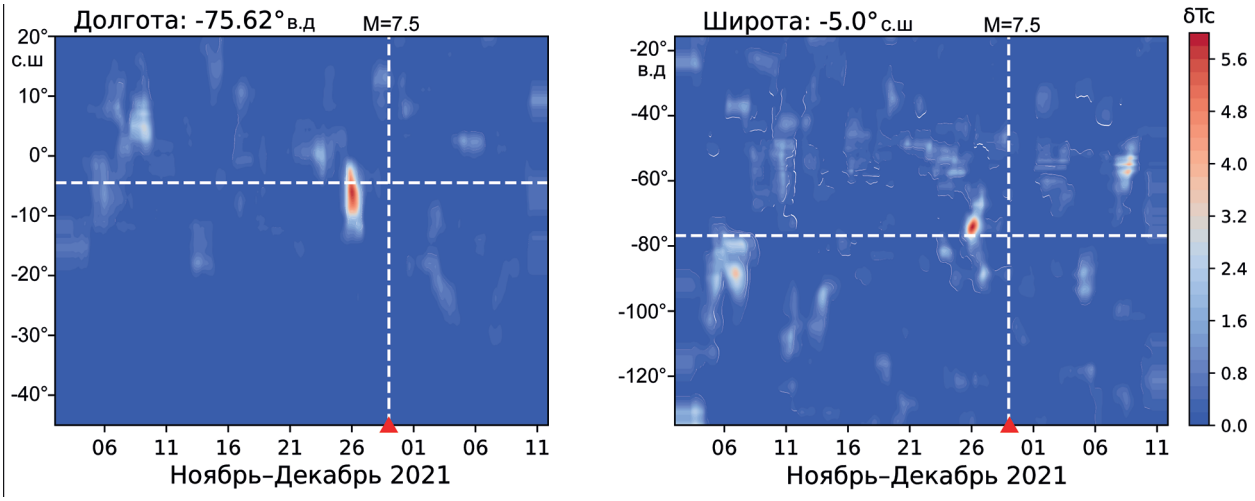
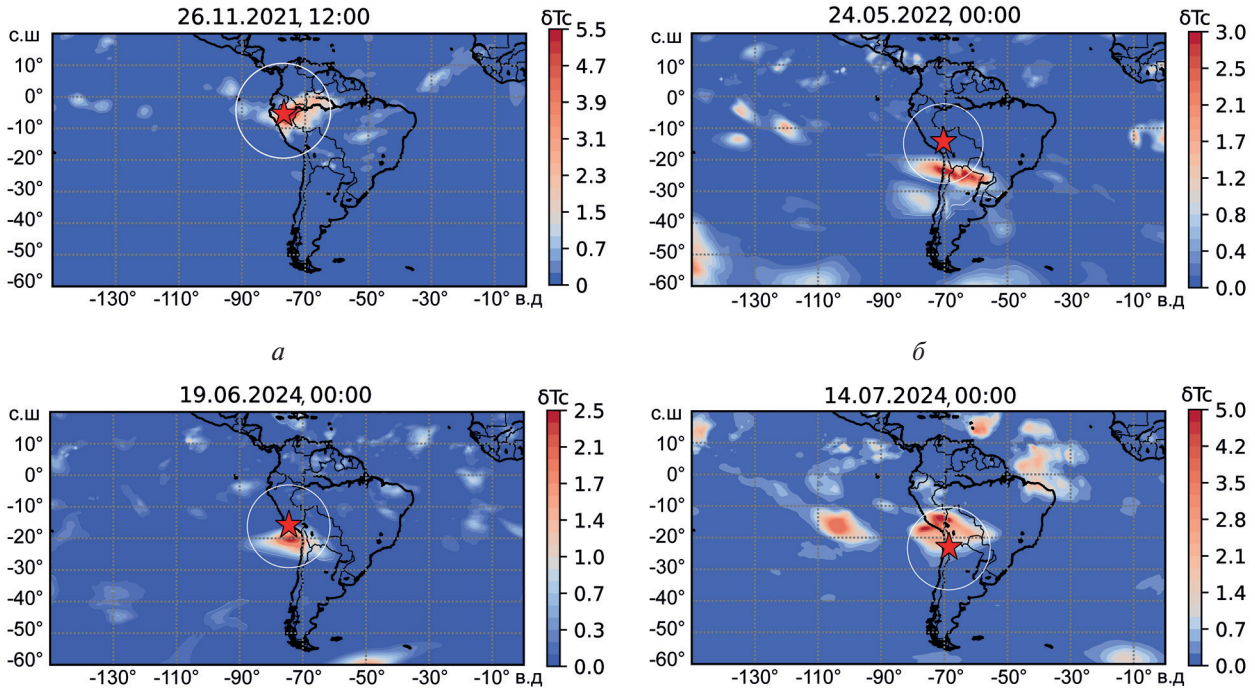


Рис. 5. Эволюция пространственного распределения параметра δT_C в период с 25 по 27 ноября 2021 г. (*а–е*). Маркером показан эпицентр землетрясения $M = 7{,}5$ (28.11.2021, 10:52:14 UTC; –4,47° с. ш.; –76,81° в. д.) в Перу. Белым кругом обозначена область подготовки землетрясения (Dobrovolsky et al., 1979)



а *б*

Рис. 6. Временные распределения параметра δT_C по широте (*а*) и долготе (*б*) в период с 1 ноября по 10 декабря 2021 г. Горизонтальные линии соответствуют координатам эпицентра, а вертикальные — времени землетрясения $M = 7{,}5$ (28.11.2021, 10:52:14 UTC)



а *б*

г *д*

Рис. 7. Карты распределения предсейсмических возмущений температуры в UTLS. Маркерами показаны эпицентры соответствующих землетрясений (EQ1–EQ4): $M = 7{,}5$ (28.11.2021) (*а*); $M = 7{,}2$ (26.05.2022) (*б*); $M = 7{,}2$ (28.06.2024) в Перу (*в*); $M = 7{,}4$ (19.07.2024) в Чили (*г*)

Как вариант дополнительной визуализации пространственно-временной динамики возмущений температуры и демонстрации в более компактном виде процесса их эволюции могут быть использованы карты распределения параметра δT_C, усреднённые за определённые временные интервалы (от 2 до 5 сут.) и совмещённые с траекториями максимумов δT_C, которые были рассчитаны для каждого момента времени в пределах области подготовки землетрясений. Карты траекторий, построенные для всех событий (*рис. 8*), наглядно показывают такие детали, как временные рамки, в которых происходили возмущения, изменения интенсивно-

сти и местоположения максимумов параметра δT_C, что может быть полезно как для визуального анализа, так и для сопоставления результатов.

Представленные рисунки свидетельствуют, что предсейсмические аномалии не только существовали достаточно продолжительное время (более 24 ч.) над зонами подготовки землетрясений, но также явно наблюдался эффект замедления смещения возмущённых областей в моменты времени, когда они были наименее удалены от эпицентров.

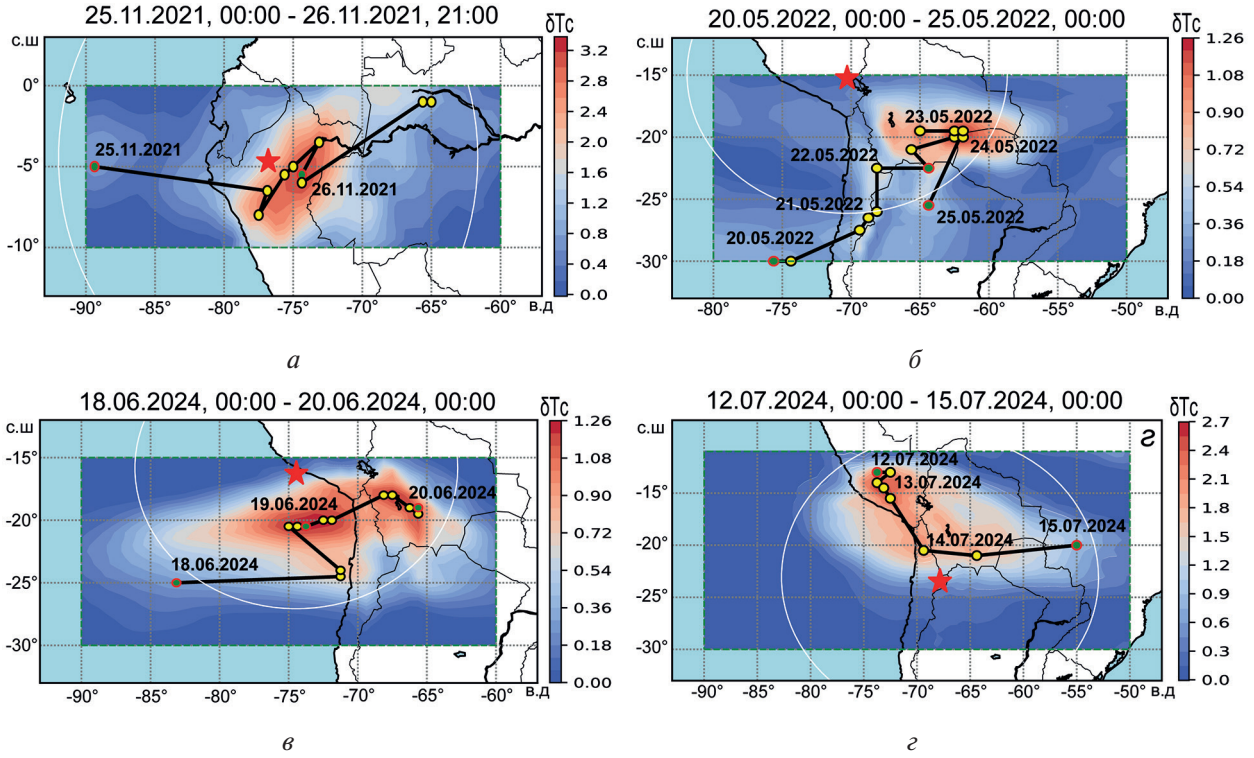


Рис. 8. Карты пространственного распределения параметра δT_C, усреднённые за периоды 25–26 ноября 2021 г. (*а*), с 20 по 25 мая 2022 г. (*б*), с 18 по 20 июня 2024 г. (*в*), 12–15 июля 2024 г. (*г*). Чёрными линиями показаны траектории максимумов δT_C в указанные моменты времени (даты). Белыми кругами обозначены области подготовки землетрясений EQ1–EQ4

Результаты проведённых исследований показали, что выявленные возмущения температуры не только отражали влияние сейсмической активности, но и предполагали вероятную решающую роль атмосферных гравитационных волн в качестве механизма литосферно-атмосферной связи (Chen et al., 2024). Распространение этих волн приводило к значительным согласованным изменениям температуры в верхней тропосфере и области тропопаузы (например, см. *рис. 2в* и *3в*) и может быть откликом атмосферы на процессы подготовки сильных землетрясений, а соответственно, краткосрочным признаком приближающегося землетрясения (см. *рис. 2г*). Это подтверждается ранее полученными результатами (например, (Свердлик, 2025; Endeshaw, 2024)), а также численным моделированием динамики атмосферных гравитационных волн сейсмического происхождения (Kherani et al., 2021), показавшим формирование возмущений, которые были наиболее интенсивны в области резких градиентов температуры, сохранялись в течение достаточно продолжительного времени и были соизмеримы с возмущениями, вызванными экстремальными погодными условиями.

Поскольку в качестве наиболее вероятного фактора, который приводил к нарушению термического состояния в слоях нижней атмосферы, рассматривались волновые процессы, были проведены расчёты плотности потенциальной энергии E_P, связанной с гравитационными волнами (Dzambo et al., 2019; Kundu et al., 2022; Nanda et al., 2025; Schmidt et al., 2008). Вычисления, основанные на использовании температурных профилей, позволили

определить диапазоны высот, на которых наблюдались наиболее заметные предсейсмические возмущения. Результаты расчётов показали, что за 1–9 сут. до исследуемых землетрясений вблизи эпицентров наблюдались области, характеризующиеся высокими значениями E_P, достигающими 35–85 Дж/кг (*рис. 9*), которые примерно соответствовали расположению выделенных тепловых возмущений и совпадали с ними по времени (см. *рис. 7*). Таким образом, повышенная активность атмосферных волн, которая наблюдалась вблизи эпицентров на высотах 10–17 км, являлась, вероятно, результатом взаимодействия литосферы и атмосферы и была связана с процессами подготовки землетрясений.

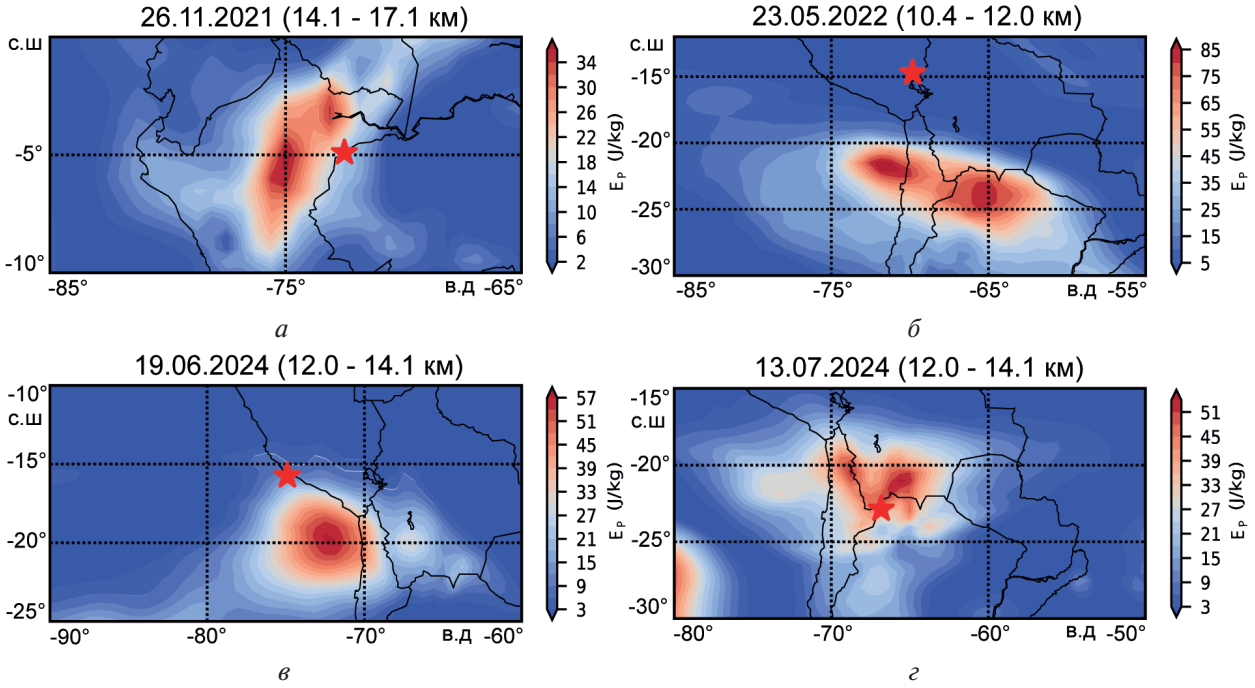


Рис. 9. Пространственные распределения плотности потенциальной энергии гравитационных волн E_P (в Дж/кг) перед землетрясениями EQ1–EQ4, эпицентры которых показаны маркерами

Заключение

Исследования возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере впервые проведены в сейсмически опасном регионе Южной Америки (на территории Перу и Чили), обладающем высоким потенциалом возникновения разрушительных землетрясений. Использование разработанного алгоритма IPPLA позволило выявить тепловые возмущения в нижней атмосфере и проследить их динамику. Результаты исследования подтвердили практически все выявленные ранее признаки и особенности предсейсмических тепловых аномалий в UTLS. Было установлено, что пространственно-временная эволюция мезомасштабных возмущений температуры достаточно хорошо согласуется с динамикой сейсмической активности. Устойчивые в пространстве и времени мезомасштабные возмущения температуры отчётливо наблюдались за 1–9 сут. до событий.

Пространственные и временные характеристики тепловых аномалий во время рассматриваемых землетрясений (по горизонтальным размерам, интенсивности и продолжительности) согласуются с результатами, связанными с событиями аналогичной магнитуды в сейсмически активных регионах Евразии. Однако в отличие от землетрясений в Центральной Азии в данном случае не прослеживалось связи между глубинами гипоцентров и размерами тепловых аномалий.

Также из проведённого исследования следует, что в периоды подготовки сейсмических событий в изменениях температуры наблюдались чётко выраженные 4–6-суточные периодич-

ности. Поскольку вероятность обнаружения возмущений температуры зависит от магнитуды землетрясений, для событий с магнитудой $M \geqslant 7{,}0$ возмущения выделяются достаточно уверенно. В качестве предполагаемого механизма рассматривались атмосферные гравитационные волны. Установлено, что перед землетрясениями усиление потенциальной энергии гравитационных волн E_P происходило в диапазоне высот 10–17 км.

Полученные в настоящем исследовании результаты можно рассматривать в качестве предварительных, поскольку на настоящий момент проанализировано ограниченное число сейсмических событий в Южной Америке. Тем не менее положительные результаты исследования служат подтверждением того, что используемый алгоритм разработан не под конкретные условия мониторинга, а может быть применён глобально как при анализе вариаций температуры в сейсмоактивных регионах Евразии, так и в зоне субдукции в Южной Америке.

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), Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (*англ*. National Aeronautics and Space Administration — NASA) и Геологической службы США (USGS) за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке (тема № 1025032800066-3-1.5.1 «Комплексное исследование геофизических полей и неупругих процессов в сейсмоактивных зонах литосферы Северного Тянь-Шаня для мониторинга и прогноза сейсмической активности»). В исследовании также принимали участие сотрудники Высокогорной обсерватории физики атмосферных процессов Кыргызско-российского славянского университета (КРСУ) и Научной станции РАН в рамках проекта по программе развития КРСУ.

Литература

1. *Линьков Е. М.*, *Петрова Л. Н.*, *Осипов К. Ц.* Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 5. С. 1095–1098.
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.* Сейсмоатмосферные эффекты в изменениях метеопараметров нижней атмосферы по данным спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 122–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130.
6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *Шерман С. И.*, *Злогодухова О. Г.* Сейсмические пояса и зоны Земли: формализация понятий, положение в литосфере и структурный контроль // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 1. С. 1–34. DOI: 10.5800/GT-2011-2-1-0031.

10. *Arango M. C.*, *Strasser F. O.*, *Bommer J. J. et al.* A strong-motion database from the Peru–Chile subduction zone // J. Seismology. 2011. V. 15. Iss. 1. P. 19–41. DOI: 10.1007/s10950-010-9203-x.
11. *Bilek S. L.*, *Lay T.* Subduction zone megathrust earthquakes // Geosphere. 2018. V. 14. No. 4. P. 1468–1500. DOI: 10.1130/GES01608.1.
12. *Casarotti E.*, *Piersanti A.* Postseismic stress diffusion in Chile and South Peru // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 206. P. 325–333. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)01103-2.
13. *Cattiaux J.*, *Douville H.*, *Schoetter R. et al.* Projected increase in diurnal and interdiurnal variations of European summer temperatures // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 899–907. DOI: 10.1002/2014GL062531.
14. *Chen J.*, *Xiong P.*, *Wu H. et al.* Pre-seismic anomalies and co-seismic disturbance induced by the 2024 Mw 7.1 Wushi earthquake: multi-GNSS observations and modeling // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2024. V. 15. No. 1. Article 2422024. DOI: 10.1080/19475705.2024.2422024.
15. *Cordaro E. G.*, *Venegas-Aravena P.*, *Laroze D.* Long-term magnetic anomalies and their possible relationship to the latest greater Chilean earthquakes in the context of the seismo-electromagnetic theory // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2021. V. 21. P. 1785–1806. DOI: 10.5194/nhess-21-1785-2021.
16. *Das R.*, *Gonzalez G.*, *de la Llera J. C. et al.* A probabilistic seismic hazard assessment of southern Peru and Northern Chile // Engineering Geology. 2020. V. 271. Article 105585. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105585.
17. *DeMets C.*, *Gordon R. G.*, *Argus D. F.* Geologically current plate motions // Geophysical J. Intern. 2010. V. 181. Iss. 1. P. 1–80. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x.
18. *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. DOI: 10.1007/BF00876083.
19. *Dong Y.*, *Gao C.*, *Long F.*, *Yan Y.* Suspected seismo-ionospheric anomalies before three major earthquakes detected by GIMs and GPS TEC of permanent stations // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 1. Article 20. DOI: 10.3390/rs14010020.
20. *Dzambo A. M.*, *Hitchman M. H.*, *Chang K.-W.* The influence of gravity waves on ice saturation in the tropical tropopause layer over Darwin, Australia // Atmosphere. 2019. V. 10. Iss. 12. Article 778. DOI: 10.3390/atmos10120778.
21. *Endeshaw L.* Investigation of atmospheric anomalies due to the great Tohoku earthquake disturbance using NRLMSISE-00 atmospheric model measurement // Pure and Applied Geophysics. 2024. V. 181. P. 1455–1478. DOI: 10.1007/s00024-024-03476-2.
22. *Hagen M.*, *Azevedo A.* South Atlantic anomaly variations during seasons // Natural Science. 2023. V. 15. No. 7. P. 207–221. DOI: 10.4236/ns.2023.157016.
23. *He L.*, *Heki K.* Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. Iss. 14. P. 7287–7293. DOI: 10.1002/2016GL069863.
24. *He L.*, *Heki K.* Ionospheric anomalies immediately before M_w7.0–8.0 earthquakes // J. Geophysical Research: Space Physics. 2017. V. 122. P. 8659–8678. DOI: 10.1002/2017JA024012.
25. *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.
26. *Koravos G.*, *Vougiouka G.*, *Tsapanos T. M. et al.* Earthquake hazard along the western coast of South America inferred from conditional probabilities // Bull. Geological Soc. of Greece. 2016. V. 50. P. 1184–1193. DOI: 10.12681/bgsg.11824.
27. *Kundu S.*, *Bagiya M. S.* Investigation of co-seismic ionospheric perturbations generated by shallow earthquakes in the Chile subduction zone // J. Geophysical Research: Space Physics. 2024. V. 129. Article e2024JA032676. DOI: 10.1029/2024JA032676.
28. *Kundu S.*, *Chowdhury S.*, *Ghosh S. et al.* Seismogenic anomalies in atmospheric gravity waves as observed from SABER/TIMED satellite during large earthquakes // Hindawi J. Sensors. 2022. Article 3201104. 23 p. DOI: 10.1155/2022/3201104.
29. *Liu W.*, *Yao H.* Rupture process of the 26 May 2019 M_w 8.0 northern Peru intermediate-depth earthquake and insights into its mechanism // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Article e2020GL087167. DOI: 10.1029/2020GL087167.
30. *Lovery B.*, *Chlieh M.*, *Norabuena E. et al.* Heterogeneous locking and earthquake potential on the South Peru megathrust from dense GNSS network // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2024. V. 129. Article e2023JB027114. DOI: 10.1029/2023JB027114.
31. *Nanda K.*, *Sasmal S.*, *Hazra R. et al.* Study on the distribution of Gravity Wave (GW) activity in six Bay of Bengal tropical cyclones // Atmosphere. 2025. V. 16. Iss. 2. Article 235. DOI: 10.3390/ atmos16020235.
32. *Schmidt T.*, *de la Torre A.*, *Wickert J.* Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Iss. 16. Article L16807. DOI: 10.1029/2008GL034986.

Space-temporal analysis of atmospheric perturbations preceding strong earthquakes in the Peru–Chile subduction zone

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

Distinguishing of short-time atmospheric effects preceding strong earthquakes in subduction zones is a crucial task of seismic hazard reduction. The continuous monitoring of atmospheric parameters required to identify pre-seismic anomalies sources remote sensing information contained in the MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2) reanalysis archive. Within the framework of the research, with the use of the *ad hoc* algorithm IPPLA (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) atmospheric temperature variations have been analyzed and perturbations aligned with processes in the lithosphere have been distinguished. The unique feature of the algorithm is the use of two high altitude ranges in the upper troposphere and the lower stratosphere that are determined on the basis of choice of the most correlated antiphase changes with relatively high intensity of temperature variations. In the present work, atmospheric effects preceding earthquakes of $M > 7{,}0$ occurred in 2021–2024 in the Southern Hemisphere, in the south of Peru and in the north of Chile, were considered. Results of thermometry data processing showed a well-pronounced spatial pattern of thermal anomalies in earthquake preparation zones. Mesoscale temperature anomalies characterized by maximum values of the anomalous variations parameter $\delta T_C \geqslant 2{,}0$ were observed several days before the events. Perturbated temperature areas were situated near earthquake focuses and showed negligible spatial variations while preserving their forms, dimensions and positions over the period of more than 12 hours. As wave processes were considered to be the most probable factor resulting in irregularities of the thermal state in the lower atmosphere potential energy density of gravitational waves was calculated. Overactivity of atmospheric waves probably associated with earthquake preparation was observed near epicenters at heights of 12–17 km. This study may serve as confirmation that the algorithm used was developed not for specific monitoring conditions, but can be applied globally, including analysis of temperature variations both in the seismically active regions of Eurasia and in the subduction zone of South America.

Keywords: satellite measurements, temperature, earthquake, upper troposphere, lower stratosphere, STA/LTA criterion, integral parameter, anomaly, atmospheric gravity wave, potential energy

Accepted: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-244-257

References

1. Lin'kov E. M., Petrova L. N., Osipov K. Ts., Seismogravitational pulsations of the Earth and atmospheric disturbances as possible precursors of strong earthquakes, *Doklady AN SSSR*, 1990, V. 313, No. 5, pp. 1095–1098 (in Russian).
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., Seismic-atmospheric effects in changes in meteorological parameters of the lower atmosphere, according to satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 122–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130.
6. 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.

7. 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.
8. 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).
9. Sherman S. I., Zlogodukhova O. G., Seismic belts and zones of the Earth: Formalization of notions, positions in the lithosphere, and structural control, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2011, V. 2, No. 1, pp. 1–34 (in Russian), DOI: 10.5800/GT-2011-2-1-0031.
10. Arango M. C., Strasser F. O., Bommer J. J. et al., A strong-motion database from the Peru–Chile subduction zone, *J. Seismology*, 2011, V. 15, Iss. 1, pp. 19–41, DOI: 10.1007/s10950-010-9203-x.
11. Bilek S. L., Lay T., Subduction zone megathrust earthquakes, *Geosphere*, 2018, V. 14, No. 4, pp. 1468–1500, DOI: 10.1130/GES01608.1.
12. Casarotti E., Piersanti A., Postseismic stress diffusion in Chile and South Peru, *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, V. 206, pp. 325–333, DOI: 10.1016/S0012-821X(02)01103-2.
13. Cattiaux J., Douville H., Schoetter R. et al., Projected increase in diurnal and interdiurnal variations of European summer temperatures, *Geophysical Research Letters*, 2015, V. 42, pp. 899–907, DOI: 10.1002/2014GL062531.
14. Chen J., Xiong P., Wu H. et al., Pre-seismic anomalies and co-seismic disturbance induced by the 2024 Mw 7.1 Wushi earthquake: multi-GNSS observations and modeling, *Geomatics*, *Natural Hazards and Risk*, 2024, V. 15, No. 1, Article 2422024, DOI: 10.1080/19475705.2024.2422024.
15. Cordaro E. G., Venegas-Aravena P., Laroze D., Long-term magnetic anomalies and their possible relationship to the latest greater Chilean earthquakes in the context of the seismo-electromagnetic theory, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, V. 21, pp. 1785–1806, DOI: 10.5194/nhess-21-1785-2021.
16. Das R., Gonzalez G., de la Llera J. C. et al., A probabilistic seismic hazard assessment of southern Peru and Northern Chile, *Engineering Geology*, 2020, V. 271, Article 105585, DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105585.
17. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Geologically current plate motions, *Geophysical J. Intern.*, 2010, V. 181, Iss. 1, pp. 1–80, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x.
18. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Applied Geophysics*, 1979, V. 117, pp. 1025–1044, DOI: 10.1007/BF00876083.
19. Dong Y., Gao C., Long F., Yan Y., Suspected seismo-ionospheric anomalies before three major earthquakes detected by GIMs and GPS TEC of permanent stations, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 1, Article 20, DOI: 10.3390/rs14010020.
20. Dzambo A. M., Hitchman M. H., Chang K.-W., The influence of gravity waves on ice saturation in the tropical tropopause layer over Darwin, Australia, *Atmosphere*, 2019, V. 10, Iss. 12, Article 778, DOI: 10.3390/atmos10120778.
21. Endeshaw L., Investigation of atmospheric anomalies due to the great Tohoku earthquake disturbance using NRLMSISE-00 atmospheric model measurement, *Pure and Applied Geophysics*, 2024, V. 181, pp. 1455–1478, DOI: 10.1007/s00024-024-03476-2.
22. Hagen M., Azevedo A., South Atlantic anomaly variations during seasons, *Natural Science*, 2023, V. 15, No. 7, pp. 207–221, DOI: 10.4236/ns.2023.157016.
23. He L., Heki K., Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophysical Research Letters*, 2016, V. 43, Iss. 14, pp. 7287–7293, DOI: 10.1002/2016GL069863.
24. He L., Heki K., Ionospheric anomalies immediately before M_w7.0–8.0 earthquakes, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2017, V. 122, pp. 8659–8678, DOI: 10.1002/2017JA024012.
25. 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.
26. Koravos G., Vougiouka G., Tsapanos T. M. et al., Earthquake hazard along the western coast of South America inferred from conditional probabilities, *Bull. Geological Soc. of Greece*, 2016, V. 50, pp. 1184–1193, DOI: 10.12681/bgsg.11824.
27. Kundu S., Bagiya M.S., Investigation of co-seismic ionospheric perturbations generated by shallow earthquakes in the Chile subduction zone, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2024, V. 129, Article e2024JA032676, DOI: 10.1029/2024JA032676.
28. Kundu S., Chowdhury S., Ghosh S. et al., Seismogenic anomalies in atmospheric gravity waves as observed from SABER/TIMED satellite during large earthquakes, *Hindawi J. Sensors*, 2022, Article 3201104, 23 p., DOI: 10.1155/2022/3201104.
29. Liu W., Yao H., Rupture process of the 26 May 2019 M_w 8.0 northern Peru intermediate-depth earthquake and insights into its mechanism, *Geophysical Research Letters*, 2020, V. 47, Article e2020GL087167, DOI: 10.1029/2020GL087167.

30. Lovery B., Chlieh M., Norabuena E. et al., Heterogeneous locking and earthquake potential on the South Peru megathrust from dense GNSS network, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, V. 129, Article e2023JB027114, DOI: 10.1029/2023JB027114.
31. Nanda K., Sasmal S., Hazra R. et al., Study on the distribution of Gravity Wave (GW) activity in six Bay of Bengal tropical cyclones, *Atmosphere*, 2025, V. 16, Iss. 2, Article 235, DOI: 10.3390/ atmos16020235.
32. Schmidt T., de la Torre A., Wickert J., Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data, *Geophysical Research Letters*, 2008, V. 35, Iss. 16, Article L16807, DOI: 10.1029/2008GL034986.