

Предсейсмические возмущения метеопараметров в нижней атмосфере по данным спутниковых измерений

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 новые результаты исследования возмущений в вариациях температуры и скорости ветра в периоды сильной сейсмической активности на территории Евразии. Анализ был сосредоточен на наиболее крупных землетрясениях последних двух лет с магнитудой $M \geq 7,0$, произошедших в Турции (6 февраля 2023 г.), Китае (22 января 2024 г.), Японии (1 января 2024 г.) и на Тайване (2 апреля 2024 г.). Для исследования предсейсмических эффектов были использованы данные архива глобального реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2). В соответствии с выбранным алгоритмом обработки спутниковых данных в качестве показателя атмосферной возмущённости применялся интегральный параметр аномальных вариаций, вычисленный как произведение отношений скользящих дисперсий временных рядов температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В результате анализа выявлены предсейсмические мезомасштабные аномалии температуры, которые были локализованы вблизи эпицентральных областей и могли быть вызваны процессами, происходящими в литосфере в периоды подготовки землетрясений. Максимум интенсивности атмосферных возмущений наблюдался за 1–7 сут до рассматриваемых событий, что можно интерпретировать как проявление атмосферных гравитационных волн. В изменениях ветрового режима также выявлены предсейсмические эффекты. Анализ годографов вариаций скорости ветра в исследуемом интервале высот (~5–25 км) подтвердил, что предсейсмические периоды характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх. Сочетание двух наборов спутниковых данных позволило получить более подробную информацию об атмосферных эффектах крупных землетрясений.

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

Одобрена к печати: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-68

Введение

Динамика состояния нижней атмосферы представляет значительный интерес с точки зрения подверженности воздействию различных катастрофических природных явлений (Freund et al., 2022), в частности, протекающих в литосфере в периоды сейсмической активности (Свердлик, 2022, 2023). Исследования атмосферных эффектов землетрясений получили в последнее десятилетие развитие на базе данных дистанционного зондирования и в различных аспектах широко представлены публикациями в научной литературе (например, (Biswas et al., 2023; Panchal et al., 2022)). Спутниковые методы наблюдения в сейсмогенных зонах позволили выявить аномальные изменения в разных геофизических полях (например, (Jiao, Shan, 2022; Mehdi et al., 2021)), таких как интенсивность осадков, тепловое излучение, температура воздуха, скрытый тепловой поток и уходящее длинноволновое излучение (Freund et al., 2022). Однако исследования аномалий, связанных с землетрясениями, сосредоточены, как правило, на анализе временных вариаций и двумерном пространственном распределении одного или нескольких параметров атмосферы (Xu et al., 2021). Систематических наблюдений за эволюцией вертикальной структуры предсейсмических аномалий пока явно недостаточно. Изучение пространственно-временных вариаций атмосферных аномалий на нескольких изобарических уровнях (Ma et al., 2018; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021) и учёт связи между раз-

личными параметрами (Xu et al., 2021) может способствовать более эффективному выделению предсейсмических возмущений и пониманию механизма их формирования.

В настоящей статье проанализированы вариации метеопараметров в верхней тропосфере и нижней стратосфере (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere — UTLS) с целью выделения возмущений, которые могут быть связаны с землетрясениями магнитудой $M \geq 7,0$, произошедшими в регионах Евразии в 2023–2024 гг., что важно для подтверждения ранее выявленных предсейсмических атмосферных эффектов и проверки эффективности применяемых алгоритмов обработки данных спутникового дистанционного зондирования.

Данные измерений и алгоритм выделения предсейсмических возмущений

Для установления общих закономерностей проявления сейсмоатмосферных эффектов ранее были проанализированы события, произошедшие в основных сейсмически активных регионах Европы и Азии (Свердлик, 2021, 2022). Для настоящего исследования выбраны самые крупные землетрясения с магнитудой $M \geq 7,0$, произошедшие в 2023–2024 гг. Это события в Турции ($M = 7,8$ и $M = 7,5$; 6 февраля 2023 г.), Китае ($M = 7,0$; 22 января 2024 г.), Японии ($M = 7,5$; 1 января 2024 г.) и на Тайване ($M = 7,4$; 2 апреля 2024 г.), эпицентры которых показаны красными маркерами на *рис. 1*. Источником сейсмических данных послужил глобальный каталог землетрясений Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/>).

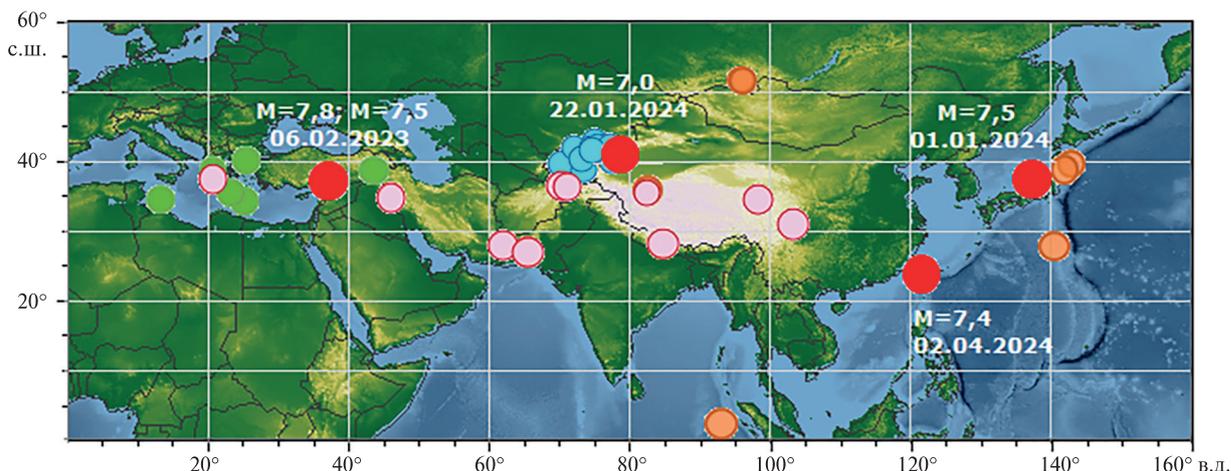


Рис. 1. Пространственное распределение эпицентров ранее исследованных событий ($M > 6,0$), включая отмеченные красными маркерами землетрясения 2023–2024 гг. ($M \geq 7,0$)

В исследовании использовались трёхмерные массивы температуры и горизонтальной скорости ветра из архива глобального реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) на 16 стандартных изобарических уровнях от 700 до 40 гПа с временным разрешением $\Delta t = 3$ ч в узлах равномерной сетки $0,5 \times 0,625^\circ$. Загрузка данных производилась в системе GES-DISC (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>). Пространственные характеристики возмущений определялись с помощью программного приложения IPPLA (*англ.* Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) (Свердлик, Ибраев, 2022, 2023).

Известно, что выделение возмущений, связанных с сейсмичностью, представляется очень сложной задачей вследствие чувствительности атмосферы к воздействию различных возмущающих факторов и активности волновых процессов. Для этих целей применяются различные методы (например, (Tramutoli et al., 2015)). В настоящем исследовании использовался алгоритм, основанный на анализе отношения скользящих дисперсий VAR

(англ. Variance) в коротком STA (англ. Short Time Averaging) и длинном LTA (англ. Long Time Averaging) временных окнах: $R = \text{VAR}_{\text{STA}}/\text{VAR}_{\text{LTA}}$ (Свєрдлик, 2021). Выделение аномалий температуры проводилось по набору признаков, которые, как предполагается, характерны для предсейсмических возмущений и более явно выражены на определённых высотах в диапазоне 4–6 сут (Свєрдлик, 2023, 2024). В процессе обработки для диагностирования аномалий проводился анализ двух отдельных временных рядов, описывающих динамику температуры (T) или межсуточных приращений температуры (ΔT) в UTLS (рис. 2), которые в случаях среднеширотных континентальных землетрясений, как правило, соответствовали областям отчётливых изменений вертикального градиента T (см. рис. 2а, б), приращений температуры (см. рис. 2д, е) и частоты Бранта – Вайсала на высотах 7–9 км (300–400 гПа) и 17–18 км (100 гПа) (Gavrilov, Fukao, 2004). Эти высоты соответствуют двум выраженным максимумам на частотном распределении давления тропопаузы, характерным для внетропических областей и тропиков (Hoinka, 1998).

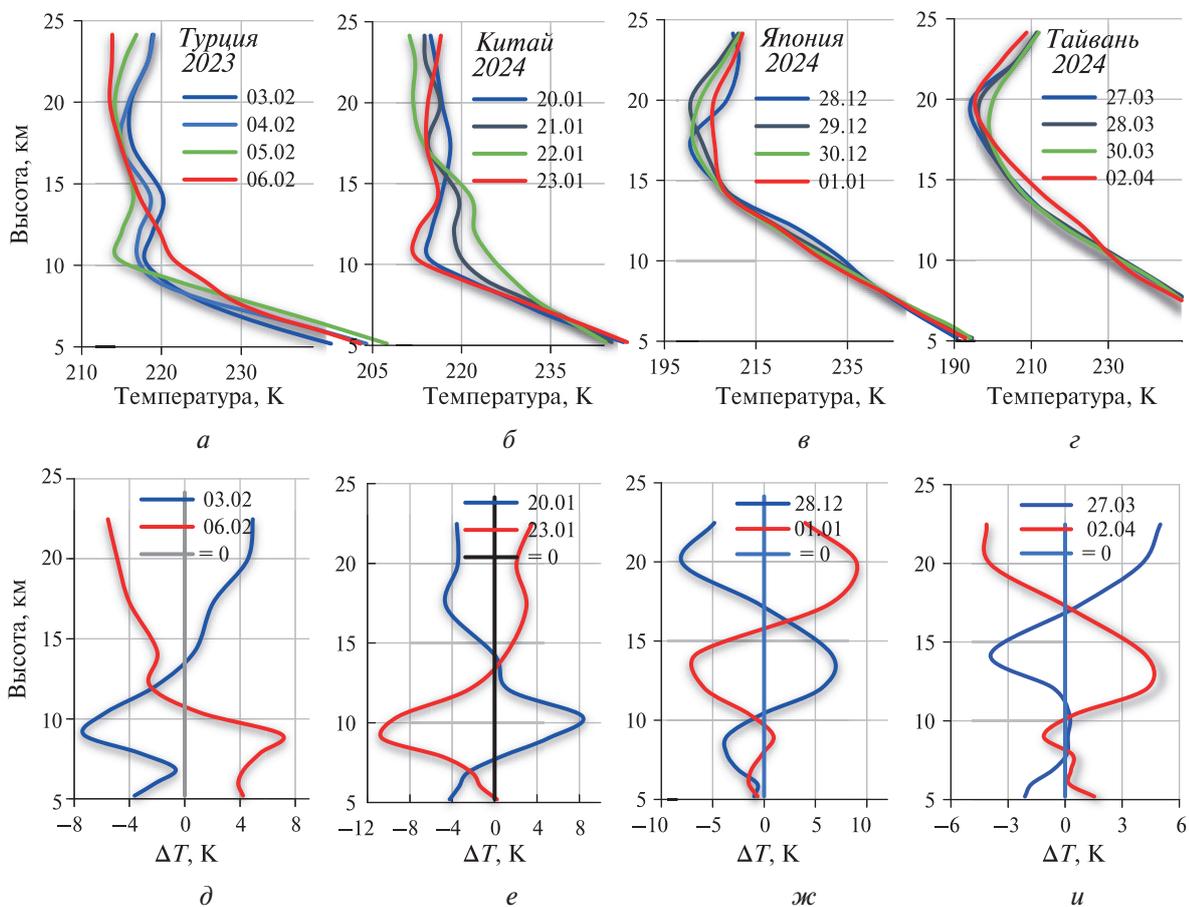


Рис. 2. Вертикальные профили температуры T и соответствующих им приращений температуры ΔT в предсейсмические периоды над эпицентрными областями землетрясений $M \geq 7,0$ в Турции (а, д), Китае (б, е), Японии (в, ж) и на Тайване (г, и). Профили T и ΔT , соответствующие дням событий $M \geq 7,0$, выделены красным цветом

В Японии и на Тайване профили температуры существенно отличались более контрастной границей между тропосферой и стратосферой с резкой сменой знака градиента (см. рис. 2в, г), что требовало особого подхода к выбору высот, на которых предшествующие сильным землетрясениям противофазные вариации наиболее интенсивны. В этих регионах в соответствии с особенностями динамики высотного распределения межсуточных приращений температуры ΔT (см. рис. 2ж, и) использовались уровни 12–14 км (200–150 гПа) в верхней тропосфере и высоты ~20–22 км (70–50 гПа) в нижней стратосфере.

Выходными параметрами алгоритма, по изменениям которых оценивалась интенсивность возмущений, являлись интегральный параметр аномальных вариаций δT , равный произведению двух отношений скользящих дисперсий (R), рассчитанных для временных рядов температуры в верхней тропосфере (P_{UT}) и нижней стратосфере (P_{LS}), и его скорректированное на коэффициент корреляции (r) значение δT_C (Свердлик, 2021). Вычисления производились для каждого момента времени (t_i):

$$\delta T_C(t_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } r(t_i)_{STA} \geq 0, \\ R(t_i, P_{UT})R(t_i, P_{LS})|r(t_i)_{STA}|, & \text{если } r(t_i)_{STA} < 0, \end{cases} = \begin{cases} 0, & \text{если } r(t_i)_{STA} \geq 0, \\ \delta T(t_i) \times |r(t_i)_{STA}|, & \text{если } r(t_i)_{STA} < 0. \end{cases}$$

Результаты выделения предсейсмических возмущений метеопараметров в UTLS

Землетрясения на юго-востоке Турции 6 февраля 2023 г. были самыми крупными в регионе за последние более 80 лет. После двух основных событий с $M > 7,0$, произошедших с разницей девять часов, было зарегистрировано более 1000 афтершоков (в том числе несколько с $M > 6,0$). На *рис. 3* приведены вариации температуры на уровнях от 700 до 100 гПа, которые наблюдались над эпицентральной областью с октября 2022 по май 2023 г.

Это один из тех достаточно редких случаев, когда сейсмическая активность в столь явном виде проявлялась в вариациях температуры. Причём эти изменения наблюдались на всех уровнях, т.е. охватывали всю вертикальную структуру температуры в UTLS, а граница перехода от положительных изменений к отрицательным располагалась на уровне $\sim 10,4$ км (250 гПа). Для большей наглядности на *рис. 3б* показан фрагмент высотно-временного распределения температуры в январе–феврале 2023 г., который демонстрирует полное соответствие температурных изменений и региональной сейсмичности (см. *рис. 3г*) в течение примерно 35-суточного периода и симметричное распределение аномалии относительно центра в день землетрясений $M > 7,0$.

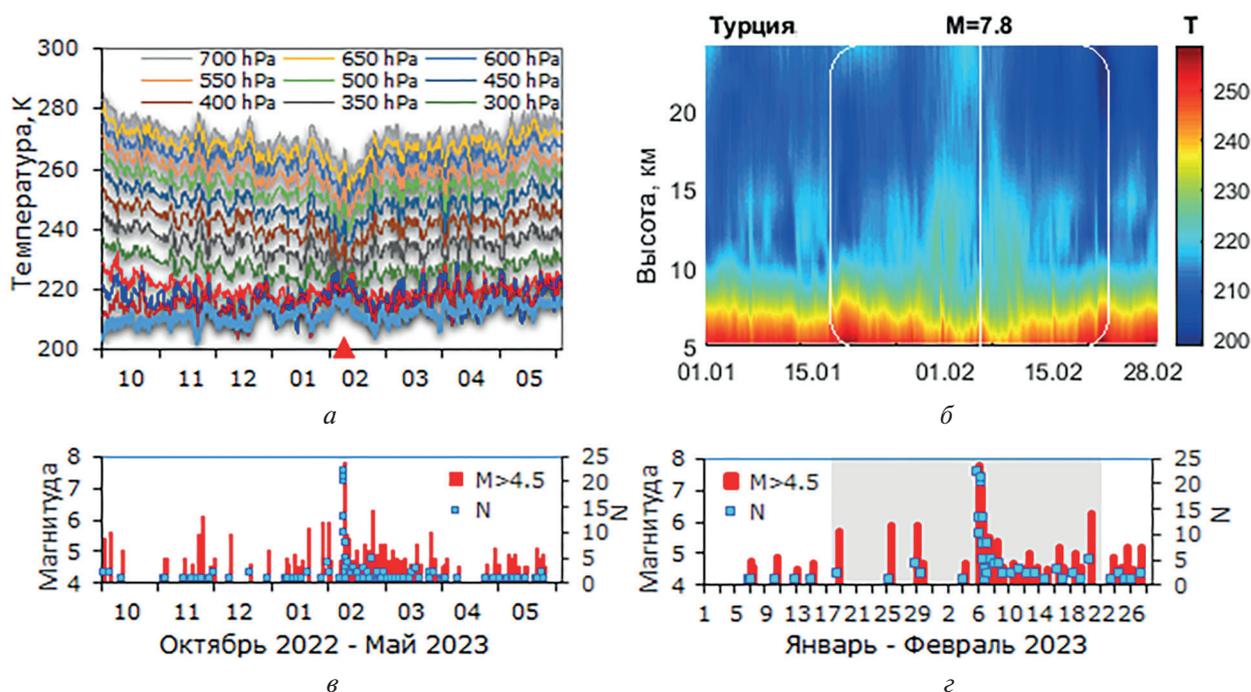


Рис. 3. Высотно-временные изменения температуры атмосферы над эпицентральной зоной землетрясения $M = 7,8$ в Турции и соответствующая динамика сейсмической активности (последовательность магнитуд (M) и число землетрясений в каждые сутки (N)) в октябре 2022–мае 2023 г. (*а, в*) и в январе–феврале 2023 г. (*б, г*). Положение маркера соответствует моменту события 6 февраля 2023 г.

Достаточно плавные изменения, которые начались во второй половине января и продолжались до момента землетрясения (6 февраля 2023 г.), были модулированы более короткопериодными вариациями, что позволило выделить в течение этого периода три сейсмо-термические аномалии разной продолжительности и интенсивности: 18–19 января, 29–30 января и 2–4 февраля 2023 г.

Общая особенность выделенных мезомасштабных предсейсмических возмущений температуры заключалась в том, что они проявлялись в ограниченных пространственных областях, были сосредоточены над эпицентрными областями или вблизи эпицентров на удалении до ~400–600 км и их расположение в пространстве оставалось относительно стабильным на протяжении достаточно продолжительного времени порядка 12–36 ч. Пример эволюции пространственно-временного распределения аномалии температуры, зарегистрированной 29–30 января 2023 г., приведён на *рис. 4*.

Землетрясение $M = 7,0$ в Китае произошло в пределах горного хребта Тянь-Шань на границе с Кыргызстаном. Крупные землетрясения в этом сейсмически активном регионе происходили довольно редко, за последние 100 лет зарегистрировано три события $M > 6,5$.

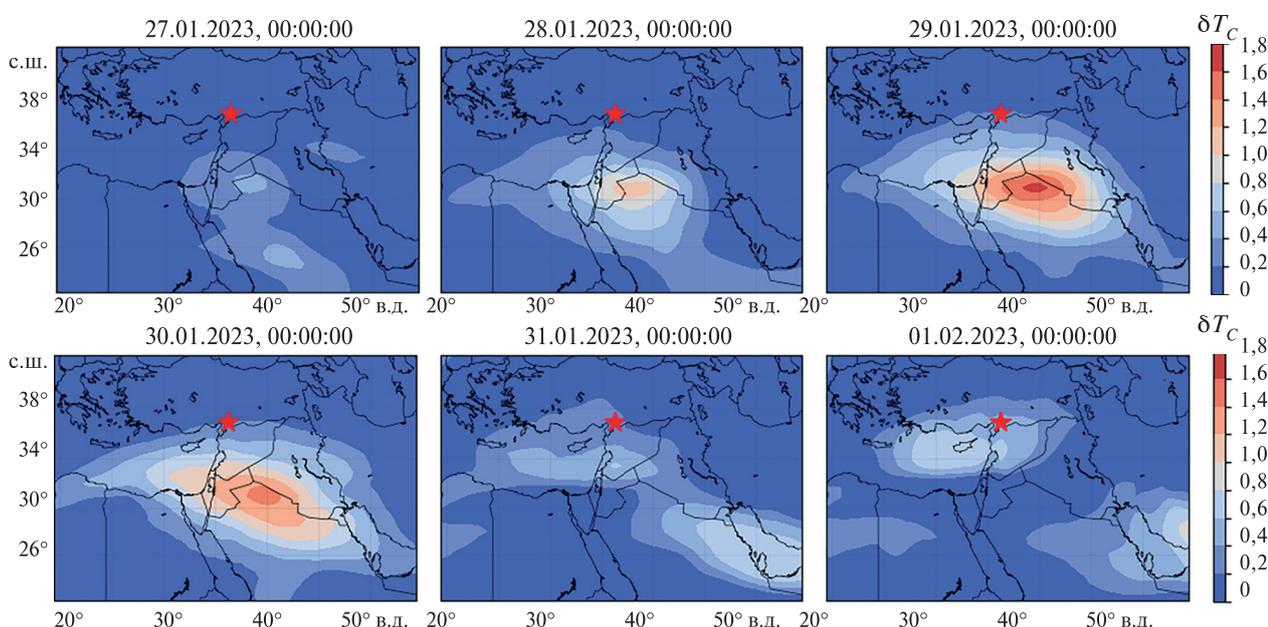


Рис. 4. Динамика пространственного распределения интегрального параметра ΔT_C перед землетрясениями $M > 7,0$ в Турции с 27 января по 1 февраля 2023 г. Маркером показан эпицентр события 6 февраля

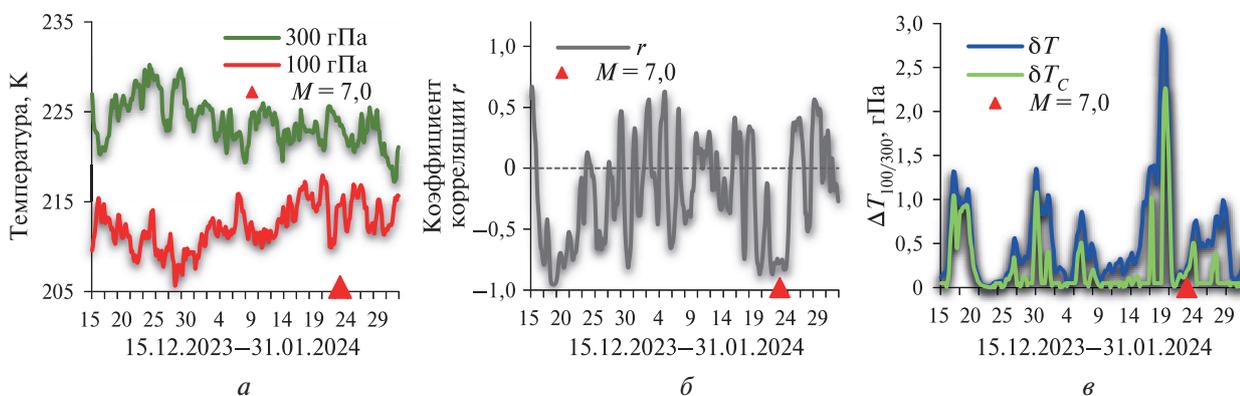


Рис. 5. Вариации температуры на уровнях 100 и 300 гПа (*а*), коэффициента корреляции r между приращениями ΔT на этих уровнях (*б*) и соответствующие изменения параметров ΔT и ΔT_C (*в*) с 15 декабря 2023 по 31 января 2024 г. Положение маркера соответствует моменту события $M = 7,0$ в Китае

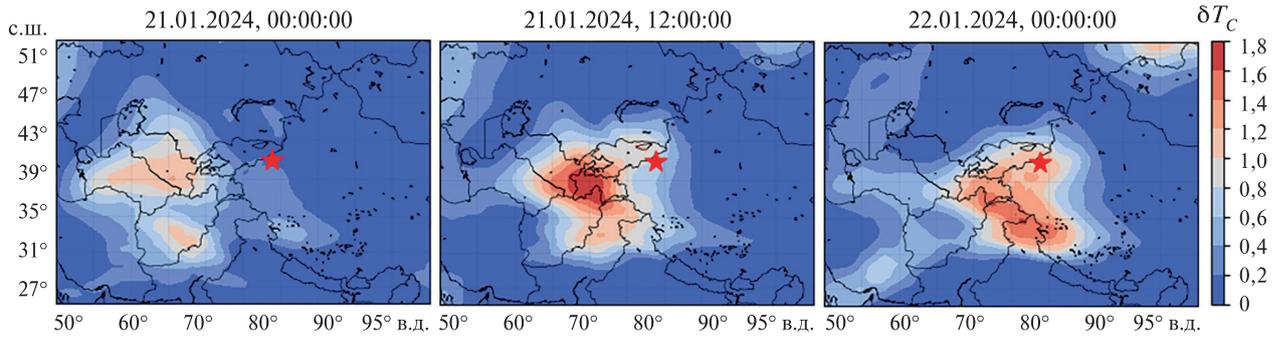


Рис. 6. Эволюция пространственного распределения параметра ΔT_C 21–22 января 2024 г. Маркером показан эпицентр события $M = 7,0$ в Китае (22.01.2024; 18:09:04 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время))

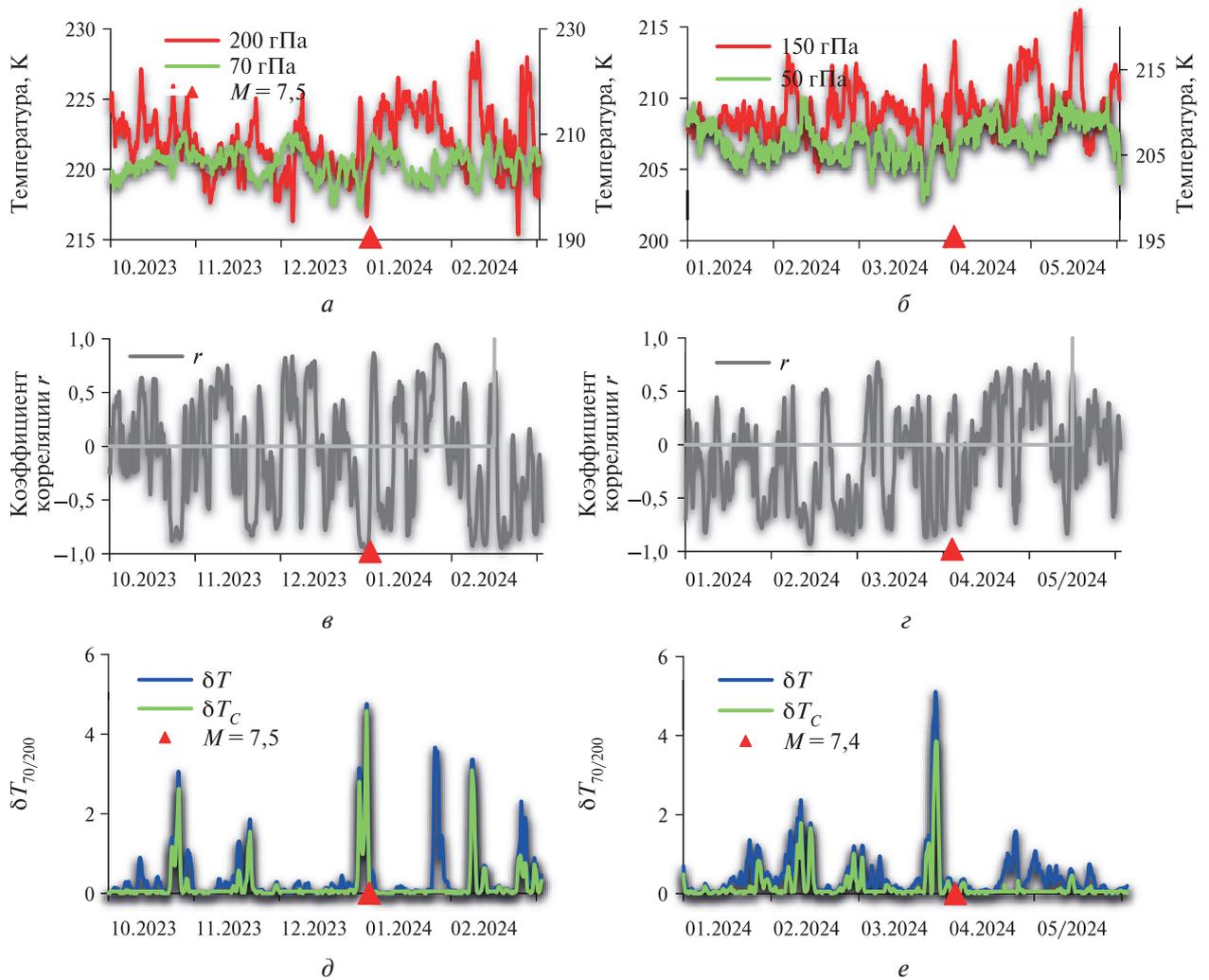


Рис. 7. Вариации температуры (а, б), коэффициента корреляции r (в, г) и интегрального параметра ΔT_C (д, е) в октябре 2023 – феврале 2024 г. над эпицентром землетрясения $M = 7,5$ в Японии (01.01.2024, 07:10:09 UTC) (а, в, д) и в январе – мае 2024 г. над эпицентром землетрясения $M = 7,4$ на Тайване (02.04.2024, 23:58:12 UTC) (б, г, е). Положение маркера соответствует моментам этих событий

Особенностью вариации температуры в верхней тропосфере (300 гПа) и области тропопаузы (100 гПа) (рис. 5а, см. с. 60) над эпицентральной областью землетрясения являлся коррелированный противофазный характер предсейсмических изменений. Непосредственно

перед сейсмическим событием локальные коэффициенты корреляции достигали значений $r = -0,96$ (см. *рис. 5б*), что, наряду с аномальным увеличением амплитуды вариаций, период которых составлял $\sim 4-6$ дней, послужило одним из факторов, приводящих к высоким уровням параметра δT_C ($\delta T_C > 2,0$) (см. *рис. 5в*). Результаты расчёта карт пространственного распределения δT_C показали, что и в этом случае также проявлялись основные признаки предсейсмических тепловых аномалий. Область высоких значений параметра δT_C ($\delta T_C > 1,0$) была локализована вблизи эпицентра предстоящего землетрясения $M = 7,0$ в Китае и наблюдалась в течение двух суток (21–22 января 2024 г.) (*рис. 6*, см. с.61). Максимум в развитии мезомасштабного возмущения наблюдался за ~ 30 ч до события.

Результаты анализа временных вариаций температуры в области тропопаузы в периоды сейсмической активности в Японии и на Тайване представлены на *рис. 7* (см. с. 61). Совместная обработка временных рядов температуры на уровнях 200–150 и 70–50 гПа позволила выявить возмущения температуры, характеризующиеся высокими значениями параметра $\delta T_C > 4,5$, которые наблюдались за несколько суток до землетрясений. Очевидно, что единственные за длительные 5-месячные периоды выраженные аномалии температуры совпадали по времени с периодами подготовки крупных событий.

Наборы карт пространственного распределения параметра δT_C (*рис. 8*) свидетельствовали не только о наличии предсейсмических возмущений температуры, наблюдаемых до обоих событий и локализованных вблизи эпицентров землетрясений, но и достаточно близком подобии результатов.

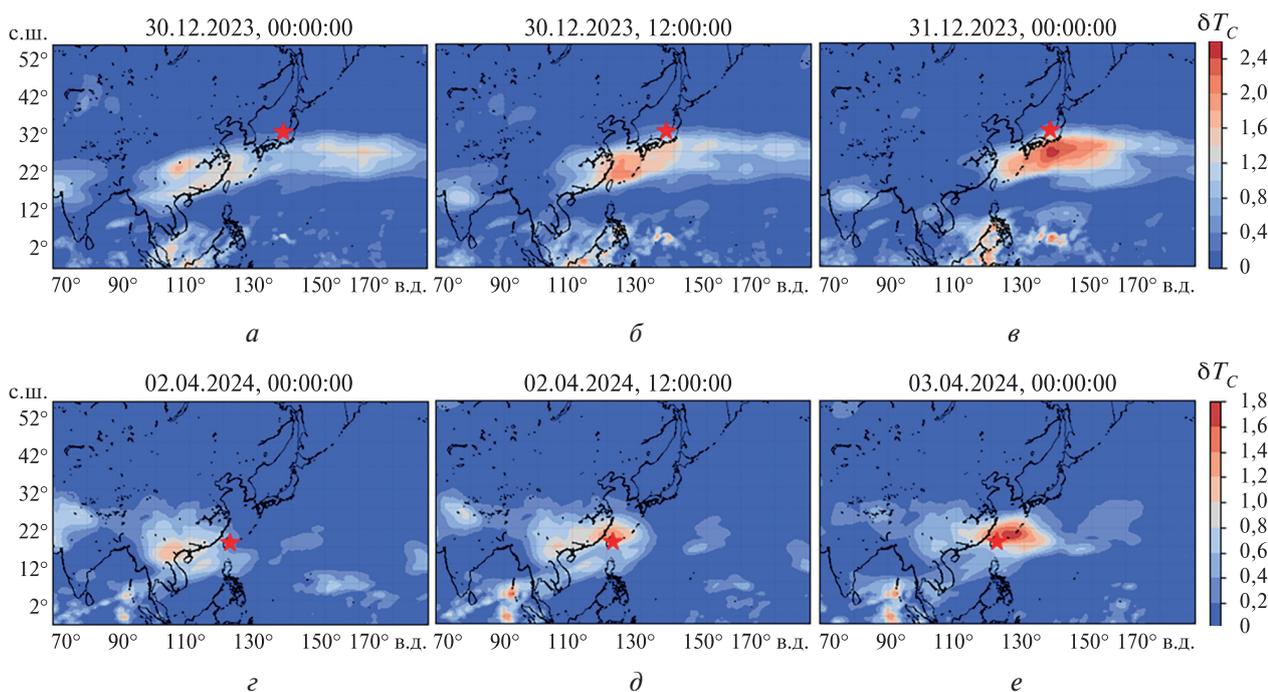


Рис. 8. Пространственное распределение параметра δT_C перед землетрясениями $M \geq 7,0$ в Японии 30–31 декабря 2023 г. (а–в) и на Тайване 2–3 апреля 2024 г. (г–е). Маркером показаны эпицентры этих событий

Изменения температуры происходили согласованно с вариациями других параметров в верхней тропосфере и нижней стратосфере, в частности, с горизонтальной скоростью ветра. Для анализа ветрового режима над эпицентрными областями землетрясений в Турции было построено распределение всех 3-часовых значений модуля вектора скорости (V_R) для различного направления ветра (α) на уровне 200 гПа ($\sim 12,0$ км). Диаграмма содержит 1696 точек данных и охватывает период продолжительностью 7 мес — с ноября 2022 по май 2023 г. (*рис. 9а*, см. с. 63). Точки данных, характеризующие изменения ветра в предсейс-

мический период (30–31 января 2023 г.) и отмеченные цветными маркерами, выделялись на общем фоне всего множества точек данных за 7-месячный период более высокими значениями модуля вектора скорости ветра, достигающими 90 м/с, что указывает на предсейсмические аномальные изменения скорости ветра. Подобный особый характер поведения модуля вектора скорости ветра наблюдался 21 января 2024 г. за сутки до землетрясения в Китае (см. рис. 9б). Представленные диаграммы рассеяния могут служить подтверждением результатов, приведённых в работах (Свердлик, 2023, 2024).

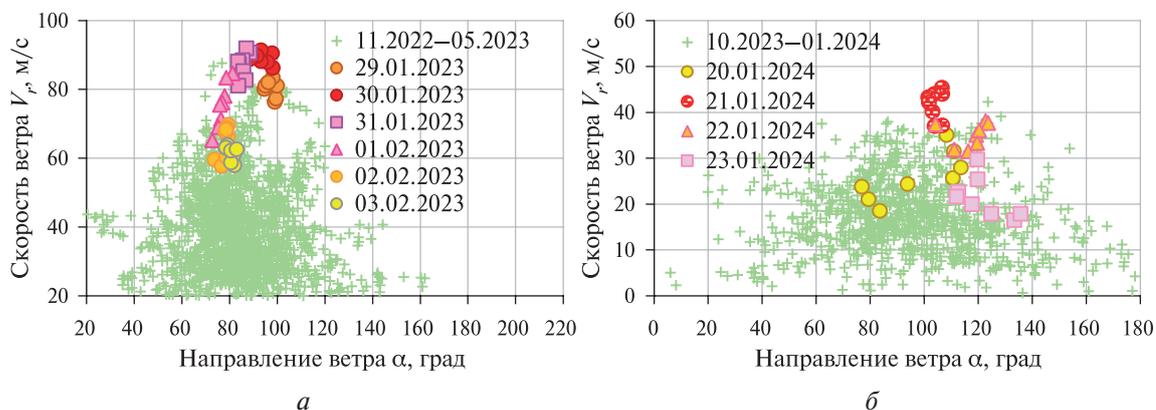


Рис. 9. Распределение модуля вектора скорости ветра для различных его направлений на изобарическом уровне 200 гПа с ноября 2022 по май 2023 г. в Турции (а), содержащее 1696 точек спутниковых данных, и на 350 гПа в период с октября 2023 по январь 2024 г. в Китае (б) (984 точки спутниковых данных)

Идентификация волновых возмущений в нижней атмосфере

Таким образом, повторяемость полученных результатов практически не оставляет сомнений в том, что сейсмическая активность выступает одним из источников изменчивости параметров атмосферы. Далее встаёт естественный вопрос о возможном механизме образования возмущений, предвещающих крупные землетрясения. Можно предположить, что в зависимости от условий разные механизмы взаимодействия литосферы и атмосферы (геохимический, акустико-гравитационный и электромагнитный) сосуществуют и вносят свой вклад в формирование возмущений.

В тоже время многие результаты исследований свидетельствуют, что важную роль в литосферно-атмосферном взаимодействии играют волновые процессы, а именно эффекты возбуждения интенсивных длиннопериодных сейсмогравитационных колебаний (Гохберг, Шалимов, 2008; Кашкин, 2013; Линьков и др., 1990; Kundu et al., 2022), на что указывают некоторые характерные признаки выделенных возмущений, такие как размеры возмущённых областей, их локализация относительно эпицентров, наличие двойной тропопаузы и др. Так, например, характерное для предсейсмических периодов возникновение двойной тропопаузы вне тропиков проявляет очевидную согласованность с пространственно-временной структурой и энергией распространяющихся вверх гравитационных волн (Shao et al., 2023). Поэтому несмотря на довольно грубое вертикальное разрешение спутниковых измерений, была проведена проверка гипотезы волновой природы возмущений.

Достаточно точные оценки волновой активности в атмосфере могут быть получены на основе анализа годографа возмущений скорости ветра (Strelnikova et al., 2020). Возмущения зональной (ΔU) и меридиональной (ΔV) составляющей скорости ветра определялись как разность исходных и соответствующих средних (невозмущённых) профилей, вычисленных на основе аппроксимации исходных данных полиномом 6-го порядка. На рис. 10 (см. с. 64) показаны профили выделенных компонент вариаций скорости ветра в интервале высот 5–25 км и соответствующие им годографы.

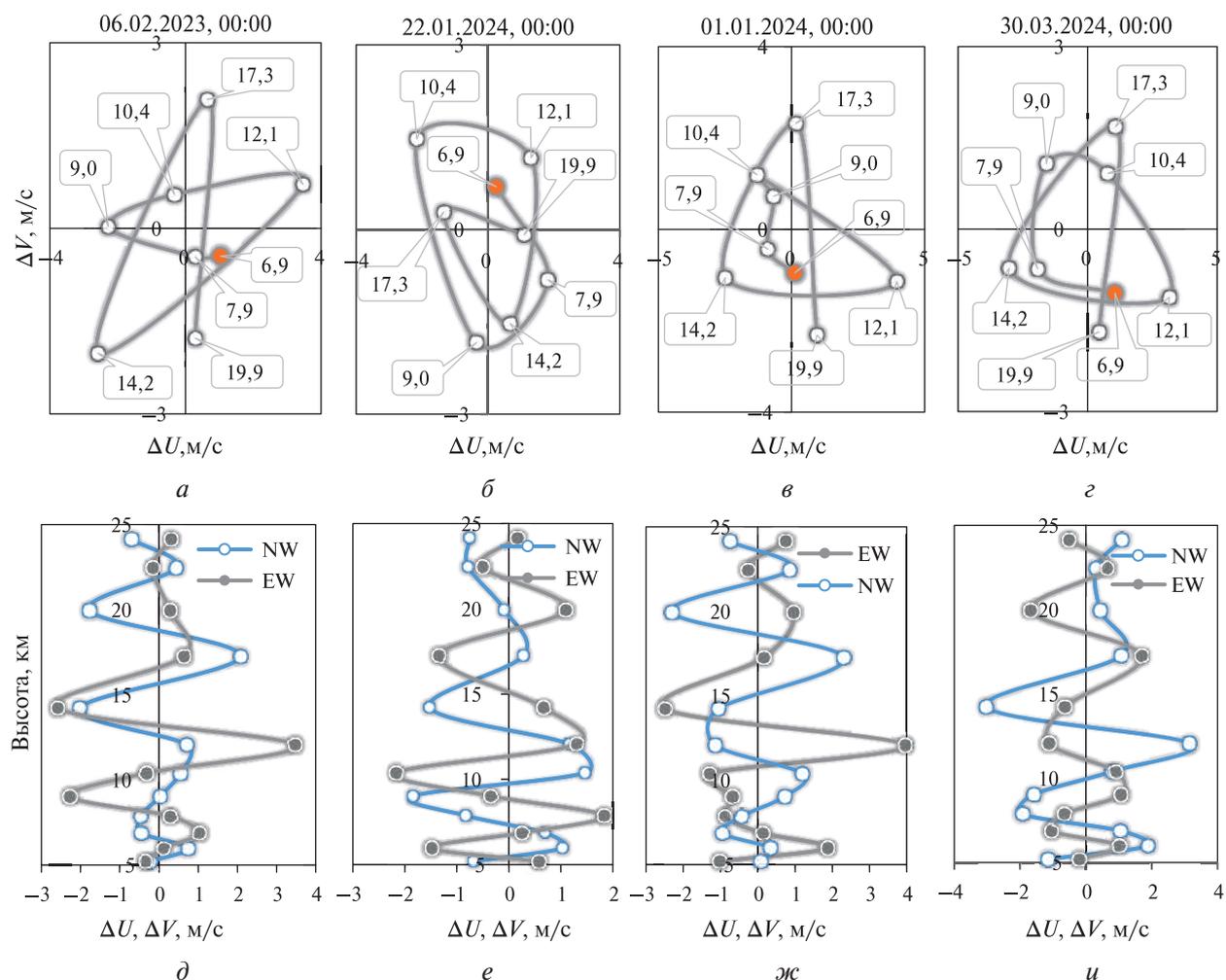


Рис. 10. Годографы и соответствующие им высотные профили вариаций зональной ΔU (англ. Eastward Wind — EW) и меридиональной ΔV (англ. Northward Wind — NW) составляющей скорости ветра по данным измерений за 1–2 сут до землетрясений в Турции (а, д), Китае (б, е), Японии (в, ж) и на Тайване (г, и)

Согласно теории, гравитационные волны создают колебания зональной и меридиональной компоненты ветра с одинаковыми вертикальными длинами волн, но разными фазами и амплитудами (Strelnikova et al., 2020). Вращение конца вектора вариаций скорости по часовой стрелке с увеличением высоты в Северном полушарии соответствует переносу волновой энергии вверх (Réchou et al., 2014). Что можно наблюдать на фрагментах общей картины активности гравитационных волн, представленных графиками вариаций двух составляющих скорости ветра и соответствующими годографами, которые подтверждают, что предсейсмические периоды в Китае, Турции, Японии и на Тайване характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх во всём диапазоне исследуемых высот. Вертикальные длины волн изменялись в интервале 4–8 км.

По мере распространения вверх до уровня тропопаузы и нижней стратосферы происходит усиление амплитуды возмущений в соответствии с экспоненциальным снижением плотности атмосферы в 10–100 раз. Что предполагает возможность регистрации на этих высотах возмущений, которые плохо различимы и часто скрыты на фоне различных других процессов в приземном слое атмосферы и на уровне земной поверхности.

Заключение

В настоящей работе проанализировано временное и пространственное распределение атмосферных аномалий, связанное с пятью крупнейшими землетрясениями с магнитудой $M > 7,0$, произошедшими в 2023–2024 гг. в различных географических регионах Евразии (на материке и прилегающих островах) с разными климатическими условиями и отличающейся глубиной очагов (от 7 до 40 км). Результаты анализа дают основание предполагать вероятную связь аномальных изменений метеопараметров в верхней тропосфере и нижней стратосфере с сейсмической активностью. Во всех исследуемых случаях вблизи эпицентров формировались мезомасштабные области аномальных возмущений температуры. Это может означать, что возникающие на поверхности Земли предсейсмические эффекты приводят к изменению параметров атмосферы. Все землетрясения произошли в спокойных геомагнитных условиях, поэтому аномалии были, вероятно, вызваны процессами взаимодействия литосферы и атмосферы. В качестве наиболее вероятного механизма формирования возмущений рассматривались атмосферные волны, генерируемые колебаниями земной поверхности. Анализ годографов вариаций скорости ветра в исследуемом интервале высот (~5–25 км) подтвердил, что предсейсмические периоды характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх. Одним из важных выводов проведённого исследования может стать повторяемость и подтверждение ранее полученных результатов с использованием одной и той же методологии и анализом одних и тех же параметров атмосферы. Дальнейшие исследования предстоит провести в отношении других крупных землетрясений.

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 (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration) и USGS за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научная станция РАН (НС РАН) в г. Бишкеке 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 г. Бишкеке в рамках проекта по Программе развития КРСУ.

Литература

1. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука, 2008. 296 с.
2. Кашкин В. Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. Свердлик Л. Г., Ибраев А. Э. Использование модифицированного алгоритма STA/LTA для выделения предсейсмических возмущений температуры в нижней атмосфере // Вестн. КPCY. 2022. Т. 22. № 12. С. 190–196. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.
9. Свердлик Л. Г., Ибраев А. Э. Программа «IPPLA» (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612499. Рег. 03.02.2023.
10. Biswas S., Kundu S., Sasmal S. et al. Preseismic perturbations and their inhomogeneity as computed from ground- and space-based investigation during the 2016 Fukushima earthquake // J. Sensors. 2023. V. 2023. Article 7159204. DOI: 10.1155/2023/7159204.
11. Freund F. T., Mansouri Daneshvar M. R., Ebrahimi M. Atmospheric storm anomalies prior to major earthquakes in the Japan region // Sustainability. 2022. V. 14. Iss. 16. Article 10241. DOI: 10.3390/su141610241.
12. Gavrilov N. M., Fukao S. Numerical and the MU radar estimations of gravity wave enhancement and turbulent ozone fluxes near the tropopause // Annales Geophysicae. 2004. V. 22. P. 3889–3898. DOI: 10.5194/angeo-22-3889-2004.
13. Hoinka K. P. Statistics of the global tropopause pressure // Monthly Weather Review. 1998. V. 126. Iss. 12. P. 3303–3325. DOI: 10.1175/1520-0493(1998)126<3303:SOTGTP>2.0.CO;2.
14. Jiao Z., Shan X. Pre-seismic temporal integrated anomalies from multiparametric remote sensing data // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 10. Article 2343. DOI: 10.3390/rs14102343.
15. Kundu S., Chowdhury S., Ghosh S. et al. Seismogenic anomalies in atmospheric gravity waves as observed from SABER/TIMED satellite during large earthquakes // J. Sensors. 2022. V. 2022. Article 3201104. DOI: 10.1155/2022/3201104.
16. Ma W., Zhang X., Liu J. et al. Influences of multiple layers of air temperature differences on tidal forces and tectonic stress before, during and after the Jiujiang earthquake // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 210. P. 159–165. DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.003.
17. Mehdi S., Shah M., Naqvi N. A. Lithosphere atmosphere ionosphere coupling associated with the 2019 M_w 7.1 California earthquake using GNSS and multiple satellites // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. V. 193. Article 501. DOI: 10.1007/s10661-021-09278-6.
18. 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.
19. Réchou A., Kirkwood S., Arnault J., Dalin P. Short vertical-wavelength inertia-gravity waves generated by a jet–front system at Arctic latitudes — VHF radar, radiosondes and numerical modelling // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. Iss. 13. P. 6785–6799. DOI: 10.5194/acp-14-6785-2014.
20. Shao J., Zhang J., Tian Y. et al. Tropospheric gravity waves increase the likelihood of double tropopauses // Geophysical Research Letters. 2023. V. 50. Article e2023GL105724. DOI: 10.1029/2023GL105724.
21. Strelnikova I., Baumgarten G., Lübken F.-J. Advanced hodograph-based analysis technique to derive gravity-wave parameters from lidar observations // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. Iss. 2. P. 479–499. DOI: 10.5194/amt-13-479-2020.
22. Tramutoli V., Corrado R., Filizzola C. et al. From visual comparison to Robust Satellite Techniques: 30 years of thermal infrared satellite data analyses for the study of earthquake preparation phases // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2015. V. 56. No. 2. P. 167–202. DOI: 10.4430/bgta0149.
23. Xu X., Chen S., Yu Y., Zhang S. Atmospheric anomaly analysis related to $M_s > 6.0$ earthquakes in China during 2020–2021 // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 20. Article 4052. DOI: 10.3390/rs13204052.
24. Xu X., Chen S., Zhang S., Dai R. Analysis of potential precursory pattern at Earth surface and the above atmosphere and ionosphere preceding two $M_w \geq 7$ earthquakes in Mexico in 2020–2021 // Earth and Space Science. 2022. V. 9. Iss. 10. Article e2022EA002267. DOI: 10.1029/2022EA002267.
25. Zhang Y., Meng Q., Wang Z. et al. Temperature variations in multiple air layers before the M_w 6.2 2014 Ludian earthquake, Yunnan, China // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 5. Article 884. DOI: 10.3390/rs13050884.

Pre-seismic disturbances of meteorological parameters in the lower atmosphere based on satellite measurements

L. G. Sverdlik

Research Station of RAS in Bishkek City, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

E-mail: l.sverdlik@mail.ru

Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek 720000, Kyrgyzstan

New results of perturbation study in variations of temperature and wind speed during periods of strong seismic activity in Eurasia are presented. The analysis focused on the largest earthquakes of the last two years with magnitudes $M \geq 7.0$ that occurred in Turkey (February 6, 2023), China (January 22, 2024), Japan (January 1, 2024) and Taiwan (April 2, 2024). Data from the Global MERRA-2 Reanalysis Archive (MERRA-2 — Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) were used to investigate pre-seismic effects. In accordance with satellite data processing algorithm, the integral parameter of abnormal variations, calculated as the product of the ratios of sliding variances of time series of temperature in the upper troposphere and the lower stratosphere, was used as an indicator of atmospheric perturbation. As a result of the analysis, pre-seismic mesoscale temperature anomalies were identified, which were localized near the epicentral areas and could be caused by processes occurring in the lithosphere during periods of earthquake preparation. Peak intensity of atmospheric disturbances was observed 1–7 days before the considered events, which can be interpreted as a manifestation of atmospheric gravity waves. Pre-seismic effects were also detected in changes in wind patterns. The analysis of wind speed variation hodographs within the altitude range under examination (~5–25 km) confirmed that pre-seismic periods were characterized by a predominantly upward transfer of wave energy. The combination of these two satellite data sets allowed obtaining more detailed information about atmospheric effects of large earthquakes.

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

Accepted: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-68

References

1. Gokhberg M. B., Shalimov S. L., *Vozdeistvie zemletryasenii i vzryvov na ionosferu* (Influence of earthquakes and explosions to ionosphere), Moscow: Nauka, 2008, 295 p. (in Russian).
2. Kashkin V. B., Inner gravity waves in the troposphere, *Optika atmosfery i okeana*, 2013, V. 26, No. 10, pp. 908–916 (in Russian).
3. 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).
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Sverdlik L. G., Ibraev A. E., Use of the modified STA/LTA algorithm for detection pre-seismic temperature perturbations in the lower atmosphere, *Vestnik KRSU*, 2022, V. 22, No. 12, pp. 190–196 (in Russian), DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.

9. 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).
10. Biswas S., Kundu S., Sasmal S. et al., Preseismic perturbations and their inhomogeneity as computed from ground- and space-based investigation during the 2016 Fukushima earthquake, *J. Sensors*, 2023, V. 2023, Article 7159204, DOI: 10.1155/2023/7159204.
11. Freund F. T., Mansouri Daneshvar M. R., Ebrahimi M., Atmospheric storm anomalies prior to major earthquakes in the Japan region, *Sustainability*, 2022, V. 14, Iss. 16, Article 10241, DOI: 10.3390/su141610241.
12. Gavrilov N. M., Fukao S., Numerical and the MU radar estimations of gravity wave enhancement and turbulent ozone fluxes near the tropopause, *Annales Geophysicae*, 2004, V. 22, pp. 3889–3898, DOI: 10.5194/angeo-22-3889-2004.
13. Hoinka K. P., Statistics of the global tropopause pressure, *Monthly Weather Review*, 1998, V. 126, Iss. 12, pp. 3303–3325, DOI: 10.1175/1520-0493(1998)126<3303:SOTGTP>2.0.CO;2.
14. Jiao Z., Shan X., Pre-seismic temporal integrated anomalies from multiparametric remote sensing data, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 10, Article 2343, DOI: 10.3390/rs14102343.
15. Kundu S., Chowdhury S., Ghosh S. et al., Seismogenic anomalies in atmospheric gravity waves as observed from SABER/TIMED satellite during large earthquakes, *J. Sensors*, 2022, V. 2022, Article 3201104, DOI: 10.1155/2022/3201104.
16. Ma W., Zhang X., Liu J. et al., Influences of multiple layers of air temperature differences on tidal forces and tectonic stress before, during and after the Jiujiang earthquake, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 210, pp. 159–165, DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.003.
17. Mehdi S., Shah M., Naqvi N. A., Lithosphere atmosphere ionosphere coupling associated with the 2019 M_w 7.1 California earthquake using GNSS and multiple satellites, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, V. 193, Article 501, DOI: 10.1007/s10661-021-09278-6.
18. 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.
19. Réchou A., Kirkwood S., Arnault J., Dalin P., Short vertical-wavelength inertia-gravity waves generated by a jet–front system at Arctic latitudes — VHF radar, radiosondes and numerical modelling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, V. 14, pp. 6785–6799, DOI: 10.5194/acp-14-6785-2014.
20. Shao J., Zhang J., Tian Y. et al., Tropospheric gravity waves increase the likelihood of double tropopauses, *Geophysical Research Letters*, 2023, V. 50, Article e2023GL105724, DOI: 10.1029/2023GL105724.
21. Strelnikova I., Baumgarten G., Lübken F.-J., Advanced hodograph-based analysis technique to derive gravity-wave parameters from lidar observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, V. 13, pp. 479–499, DOI: 10.5194/amt-13-479-2020.
22. Tramutoli V., Corrado R., Filizzola C. et al., From visual comparison to Robust Satellite Techniques: 30 years of thermal infrared satellite data analyses for the study of earthquake preparation phases, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2015, V. 56, No. 2, pp. 167–202, DOI: 10.4430/bgta0149.
23. Xu X., Chen S., Yu Y., Zhang S., Atmospheric anomaly analysis related to $M_s > 6.0$ earthquakes in China during 2020–2021, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 20, Article 4052, DOI: 10.3390/rs13204052.
24. Xu X., Chen S., Zhang S., Dai R., Analysis of potential precursory pattern at Earth surface and the above atmosphere and ionosphere preceding two $M_w \geq 7$ earthquakes in Mexico in 2020–2021, *Earth and Space Science*, 2022, V. 9, Iss. 10, Article e2022EA002267, DOI: 10.1029/2022EA002267.
25. Zhang Y., Meng Q., Wang Z. et al., Temperature variations in multiple air layers before the M_w 6.2 2014 Ludian earthquake, Yunnan, China, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 5, Article 884, DOI: 10.3390/rs13050884.