

УДК 551.51:551.524:550.34
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-12-172-180

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ
ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ
В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

Л.Г. Свєрдлик

Аннотация. Представлены результаты анализа пространственно-временных изменений метеопараметров (температуры и скорости ветра) в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS), основанные на данных спутниковых измерений (глобальный реанализ MERRA-2) во время пяти крупнейших землетрясений, произошедших в Турции (магнитудой $M=7.8$ и $M=7.5$; 06 февраля 2023 г.), Китае ($M=7.0$; 22 января 2024 г.), Японии ($M=7.5$; 01 января 2024 г.) и на Тайване ($M=7.4$; 02 апреля 2024 г.). Для выявления и идентификации связанных с сейсмической активностью аномальных вариаций температуры использовался алгоритм, основанный на вычислении интегральных параметров аномальных вариаций (δT и δT_c). В результате анализа спутниковых данных были обнаружены характерные для предсейсмических периодов аномальные изменения температуры. Аномальные зоны были сосредоточены вблизи эпицентров за 1–7 дней до рассматриваемых событий. Полученные результаты продемонстрировали эффективность используемого алгоритма выделения атмосферных эффектов землетрясений с магнитудами $M \geq 7.0$.

Ключевые слова: землетрясение; спутниковые данные; температура; тропопауза; аномалия; D_{ST} -индекс; скорость ветра; годограф.

**АТМОСФЕРАНЫН ТӨМӨНКҮ КАТМАРЫНДАГЫ
МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫК ПАРАМЕТРЛЕРДИН АЛДЫН АЛА СЕЙСМИКАЛЫК
АНОМАЛИЯЛАРЫНЫН ДИНАМИКАСЫН ИЗИЛДӨӨНҮН ЖАЙЫНТЫКТАРЫ**

Л.Г. Свєрдлик

Аннотация. Түркияда болгон эң ири беш жер титирөөнүн учурунда (06-02-2023, магнитудасы $M=7.8$ жана $M=7.5$), Кытайда ($M=7.0$; 22-01-2024), Японияда ($M=7.5$; 01-01-2024) жана Тайванда ($M=7.4$; 02-04-2024) спутниктик өлчөө маалыматтарынын (глобалдык MERRA-2 реанализи) негизинде жогорку тропосфера жана төмөнкү стратосферадагы (UTLS) метеорологиялык параметрлердин (температура жана шамалдын ылдамдыгы) мейкиндик-убакыттык өзгөрүүлөрүн талдоонун жыйынтыктары көрсөтүлдү. Сейсмикалык активдүүлүк менен байланышкан температуранын аномалдуу вариацияларын аныктоо үчүн аномалдык вариациялардын интегралдык параметрлерин (δT жана δT_c) эсептөө алгоритми колдонулган. Спутниктин маалыматтарын талдоонун натыйжасында сейсмикалык мезгилге чейинки муноздуу температуранын аномалдык өзгөрүүлөрү ачылды. Изилденген окуяларга 1-7 күн калганда эпицентрлердин жанында аномалдык зоналар топтолгон. Бул натыйжалар $M \geq 7.0$ жер титирөөлөрдүн атмосфералык таасирин аныктоо үчүн колдонулган алгоритмдин натыйжалуулугун көрсөттү.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; спутниктик маалыматтары; температура; тропопауза; аномалия; D_{ST} индекси; шамалдын ылдамдыгы; годограф.

RESULTS OF STUDY METEOROLOGICAL PARAMETERS PRE-SEISMIC ANOMALIES DYNAMICS IN THE LOWER ATMOSPHERE

L. G. Sverdlik

Abstract. The article presents the results of analysis of spatial-temporal changes in meteorological parameters (temperature and wind speed) in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) on the basis of satellite data (MERRA-2 global reanalysis) during the five largest earthquakes in Turkey ($M=7.8$ and $M=7.5$; February 6, 2023), China ($M=7.0$; January 22, 2024), Japan ($M=7.5$; January 1, 2024) and Taiwan ($M=7.4$; April 2, 2024). To detect and identify anomalous temperature variations associated with seismic activity we used an algorithm based on calculation of integral parameters of anomalous variations (δT and δT_c). As a result of the analysis of satellite data, anomalous temperature changes characteristic of pre-seismic periods were discovered. Anomalous zones were localized near the epicenters 1–7 before the events in question. The obtained results demonstrated effectiveness of the applied algorithms of identification of atmospheric effects of $M \geq 7.0$ earthquakes.

Keywords: earthquake; satellite data; temperature; tropopause; anomaly; D_{ST} index; wind speed; hodograph.

Введение. Сейсмическую активность можно отнести к наиболее распространенным опасным природным явлениям, которые в ряде случаев приводят к катастрофическим последствиям [1], что обуславливает актуальность решения задач, связанных с прогнозной тематикой. Наиболее эффективно решение задачи предупреждения подобных угроз может быть реализовано на основе непрерывного мониторинга и комплексного анализа аномальных изменений в различных геофизических полях, которые предшествуют сильным землетрясениям. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о различных проявлениях сейсмической активности в слоях атмосферы (напр., [2]), указывающий на перспективность проведения подобных исследований на основе данных спутникового дистанционного зондирования [3, 4]. Можно отметить ряд работ, в которых представлены результаты исследований особенностей термических аномалий, предвещающих разрушительные землетрясения (напр., [5–7]). Важную роль при этом играло использование фактора различия свойств атмосферы с изменением высоты в слоях нижней атмосферы, позволяющее более эффективно выделять предсейсмические аномалии [8, 9]. Так, например, результаты анализа аномальных изменений высотного распределения температуры в атмосфере показали их характерную пространственно-временную эволюцию [10] и отражали изменение состояния сейсмотектонического напряжения в исследуемом регионе [11].

В настоящей работе приведены новые результаты анализа динамики пространственно-временной изменчивости метеопараметров в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS) по данным спутниковых наблюдений (глобальный реанализ MERRA-2) во время пяти крупных землетрясений, которые были зарегистрированы на протяжении последних двух лет в сейсмически активных регионах Европы и Азии.

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 [8, 9, 12]. Список событий постоянно пополняется и расширяется. Для настоящего исследования выбраны самые крупные землетрясения с магнитудами $M \geq 7.0$, произошедшие в 2023–2024 гг. Это события в Турции, Китае, Японии и на Тайване, эпицентры которых показаны красными маркерами на рисунке 1. Источником сейсмических данных, приведенных в таблице 1, послужил глобальный каталог землетрясений Геологической службы США [13]. Для проводимого исследования было важно, что события произошли в различных сейсмотектонических и метеорологических условиях и их эпицентры имели значительные отличия в географическом положении.

В исследовании использовали трехмерные массивы температуры и горизонтальной скорости ветра из архива глобального реанализа MERRA-2 на 16 стандартных изобарических уровнях от 700 до 40 гПа с временным разрешением $\Delta t = 3$ часа в узлах равномерной сетки $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. Рассматривались

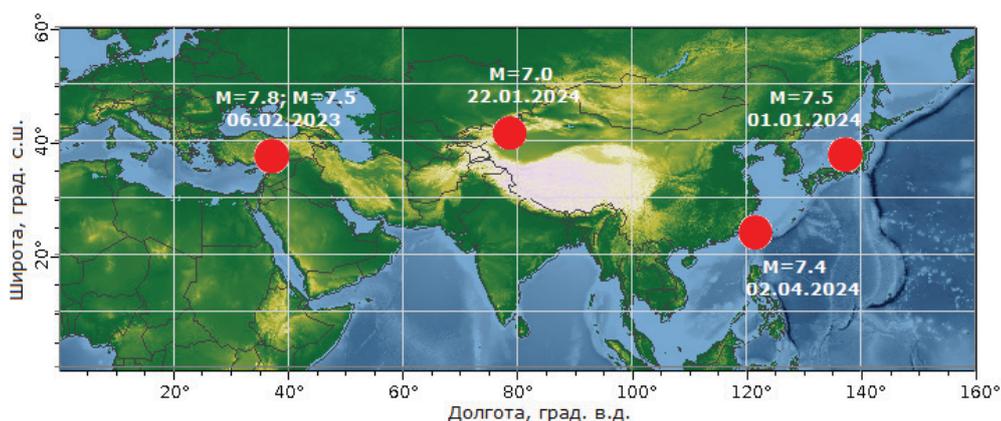


Рисунок 1 – Карта пространственного распределения эпицентров сейсмических событий с магнитудами $M \geq 7.0$, произошедшими в 2023–2024 гг. в Турции, Китае, Японии и на Тайване

Таблица 1 – Характеристики землетрясений $M > 7.0$ по данным Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/>)

№	Дата	Время	Широта	Долгота	D, км	M	Расположение
EQ1	06.02.2023	01:17:34	37.23	37.01	10.0	7.8	Pazarcik earthquake, Turkey
EQ2	06.02.2023	10:24:48	38.01	37.20	7.4	7.5	Elbistan earthquake, Turkey
EQ3	01.01.2024	07:10:09	37.49	137.27	10.0	7.5	Japan Earthquake
EQ4	22.01.2024	18:09:04	41.26	78.66	13.0	7.0	128 km WNW of Aykol, China
EQ5	02.04.2024	23:58:12	23.84	121.60	40.0	7.4	15 km S of Hualien City, Taiwan

достаточно продолжительные ряды спутниковых наблюдений, составляющие 2–4 месяца до и после всех рассматриваемых событий. Загрузку данных производили в системе GES-DISC NASA [14]. Пространственные характеристики возмущений температуры в UTLS **определяли** с помощью программного приложения IPPLA (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) [15, 16].

Для оценки влияния солнечной активности на результаты диагностирования аномалий температуры использовали значения индекса геомагнитной активности D_{ST} по данным Центра земного и космического магнетизма Университета Киото, Япония (*World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan*) [17]. Значения индекса D_{ST} в исследуемые периоды сейсмической активности изменялись в пределах от -30 до 20 нТл (рисунок 2), что свидетельствует о спокойных геомагнитных условиях и отсутствии возмущений, которые способны вызвать изменения температуры в слоях нижней атмосферы [18]. Может быть отмечена только одна геомагнитная буря, зарегистрированная 24 марта 2024 г. за 10 дней до землетрясения $M = 7.4$ на Тайване, которая характеризовалась минимальным значением индекса D_{ST} , равным -128 нТл.

Выполненные ранее исследования (напр., [19]) свидетельствуют, что сейсмическая активность оказывает влияние на атмосферу и проявляется в вариациях различных ее параметров, в том числе в изменениях вертикальной структуры [2]. Одним из подходов к обнаружению аномалий, связанных с землетрясениями, является использование метода, основанного на анализе флуктуации приливных сил (TFFA), который учитывает характерную эволюцию вертикальной структуры температуры атмосферы [10].

В данном случае анализировались изменения полей температуры на двух уровнях (в верхней тропосфере и нижней стратосфере) с последующим сведением результата к единому численному

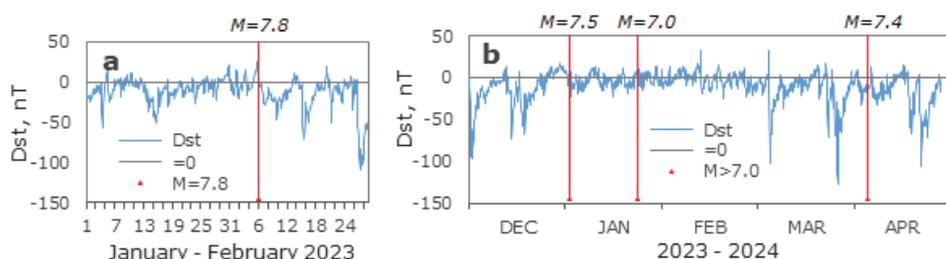


Рисунок 2 – Вариации индекса D_{ST} в январе-феврале 2023 г. (а) и с декабря 2023 по апрель 2024 г. (б).
Вертикальные линии соответствуют моментам землетрясений $M \geq 7.0$

показателю, так называемому интегральному параметру аномальных вариаций δT и его скорректированным на коэффициент корреляции значением δT_c [12]. Двухуровневый подход и использование свойства коррелированности временных рядов позволили более эффективно выделять тепловые аномалии, связанные, как предполагается, с сильными землетрясениями.

Соответственно, одним из базовых положений при анализе температурных данных является объективный выбор наиболее информативных диапазонов высот в области тропопаузы, в которых происходят наиболее интенсивные противофазные колебания температуры [12]. Механизмы формирования и характеристики инверсионного слоя тропопаузы зависят от широты. Если в тропиках положение тропопаузы определяется в основном радиационными процессами и располагается на уровне 100 гПа, то вблизи полюсов высота полярной тропопаузы соответствует давлению 300 гПа [20]. Высота внетропической тропопаузы демонстрирует сильную связь с циркуляционными процессами и претерпевает значительные деформации с образованием двойной тропопаузы (рисунок 3, а–д), когда низкоширотная воздушная масса распространяется на более высокие широты и перекрывает среднеширотную тропопаузу [21]. Выбор высотных уровней для выделения возмущений температуры производили на основе построения и анализа вертикальных распределений межсуточных приращений температуры ΔT (рисунок 3, е–h). С учетом особенностей динамики вертикальной структуры приращений температуры в исследуемых регионах использовали уровни 300–200 гПа (~9.0–12.1 км) в верхней тропосфере и 100–50 гПа (~17.5–22.5 км) – в нижней стратосфере.

Предсейсмические возмущения температуры в UTLS. Результаты обработки выделенных пар временных рядов температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере представлены на рисунке 4 в виде рассчитанных вариаций параметров δT и δT_c . Как видно, все рассматриваемые периоды характеризовались четко выраженными максимумами, указывающими на аномальные предсейсмические изменения температуры, которые проявлялись в период от 1 до 7 дней до землетрясений $M \geq 7.0$. Интенсивность температурных возмущений была сопоставима по величине ($\delta T_c = 2.5\text{--}4.5$). Поскольку все землетрясения были зарегистрированы в спокойных солнечных и геомагнитных условиях (рисунок 2), это позволяет предположить вероятную связь аномальных изменений температуры с процессами подготовки крупных сейсмических событий.

Эпицентральные области имели свои особенности, свою структуру разломов, геологические условия, движения земной коры и т. д., а, следовательно, по-разному протекающие в литосфере процессы накопления напряжений и деформации [8, 22], тем не менее распределения параметров δT и δT_c показало во многом схожую картину изменения во времени в исследуемые предсейсмические периоды (рисунок 4).

Более наглядно визуализировать все фазы развития возмущений температуры, пространственный масштаб и локализацию, а также определять временную задержку по отношению к сейсмическому событию позволяет расчет пространственного распределения параметра δT_c . Результаты построения карт показали, что во всех случаях проявлялись основные признаки предсейсмических возмущений

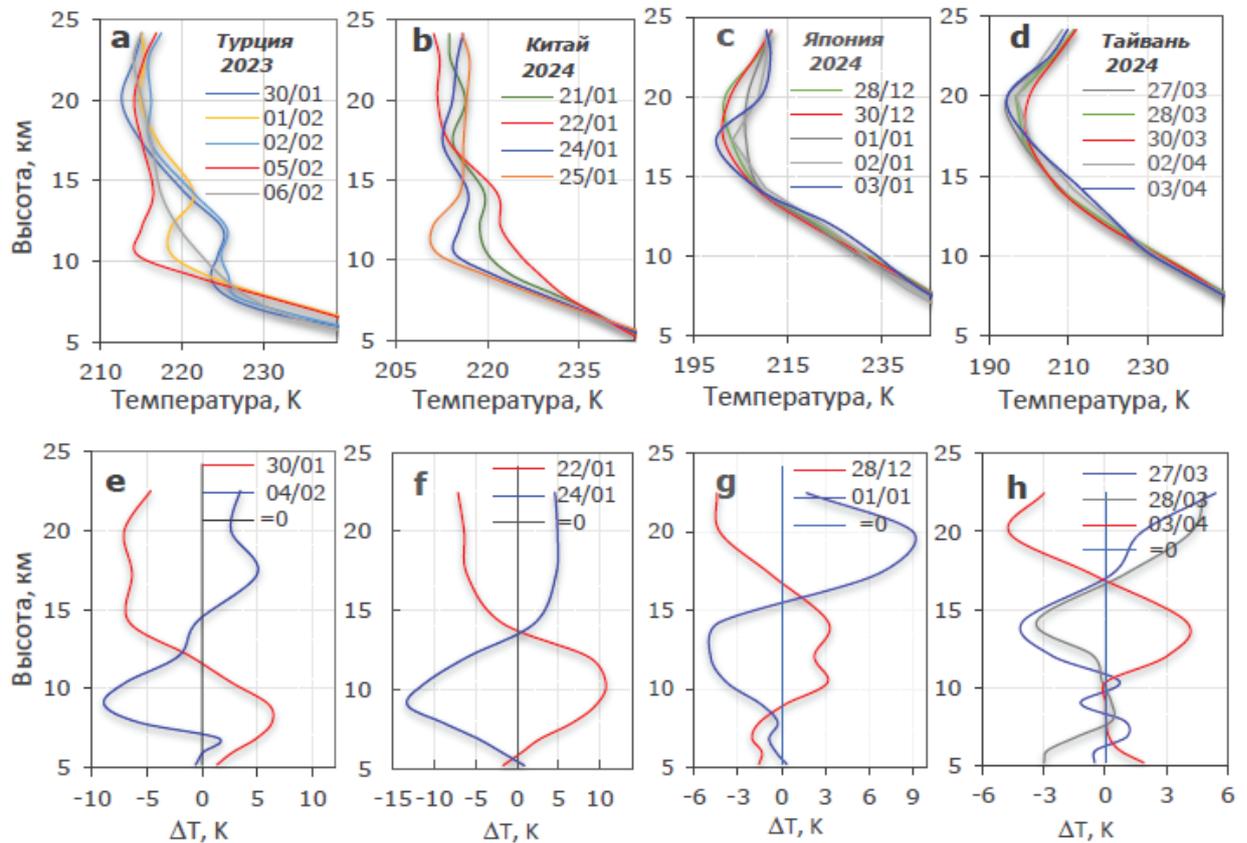


Рисунок 3 – Вертикальные профили температуры T и соответствующих им приращений температуры ΔT в предсейсмические периоды над эпицентрными областями землетрясений $M \geq 7.0$ в Турции (a, e), Китае (b, f), Японии (c, g) и на Тайване (d, h)

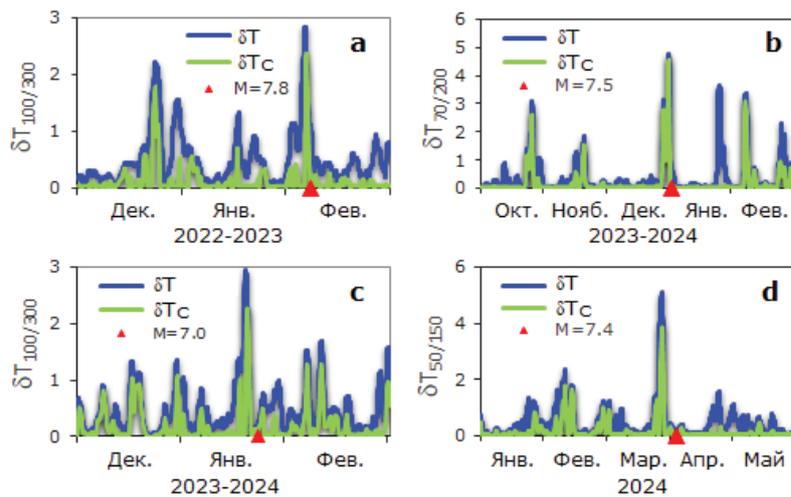


Рисунок 4 – Вариации интегральных параметров δT и δT_c над эпицентрными областями землетрясений в Турции ($M = 7.6$; 06.02.2023) (a), Японии ($M = 7.5$; 01.01.2024) (b), Китае ($M = 7.0$; 21.01.2024) (c) и на Тайване ($M = 7.4$; 02.04.2024) (d)

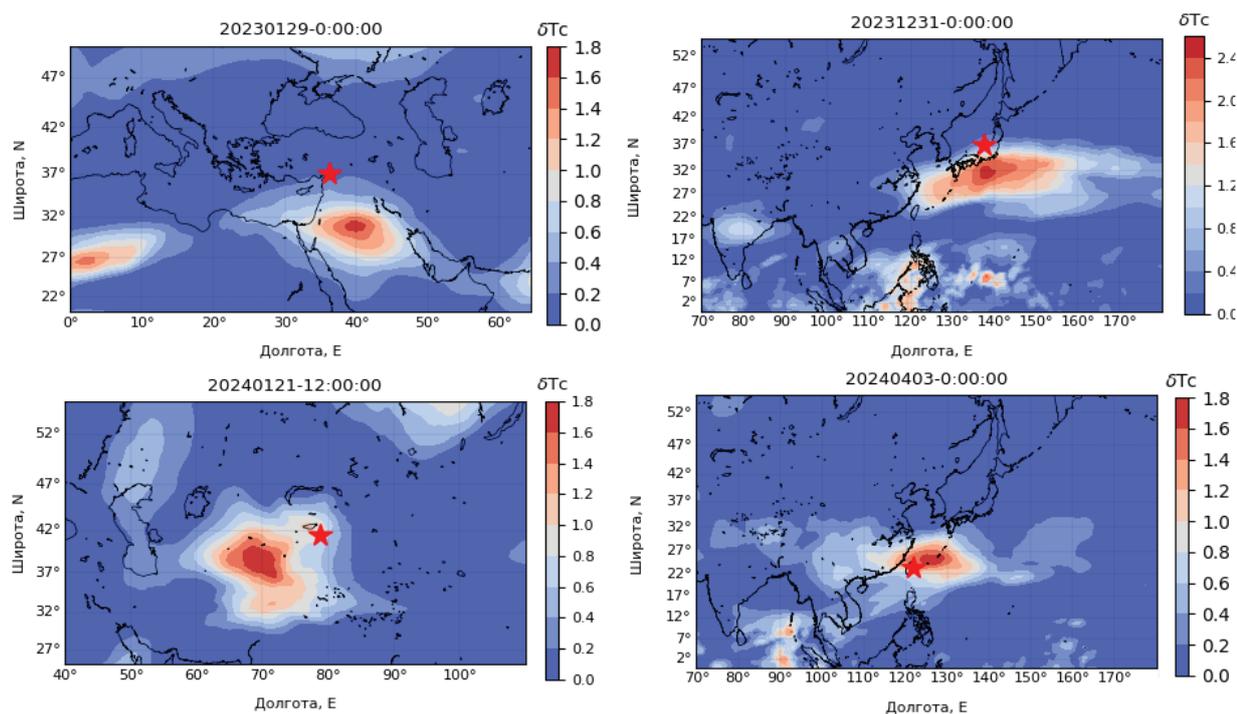


Рисунок 5 – Пространственное распределение интегрального параметра ΔT_c перед землетрясениями в Турции (а), Китае (б), Японии (с) и на Тайване (д). Маркерами показаны эпицентры землетрясений $M \geq 7.0$

[4, 8, 9]. На рисунке 5 представлены пространственные распределения интегрального параметра ΔT_c перед землетрясениями в Турции, Китае, Японии и на Тайване, соответствующие моментам максимума в развитии возмущений температуры.

Как видно, области с наибольшими значениями параметра ΔT_c были локализованы вблизи эпицентров предстоящих землетрясений $M \geq 7.0$ и наблюдались в течение нескольких суток. Положение мезомасштабного возмущения в пространстве оставалось относительно стабильным на протяжении 12–36 часов, а максимумы наблюдались от нескольких часов до нескольких суток до событий.

Можно предположить, что важную роль в литосферно-атмосферном взаимодействии играют волновые процессы, на что указывают многие характерные признаки выделенных возмущений, такие, как размеры возмущенных областей, их локализация относительно эпицентров, наличие двойной тропопаузы и др. Землетрясения могли генерировать низкочастотные волны давления [23], включая инфразвуковые и акустико-гравитационные волны, за счет вертикальных и наклонных колебаний земной поверхности вблизи эпицентров [24]. Достигая области тропопаузы, они изменяли ее тепловую и динамическую структуру [25]. 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.

Согласно теории, гравитационные волны создают колебания зональной и меридиональной компонент ветра с одинаковыми вертикальными длинами волн, но разными фазами и амплитудами [26]. Вращение конца вектора вариаций скорости по часовой стрелке с увеличением высоты в Северном полушарии соответствует переносу волновой энергии вверх [27, 28]. Что можно наблюдать на фрагментах общей картины активности гравитационных волн, представленных графиками вариаций двух составляющих скорости ветра и соответствующими годографами, которые подтверждают,

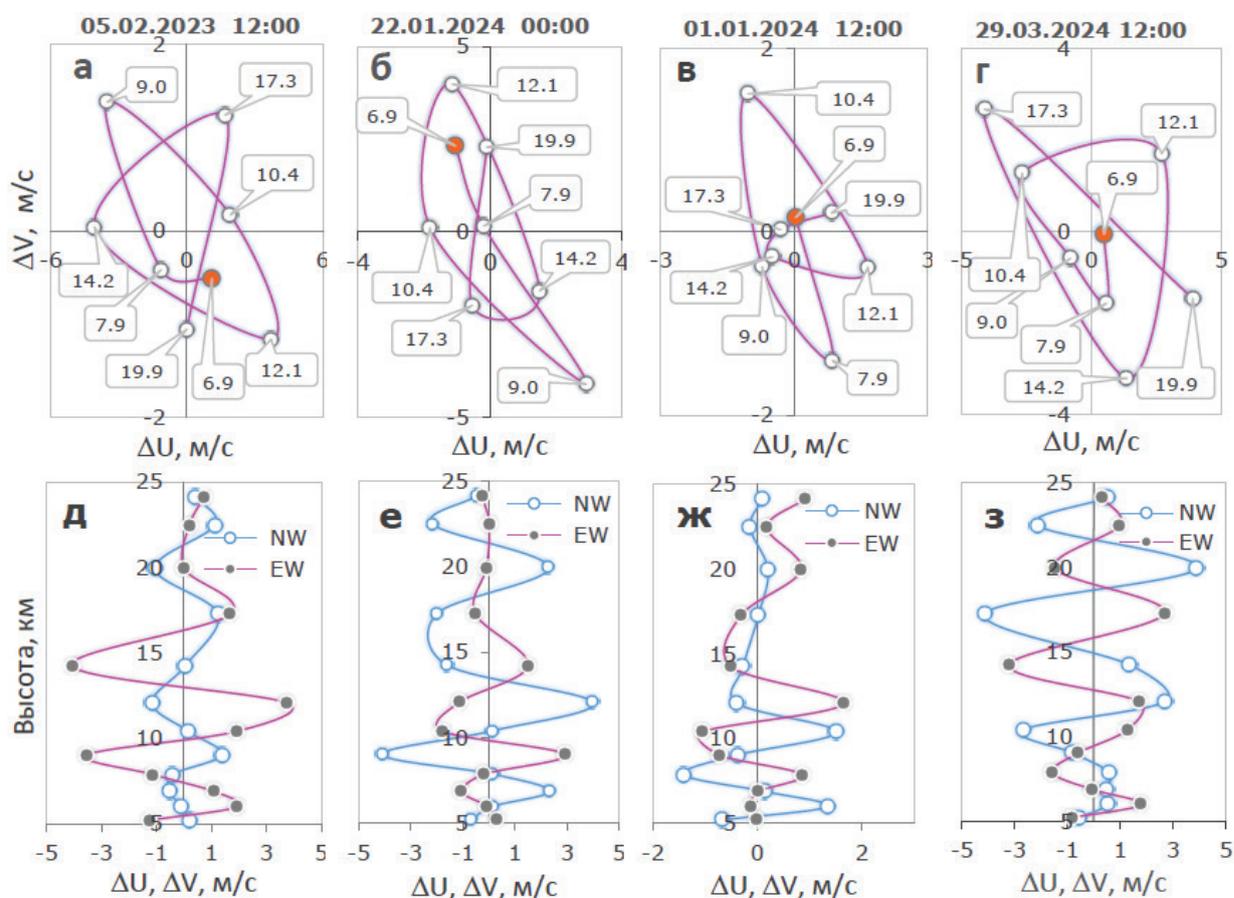


Рисунок 6 – Годографы и соответствующие им высотные профили вариаций зональной ΔU (EW) и меридиональной ΔV (NW) составляющих скорости ветра по данным измерений за 1–3 суток до землетрясений в Турции (а, д), Китае (б, е), Японии (в, ж) и на Тайване (г, з)

что предсейсмические периоды в Китае, Турции, Японии и на Тайване характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх во всем диапазоне исследуемых высот (рисунок 6). Вертикальные длины волн изменялись в интервале 4–8 км.

Выводы. Совместный анализ пространственно-временных изменений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере показал наличие коррелированных аномальных вариаций параметра, свидетельствующих о вероятной связи с процессами подготовки землетрясений в Турции (магнитудой $M = 7.8$ и $M = 7.5$; 06 февраля 2023 г.), Китае ($M = 7.0$; 22 января 2024 г.), Японии ($M = 7.5$; 01 января 2024 г.) и на Тайване ($M = 7.4$; 02 апреля 2024 г.). Максимумы в развитии тепловых аномалий наблюдались за 1–7 суток до землетрясений. Одним из возможных объяснений этой взаимосвязи может являться то, что рассматриваемое землетрясение являлось мощным источником атмосферных гравитационных волн, которые, распространяясь через атмосферу, привели к образованию соответствующих возмущений в области тропопаузы. Анализ годографов вариаций скорости ветра в интервале высот ~5–25 км подтвердил, что предсейсмические периоды характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх.

Общая характерная особенность выделенных мезомасштабных 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 часов.

Автор выражает благодарность сотрудникам Центра данных и информационных служб Годдарда по наукам о Земле НАСА (GES DISC NASA) и Геологической службы США (USGS) за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке по теме № 1021052806454-2-1.5.1. В исследовании также принимали участие сотрудники ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН в рамках проекта по Программе Развития КРСУ.

Поступила: 16.10.24; рецензирована: 30.10.24; принята: 31.10.24.

Литература

1. Jiao Z. Pre-Seismic Temporal Integrated Anomalies from Multiparametric Remote Sensing Data / Z. Jiao, X. Shan // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. Issue 10. P. 2343. DOI: 10.3390/rs14102343.
2. Xu X. Atmospheric Anomaly Analysis Related to Ms > 6.0 Earthquakes in China during 2020–2021 / X. Xu, S. Chen, Y. Yu, S. Zhang // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. Issue 20. P. 4052. DOI: 10.3390/rs13204052.
3. Jiao Z-H. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review / Z-H. Jiao, J. Zhao, X. Shan // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1013–1036. DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
4. Свердлик Л.Г. Сейсмоатмосферные эффекты в изменениях метеопараметров нижней атмосферы по данным спутниковых измерений / Л.Г. Свердлик // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2024. Т. 21. № 2. С. 122–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130.
5. Shah M. Thermal anomalies prior to the 2015 Gorkha (Nepal) earthquake from MODIS Land Surface Temperature and Outgoing Longwave Radiations / M. Shah, M. Khan, H. Ullah, S. Ali // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2018. Vol. 9. No. 1. P. 123–138. DOI: 10.5800/GT-2018-9-1-0341.
6. Picozza P. Looking for Earthquake Precursors from Space: A Critical Review / P. Picozza, L. Conti, A. Sotgiu // *Front. Earth Sci.* 2021. Vol. 9. Article ID 676775. DOI: 10.3389/feart.2021.676775.
7. Yang X. Variation of Thermal Infrared Brightness Temperature Anomalies in the Madoi Earthquake and Associated Earthquakes in the Qinghai-Tibetan Plateau (China) / X. Yang, T.-B. Zhang, Q. Lu, F. Long, M.-J. Liang, W.-W. Wu, Y. Gong, J.-X. Wei, J. Wu // *Front. Earth Sci.* 2022. Vol. 10. Article ID 823540. DOI: 10.3389/feart.2022.823540.
8. Свердлик Л.Г. Атмосферные эффекты крупнейших землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса / Л.Г. Свердлик // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2022. Т. 19. № 2. С. 81–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
9. Свердлик Л.Г. Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии / Л.Г. Свердлик // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2023. Т. 20. № 2. С. 144–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
10. Xu X. Analysis of potential precursory pattern at Earth surface and the above atmosphere and ionosphere preceding two Mw ≥ 7 earthquakes in Mexico in 2020–2021 / X. Xu, S. Chen, S. Zhang, R. Dai // *Earth and Space Science.* 2022. Vol. 9. No. 10. Article ID e2022EA002267. DOI: 10.1029/2022EA002267.
11. Weiyu M. Influences of multiple layers of air temperature differences on tidal forces and tectonic stress before, during and after the Jiujiang earthquake / M. Weiyu, Z. Xuedong, J. Liu, Q. Yao, B. Zhou, C. Yue, C. Kang, X. Lu // *Remote Sens. Environ.* 2018. Vol. 210. P. 159–165.
12. Свердлик Л.Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA / Л.Г. Свердлик // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
13. The USGS (United States Geological Survey). URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (дата обращения: 29.09.2024).
14. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 20.09.2024).
15. Свердлик Л.Г. Использование модифицированного алгоритма STA/LTA для выделения предсейсмических возмущений температуры в нижней атмосфере / Л.Г. Свердлик, А.Э. Ибраев // *Вестник КРСУ.* 2022. Т. 22. № 12. С. 190–196. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.

16. *Свердлик Л.Г., Ибраев А.Э.* Программа IPPLA (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere): Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023612499 РФ. Рег. 03.02.2023.
17. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения: 28.09.2024).
18. *Chetia B.* Magnetic storm time effect on upper and lower atmosphere: An analysis through GPS and remote sensing observation over Guwahati / B. Chetia, M. Devi, S. Kalita, A.K. Barbara // *Indian Journal of Radio & Space Physics*. 2017. Vol. 46. P. 120–130.
19. *Jing F.* Variations of multi-parameter observations in atmosphere related to earthquake / F. Jing, X.H. Shen, C.L. Kang, P. Xiong // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2013. Vol. 13. P. 27–33.
20. *Gettelman A.* Structural diagnostics of the tropopause inversion layer and its evolution / A. Gettelman, T. Wang // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. Vol. 120. No. 1. P. 46–62. DOI: 10.1002/2014JD021846.
21. *Randel W.J.* Observational characteristics of double tropopauses / W.J. Randel, D.J. Seidel, L.L. Pan // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D07309. DOI: 10.1029/2006JD007904.
22. *Yu Z.* Evaluation of Pre-Earthquake Anomalies of Borehole Strain Network by Using Receiver Operating Characteristic Curve / Z. Yu, K. Hattori, K. Zhu, M. Fan, D. Marchetti, X. He, C. Chi // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. No. 3. P. 515. DOI: 10.3390/rs13030515.
23. *Shinagawa H.* A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on 26 December 2004 / H. Shinagawa, T. Iyemori, S. Saito, T. Maruyama // *Earth Planets Space* 2007. Vol. 59. P. 1015–1026.
24. *Kundu S.* Seismogenic Anomalies in Atmospheric Gravity Waves as Observed from SABER/TIMED Satellite during Large Earthquakes / S. Kundu, S. Chowdhury, S. Ghosh, S. Sasmal, D.Z. Politis, S.M. Potirakis, S.-S. Yang, S.K. Chakrabarti, M. Hayakawa // *Hindawi Journal of Sensors*. 2022. Article ID 3201104. DOI: 10.1155/2022/3201104.
25. *Zhang Y.* Temperature Variations in Multiple Air Layers before the Mw 6.2 2014 Ludian Earthquake, Yunnan, China / Y. Zhang, Q. Meng, Z. Wang, X. Lu, D. Hu // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. No. 5. p. 884. DOI: 10.3390/rs13050884.
26. *Strelnikova I.* Advanced hodograph-based analysis technique to derive gravity-wave parameters from lidar observations / I. Strelnikova, G. Baumgarten, F.-J. Lübken // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. Vol. 13. P. 479–499.
27. *Réchou A.* Short vertical-wavelength inertia-gravity waves generated by a jet–front system at Arctic latitudes – VHF radar, radiosondes and numerical modelling / A. Réchou, S. Kirkwood, J. Arnault, P. Dalin // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. Vol. 14. Issue 13. P. 6785–6799.
28. *Свердлик Л.Г.* Спутниковый мониторинг нижней атмосферы для выявления и идентификации предсейсмических возмущений / Л.Г. Свердлик // *Вестник КPCУ*. 2023. Т. 23. № 12. С. 179–185. DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-179-185.