

## Сейсмоатмосферные эффекты в изменениях метеопараметров нижней атмосферы по данным спутниковых измерений

Л. Г. Свердлик

*Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, 720040, Кыргызстан  
Кыргызско-Российский Славянский Университет, Бишкек, 720021, Кыргызстан  
E-mail: l.sverdlik@mail.ru*

Два разрушительных землетрясения с магнитудами 7,9 и 7,3 произошли в Китае 12 мая 2008 г. и 21 мая 2021 г. соответственно. На примере этих событий было проанализировано пространственно-временное распределение предсейсмических возмущений, полученное на основе данных спутникового дистанционного зондирования (глобальный реанализ MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, версия 2)). Для исследования сейсмоатмосферных эффектов и выявления аномалий в изменениях параметров нижней атмосферы был разработан и использован специальный алгоритм анализа спутниковых данных. Результаты показали, что вблизи эпицентральных областей за 1–2 сут до сейсмических событий наблюдались аномальные изменения температуры и скорости ветра в верхней тропосфере и области тропопаузы. Возмущения были синхронизированы с сейсмическим процессом как во времени, так и в пространстве. При этом установлено подобие в проявлениях аномальных вариаций метеопараметров в обоих анализируемых случаях, что, вероятно, можно рассматривать как дополнительное свидетельство взаимодействия литосферы и атмосферы в периоды, предшествующие сильным землетрясениям. Оба сейсмических события произошли на фоне спокойных геомагнитных условий, поэтому аномалии, возможно, были вызваны процессами подготовки землетрясений. В качестве наиболее вероятного механизма формирования возмущений в слоях нижней атмосферы рассматривались акустико-гравитационные волны, генерируемые медленными колебаниями земной поверхности.

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

Одобрена к печати: 21.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130

### Введение

В ряду актуальных направлений современных исследований, основанных на использовании спутникового дистанционного зондирования, важное место занимает мониторинг опасных природных явлений, в частности сейсмической активности (Свердлик, 2022). Уникальные преимущества перед традиционными наземными методами измерений, такие как глобальный охват, доступность и наличие продолжительных по времени данных о вариациях множества геофизических параметров (Wu et al., 2023), предоставляют широкие возможности для обнаружения аномалий, предшествующих крупным землетрясениям, в частности для изучения тепловых явлений в литосфере и атмосфере. Тепловые аномалии, идентифицированные по изменению температуры и выделенные с использованием различных методов анализа (например, (Jiao, Shan, 2021; Panchal et al., 2022)), проявлялись, как правило, за несколько дней до событий и оказались результатом сложных явлений, связанных с преобразованием энергии в больших объёмах напряжённых горных пород. Несмотря на наличие результатов успешного выявления статистически значимых связей между аномалиями температуры и сейсмической активностью, возможность прогнозирования землетрясений на основе спутниковых тепловых инфракрасных измерений остаётся большой проблемой. Так, выполненный в Китае анализ вариаций температуры земной поверхности в период с 2002 по 2018 г. показал, что аномалии слабо коррелировали с предстоящими землетрясениями (Jiao, Shan, 2021).

В последние годы значительный интерес проявляется к нахождению взаимосвязи между сейсмической активностью и изменением вертикального распределения температуры. Такой подход, использующий фактор различия свойств атмосферы с изменением высоты, позволяет более эффективно отличать тепловые аномалии, вызванные, как предполагается, землетрясениями, от аномалий, связанных с влиянием других факторов (например, с изменением уровня солнечной активности и др.) (Свердлик, 2023; Ma et al., 2018; Zhang et al., 2021). Явно выраженные предсейсмические эффекты были обнаружены с использованием результатов зондирования температурных профилей в нижней атмосфере (Biswas et al., 2023; Yang et al., 2019). Причиной наблюдаемых возмущений являлись атмосферные гравитационные волны (АГВ), которые, как считается, служат основным источником вариаций ветра и температуры с характерными вертикальными и пространственными масштабами (Fritts, Alexander, 2003). В настоящей работе проведён анализ пространственно-временной динамики метеопараметров в нижней атмосфере во время двух эпизодов сильной сейсмической активности в Китае.

### Исследуемый регион и используемые данные

Китай характеризуется чрезвычайно сильной сейсмичностью с особенно высокой частотой и интенсивностью землетрясений в области Цинхай-Тибетского нагорья (*англ.* Qinghai-Tibetan Plateau) и в восточной части провинции Сычуань (*англ.* Sichuan), что определяется влиянием субдукции Индийской плиты под Евразийскую плиту. Тектоническая и сейсмическая активность, а также геологические особенности этих регионов стали важной областью многих исследований (например, (Han et al., 2022)). В настоящей работе проведён сравнительный анализ предсейсмических эффектов в периоды прохождения двух крупных событий с магнитудами  $M > 7,0$  и глубинами залегания гипоцентров  $D < 20$  км. Источником сейсмических данных, которые приведены в *таблице*, послужил глобальный каталог землетрясений Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/>).

Характеристики исследуемых землетрясений (EQ)  $M > 7,0$

№	Дата	Время, UTC	Широта, град с. ш.	Долгота, град в. д.	$D$ , км	$M$	Расположение эпицентров
EQ1	12.05.2008	06:28:01	31,00	103,32	19,0	7,9	Сычуань, Китай ( <i>англ.</i> E. Sichuan, China)
EQ2	21.05.2021	18:04:13	34,60	98,25	10,0	7,3	Цинхай, Китай ( <i>англ.</i> S. Qinghai, China)

Применение усовершенствованных алгоритмов обработки спутниковых данных (Свердлик, Ибраев, 2022) позволило повторно обратиться к землетрясениям 12 мая 2008 г. (Свердлик, 2022) и 21 мая 2021 г. (Свердлик, 2023) для того, чтобы более полно охарактеризовать возмущения в области верхней тропосферы/нижней стратосферы (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere — UTLS), предваряющие эти события. Были проанализированы вариации температуры и скорости ветра, полученные в архиве реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, версия 2) и охватывающие большую область, ограниченную координатами  $10-50^\circ$  с.ш. и  $60-140^\circ$  в.д. Загрузка данных производилась в системе GES-DISC (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) ([https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM\\_5.12.4/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM_5.12.4/summary)). Пространственные характеристики возмущений определялись с помощью программного приложения IPPLA (*англ.* Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) (Свердлик, Ибраев, 2022, 2023).

### Анализ и интерпретация результатов спутниковых измерений

Ранее было установлено, что изменения вертикальной структуры атмосферы в периоды сейсмической активности более явно выражены на определённых изобарических уровнях и в определённом диапазоне периодов (Свєрдлик, 2021, 2022). В рассматриваемых случаях наиболее интенсивные вариации температуры наблюдались на уровнях 400–300 гПа ( $h \approx 7,0–9,0$  км) в верхней тропосфере и 150–100 гПа (~14,0–17,0 км) в области тропопаузы и проявлялись в виде вариаций с близкими по величине амплитудами положительных и отрицательных изменений нормированных аномалий температуры ( $\Theta T$ ) (рис. 1).

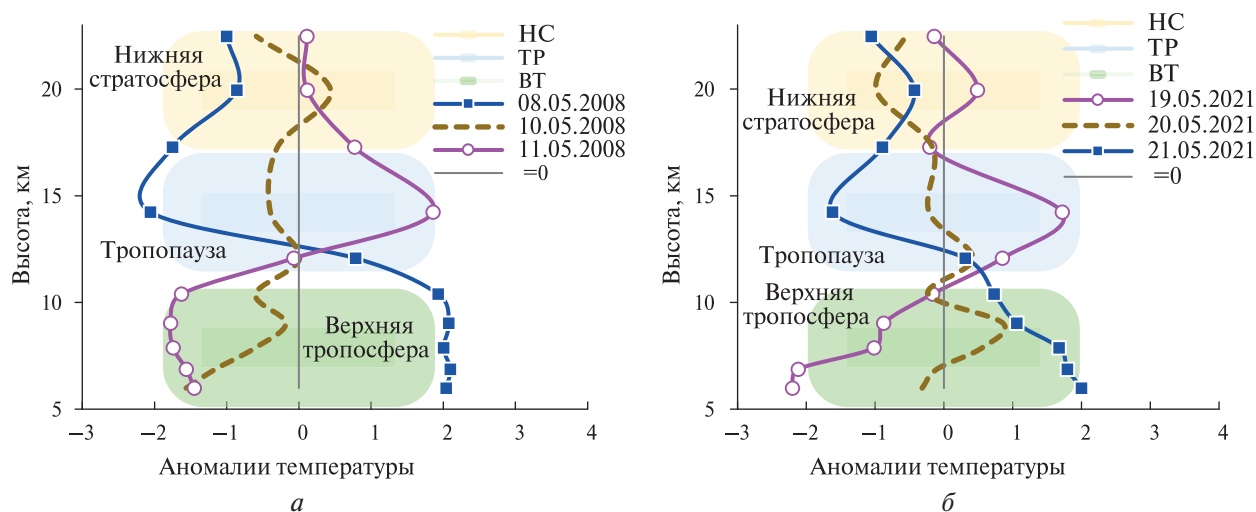


Рис. 1. Вертикальные профили  $\Theta T$  в периоды 8–11 мая 2008 г. над участком с координатами 32–34° с. ш., 100,625–102,5° в. д. вблизи эпицентральной области землетрясения  $M = 7,9$  (а) и 19–21 мая 2021 г. над эпицентром землетрясения  $M = 7,3$  (34–36° с. ш., 97,5–98,75° в. д.) (б)

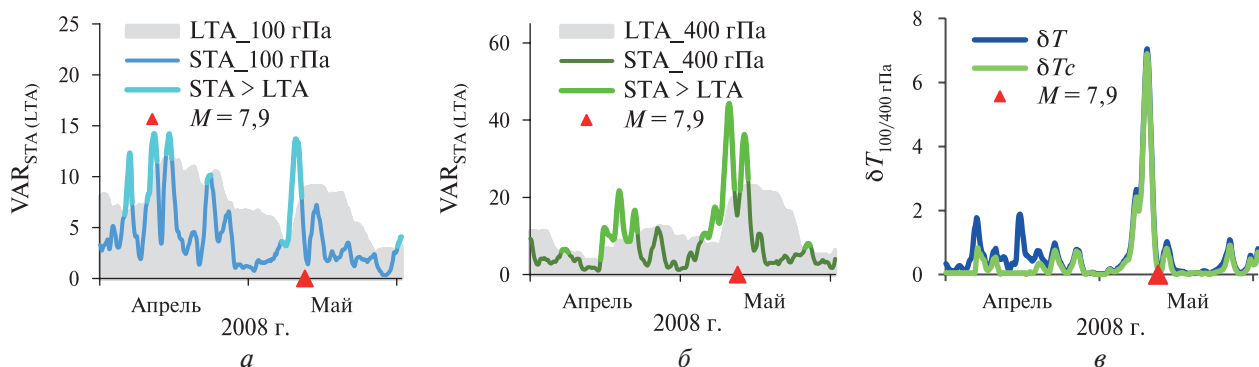


Рис. 2. Вариации скользящих дисперсий температуры в коротком ( $VAR_{STA}$ ) и длинном ( $VAR_{LTA}$ ) окне на уровнях 100 гПа (а) и 400 гПа (б) и соответствующие изменения параметра  $\delta T_C$  (в) в апреле–мае 2008 г.

Графики эволюции высотных профилей  $\Theta T(h)$  перед землетрясениями  $M = 7,3$  и  $M = 7,9$  в Китае отражают медленные волнообразные изменения температуры со сменой фазы колебаний, происходящей через ~36–48 ч. Интенсивность таких вариаций температуры оценивалась сравнением скользящих дисперсий в коротком ( $VAR_{STA}$ ) и длинном ( $VAR_{LTA}$ ) временных окнах и последующем вычислении интегральных параметров  $\delta T_C$  ( $\delta T$ ) (Свєрдлик, 2021). Возмущённому состоянию верхней тропосферы (400 гПа) и области тропопаузы (100 гПа) соответствовали флуктуации температуры, удовлетворяющие условию:  $VAR_{STA} \geq VAR_{LTA}$  (рис. 2а, б, см. с. 124). На рис. 2в показана динамика изменения параметра  $\delta T_C$  в апреле–мае

2008 г., отчётливо демонстрирующая выделенные когерентные предсейсмические аномалии температуры 10–11 мая 2008 г. ( $\delta T_C > 6,0$ ). Поскольку землетрясение произошло в спокойных солнечных и геомагнитных условиях, это даёт основание предполагать вероятную связь аномальных изменений температуры с процессом подготовки события.

Основным фактором, приводящим к высокому уровню параметра  $\delta T_C$ , наряду с аномальным увеличением амплитуды вариаций, период которых составлял  $\sim 4$ – $6$  дней, являлся коррелированный противофазный характер этих изменений, одновременно регистрируемых на двух высотных уровнях атмосферы: в верхней тропосфере и области тропопаузы (Свердлик, 2022). Оценка взаимосвязи между временными рядами приращений температуры ( $\Delta T$ ) на уровнях 400 и 100 гПа показала, что непосредственно перед сейсмическими событиями локальные коэффициенты корреляции достигали значений  $r = -0,96$  (рис. 3а, б). После землетрясений обычно следовало снижение согласованности в изменении температуры. Подобные особенности влияния сейсмической активности на состояние верхней тропосферы проявлялись также в изменении меридиональной  $V_N(t)$  и зональной  $V_E(t)$  составляющих скорости ветра на уровне 200 гПа (рис. 3в, г), которые характеризовались высокой коррелированностью вариаций ( $r = -0,90$ ) в периоды, предшествующие землетрясениям.

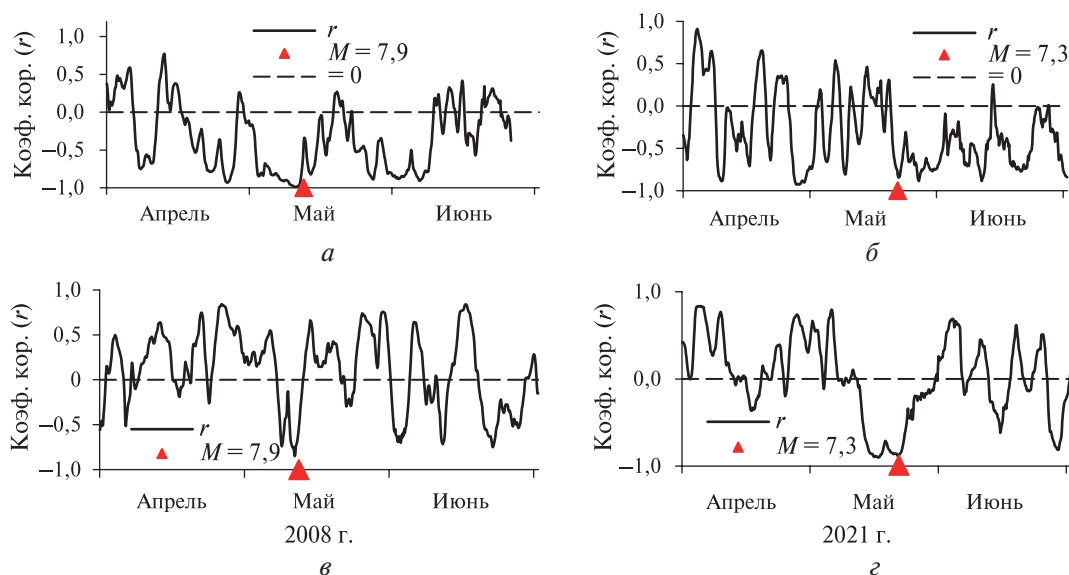


Рис. 3. Временные ряды коэффициентов корреляции ( $r$ ) между приращениями температуры  $\Delta T$  на уровнях 400 и 100 гПа (а, б) и составляющими скорости ветра ( $V_N$  и  $V_E$ ) на уровне 200 гПа (в, г) в апреле – июне 2008 и 2021 гг.

Результаты расчёта пространственно-временного распределения возмущений температуры показали, что формирование областей высоких значений параметра  $\delta T_C$  было чётко синхронизировано с сейсмической активностью не только во времени, но и в пространстве. На рис. 4 (см. с. 126) приведён набор карт, демонстрирующий динамику процесса эволюции аномалий температуры в период с 19 по 22 мая 2021 г., который предшествовал землетрясению  $M = 7,3$  (21.05.2021, 18:04:13 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)) и  $M = 7,9$  (12.05.2008, 06:28:01 UTC). Возмущённые области с горизонтальными размерами, составляющими  $\sim 1000$  км, были устойчиво локализованы вблизи эпицентров на протяжении 24–48 ч, а максимумы в развитии аномалий наблюдались за  $\sim 1$ – $2$  сут до событий. Аномалии температуры стали, вероятно, результатом воздействия АГВ, генерируемых медленными колебаниями земной поверхности и достигающих тропопаузы, где они взаимодействовали со струйным течением и вызывали интенсивные колебания температуры (Свердлик, 2023; Biswas et al., 2023). Волновые процессы могут рассматриваться в качестве наиболее вероятного фактора, который способен привести к длительному нарушению термического состояния в слоях нижней атмосферы (Yang et al., 2019).

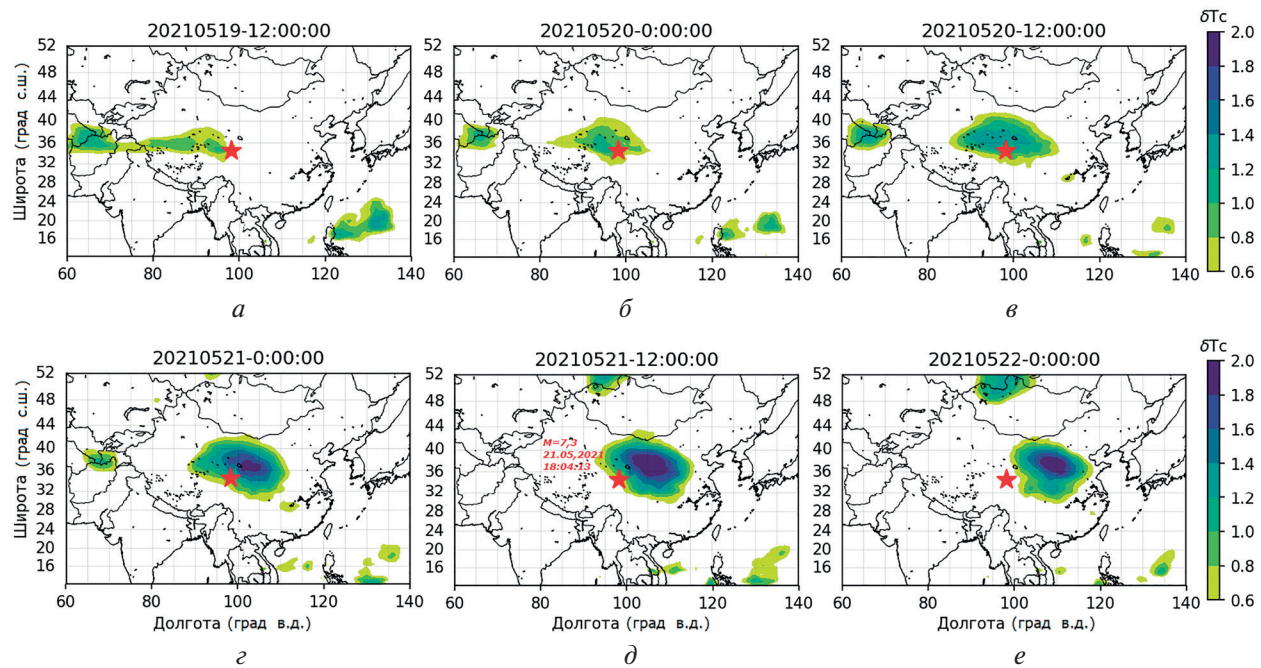


Рис. 4. Эволюция пространственного распределения интегрального параметра  $\delta T_C$  ( $\delta T_C \geq 0,6$ ) в период с 19 по 22 мая 2021 г. (00:00 и 12:00 UTC). Маркером показан эпицентр землетрясения  $M = 7,3$  (21.05.2021, 18:04:13 UTC; 34,60° с. ш., 98,25° в. д.)

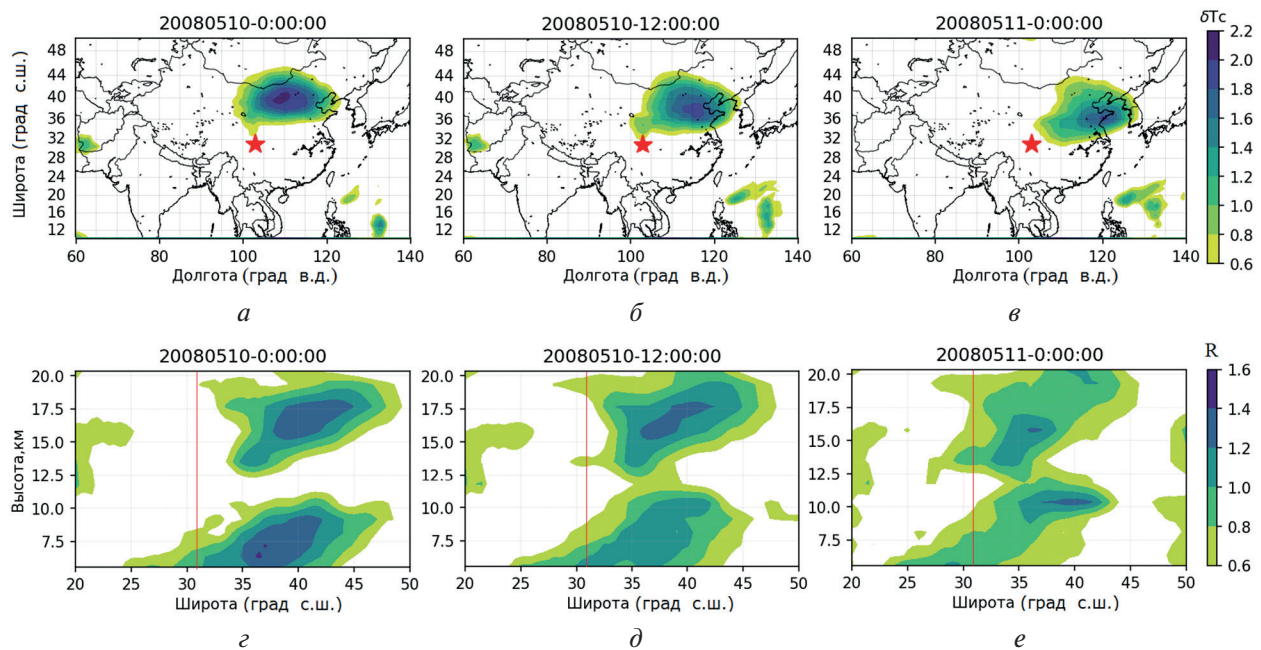
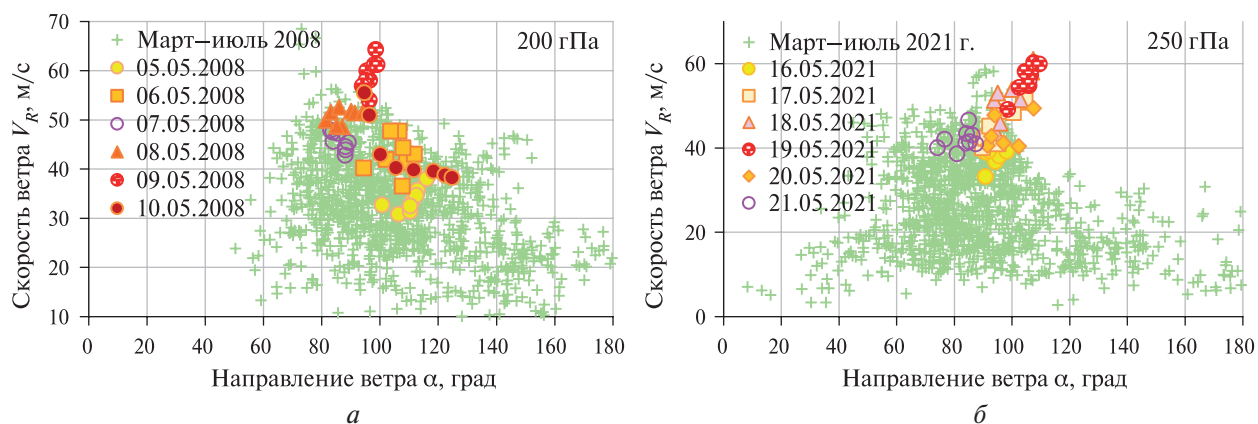


Рис. 5. Карты пространственного распределения интегрального параметра  $\delta T_C$  ( $\delta T_C \geq 0,6$ ) (а–в) 10–11 мая 2008 г. и соответствующие им высотно-широтные сечения наблюдаемых отношений  $R = V_{STA}/V_{LTA} \geq 0,6$  вдоль фиксированной долготы 104° в. д. (г–е). Красная линия — координата эпицентра землетрясения  $M = 7,9$  (12.05.2008; 31,00° с. ш., 103,32° в. д.)

Аналогичные изменения пространственного распределения возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере наблюдались перед землетрясением  $M = 7,9$  (12.05.2008, 06:28:01 UTC) (рис. 5а–в). Сравнивая атмосферные эффекты, следует отметить не только сходство размеров и времени образования, но и то, что тепловые аномалии не совпадали с положениями эпицентров будущих сейсмических событий. С учётом физических

особенностей генерации тепловых аномалий в период подготовки землетрясений процесс их формирования начинается с поверхности Земли. На *рис. 5г–е* приведены высотно-широтные сечения отношения  $R = \text{VAR}_{\text{STA}} / \text{VAR}_{\text{LTA}}$ , рассчитанные вдоль фиксированной долготы  $104^\circ$  в.д., которые демонстрируют развитие такого процесса перед событием 12 мая 2008 г. Динамический процесс в верхней тропосфере, начавшийся за несколько дней до сильного землетрясения (10–11 мая 2008 г.), характеризовался передачей энергии возмущения вверх до более разреженных (в 10–100 раз) слоёв верхней тропосферы и нижней стратосферы. Смещение возмущённых областей относительно эпицентральных областей землетрясений и широкое пространственное распространение возмущений могут быть обусловлены как наклонно распространяющимися гравитационными волнами и возбуждением вторичных волн (Kherani et al., 2021), так и ветровым режимом в верхней тропосфере (Свердлик, 2023).

Важными элементами динамики ветрового режима в верхней тропосфере в средних широтах представляются струйные течения, которые хорошо выражены в диапазоне высот 9–15 км (300–150 гПа) с максимумом скоростей на уровне 200–250 гПа (~11 км). Для исследования полей атмосферного ветра над эпицентральными областями землетрясений в Китае были построены пятимесячные (март – июль 2008 и 2021 гг.) распределения значений модуля вектора скорости ветра ( $V_R$ ) для различных его направлений ( $\alpha$ ), рассчитанные по двум горизонтальным компонентам на уровнях 250 и 200 гПа (*рис. 6*).



*Рис. 6.* Распределение значений модуля скорости ветра для различных его направлений на уровнях 250 и 200 гПа вблизи эпицентров землетрясений в марте – июле 2008 г. (*а*) и 2021 г. (*б*). Цветными маркерами отмечены данные измерений за 5–6 дней до событий  $M > 7,0$

Общей особенностью распределений являлось то, что максимумы  $V_R$  примерно приходились на восточное направление ( $\sim 90^\circ$ ). Однако точки данных  $V_R$  и  $\alpha$  на диаграмме рассеяния, характеризующие изменения ветра в предсейсмические периоды и выделенные красными маркерами (8–9 мая 2008 г. и 18–19 мая 2021 г.), демонстрировали особый характер поведения. В обоих случаях за ~2 сут до землетрясений наблюдалось увеличение модуля вектора скорости ветра  $V_R$  до 55–65 м/с при одновременном изменении направления ( $\alpha$ ) на  $\sim 5$ – $15^\circ$ . Короткопериодные возмущения во временных вариациях скорости ветра были обусловлены согласованным усилением северной ( $V_N$ ) и западной ( $V_E$ ) составляющих на рассматриваемых уровнях давления, что иллюстрируют *рис. 3в* и *г*; это подтверждает результаты, приведённые в работе (Свердлик, 2023).

## Заключение

В дополнение к ранее выполненным исследованиям приведены результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования температурного и ветрового режима в периоды подготовки двух разрушительных землетрясений в Китае с магнитудами  $M = 7,9$  (12 мая 2008 г.) и  $M = 7,3$  (21 мая 2021 г.). В качестве главных передсейсмических признаков в поведе-

нии параметров рассматривались противоположные по знаку аномальные короткопериодные изменения температуры и вариации скорости ветра, происходящие в верхней тропосфере и области тропопаузы. Возмущения температуры, горизонтальный размер которых составлял ~1000 км, и скорости ветра отчётливо наблюдались за 1–2 сут до событий. Установлено, что горизонтальные движения воздушных масс играют важную роль в развитии возмущений температуры, которые проявляются непосредственно перед сейсмическими событиями. Важным результатом стало сходство выделенных возмущений метеопараметров в обоих анализируемых случаях, что, вероятно, может служить проявлением реакции различных слоёв атмосферы на процессы, происходящие в литосфере при подготовке землетрясений. Полученные результаты дают основания считать, что генерация АГВ является одним из важных факторов, влияющих на изменение температуры и горизонтальной скорости ветра, которые наблюдаются непосредственно перед крупными сейсмическими событиями.

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 Научной станции РАН (НС РАН) в г. Бишкеке по теме «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Регистрационный номер темы: 1021052806454-2-1.5.1. В исследовании также принимали участие сотрудники Высокогорной обсерватории физики атмосферных процессов Киргизо-Российского Славянского Университета (КРСУ) и НС РАН в рамках проекта по Программе развития КРСУ.

## Литература

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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 // *Hindawi J. Sensors*. 2023. V. 2023. Article 7159204. DOI: 10.1155/2023/7159204.
7. *Fritts D. C., Alexander M. J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Reviews of Geophysics*. 2003. V. 41. Iss. 1. Article 1003. DOI: 10.1029/2001RG000106.
8. *Han Y., Zang Y., Meng L. et al.* A summary of seismic activities in and around China in 2021 // *Earthquake Research Advances*. 2022. V. 2. Iss. 3. Article 100157. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100157.
9. *Jiao Z.-H., Shan X.* Statistical framework for the evaluation of earthquake forecasting: A case study based on satellite surface temperature anomalies // *J. Asian Earth Sciences*. 2021. V. 211. Article 104710. DOI: 10.1016/j.jseaes.2021.104710.
10. *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.

11. Ma W. Y., Zhang X. D., 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.
12. 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.
13. Wu P., Meng Q., Zhang Y. et al. Coarse-graining research of the thermal infrared anomalies before earthquakes in the Sichuan area on Google Earth engine // *Frontiers in Earth Science*. 2023. V. 11. Article 1101165. DOI: 10.3389/feart.2023.1101165.
14. Yang S.-S., Asano T., Hayakawa M. Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V. 124. Iss. 2. P. 1410–1425. DOI: 10.1029/2018JA026002.
15. Zhang Y., Meng Q., Wang Z., Lu X., Hu D. Temperature Variations in Multiple Air Layers before the Mw 6.2 2014 Ludian Earthquake, Yunnan, China // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 5. Article 884. DOI: 10.3390/rs13050884.

## Seismic-atmospheric effects in changes in meteorological parameters of the lower atmosphere, according to satellite measurements

L. G. Sverdlik

*Research Station RAS in Bishkek City, Bishkek 720049, Kyrgyzstan  
Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek 720000, Kyrgyzstan  
E-mail: l.sverdlik@mail.ru*

Two destructive earthquakes with magnitudes 7.9 and 7.3 occurred in China on May 12, 2008, and May 21, 2021, respectively. The example of these events was used to analyze space-time distributions of pre-seismic perturbations based on satellite remote sensing data (The Global MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) reanalysis). To study the seismic-atmospheric effects and detect anomalies in changes in the parameters of the lower atmosphere, a special algorithm for analyzing satellite data was developed and used. The results showed that near the epicenter regions, 1–2 days before the seismic events, abnormal changes in temperature and wind speed were observed in the upper troposphere and the tropopause region. The disturbances were synchronized with the seismic process in both time and space. At the same time, a similarity was established in the manifestations of abnormal variations of meteorological parameters in both analyzed cases, which can probably be considered as additional evidence of the interaction of the lithosphere and the atmosphere in the periods preceding strong earthquakes. Both seismic events occurred against the background of calm geomagnetic conditions, thus the anomalies were likely to be caused by earthquake preparation processes. Acoustic-gravitational waves generated by slow oscillations of the Earth's surface were considered as the most likely mechanism of the formation of disturbances in the layers of the lower atmosphere.

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

Accepted: 21.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130

## References

1. Sverdlik L. G., Identification of pre-seismic atmospheric perturbations using modified STA/LTA criterion, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.



2. Sverdlik L. G., Atmospheric effects of the largest earthquakes in the Alpine-Himalayan seismic belt, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 81–90 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
3. Sverdlik L. G., Dynamics of perturbations in the lower atmosphere in seismically active regions of Asia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 144–152 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
4. Sverdlik L. G., Ibraev A. E., Use of modified STA/LTA criterion for identification of pre-seismic atmospheric perturbations, *Vestnik KRSU*, 2022, Vol. 22, No. 12, pp. 190–196 (in Russian), DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.
5. Sverdlik L. G., Ibraev A. E., 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).
6. 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, *Hindawi J. Sensors*, 2023, Vol. 2023, Article 7159204, DOI: 10.1155/2023/7159204.
7. Fritts D. C., Alexander M. J., Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Reviews of Geophysics*, 2003, Vol. 41, Issue 1, Article 1003, DOI: 10.1029/2001RG000106.
8. Han Y., Zang Y., Meng L. et al., A summary of seismic activities in and around China in 2021, *Earthquake Research Advances*, 2022, Vol. 2, Article 100157, DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100157.
9. Jiao Z.-H., Shan X., Statistical framework for the evaluation of earthquake forecasting: A case study based on satellite surface temperature anomalies, *J. Asian Earth Sciences*, 2021, Vol. 211, Article 104710, DOI: 10.1016/j.jseaes.2021.104710.
10. 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, Vol. 12, Issue 6, Article 765, DOI: 10.3390/atmos12060765.
11. Ma W. Y., Zhang X. D., 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, Vol. 210, pp. 159–165, DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.003.
12. 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, Vol. 2, Issue 4, pp. 287–303, DOI: 10.1016/j.nhres.2022.12.001.
13. Wu P., Meng Q., Zhang Y. et al., Coarse-graining research of the thermal infrared anomalies before earthquakes in the Sichuan area on Google Earth engine, *Frontiers of Earth Science*, 2023, Vol. 11, Article 1101165, DOI: 10.3389/feart.2023.1101165.
14. Yang S.-S., Asano T., Hayakawa M., Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2019, Vol. 124, Issue 2, pp. 1410–1425, DOI: 10.1029/2018JA026002.
15. Zhang Y., Meng Q., Wang Z., Lu X., Hu D., Temperature Variations in Multiple Air Layers before the Mw 6.2 2014 Ludian Earthquake, Yunnan, China, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 5, Article 884. DOI: 10.3390/rs13050884.