

Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии

Л. Г. Свердлик

*Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, 720049, Кыргызстан
Кыргызско-российский славянский университет, Бишкек, 720000, Кыргызстан
E-mail: l.sverdlik@mail.ru*

Представлены результаты исследования атмосферных эффектов, которые проявлялись в аномальном изменении метеорологических параметров в области верхней тропосферы и нижней стратосферы (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere — UTLS) во время экстремальных сейсмических событий. С использованием возможностей спутникового дистанционного зондирования (глобальный реанализ MERRA-2) для оценки влияния сильной сейсмичности на состояние атмосферы был проведён анализ временных рядов температуры, а также зональной и меридиональной скорости ветра на всех доступных изобарических уровнях в диапазоне высот ~5–25 км. Эти параметры позволили проследить процессы формирования и пространственно-временной трансформации возмущений, совпадающих по времени с процессами подготовки и прохождения сильных землетрясений $M=7,3$, зарегистрированных в зоне Альпийско-Гималайского сейсмического пояса в Ираке (12 ноября 2017 г.) и Китае (21 мая 2021 г.). Выделение и идентификация предсейсмических возмущений температуры выполнялись с применением специального алгоритма. Сопоставление данных о возмущениях температуры в UTLS с вариациями сейсмичности позволило выявить аномальные вариации длительностью до 5 сут, образующиеся за ~1–2 сут до исследуемых событий. Возмущения температуры проявлялись не только на стадии подготовки сильных землетрясений, но и в постсейсмический период. В изменениях ветрового режима также выявлены предсейсмические эффекты. Важным результатом проведённых исследований выступает большое сходство обнаруженных аномальных возмущений метеопараметров в периоды подготовки двух землетрясений, что, вероятно, можно рассматривать как свидетельство взаимодействия литосферы и атмосферы в периоды сейсмической активности.

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

Одобрена к печати: 10.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152

Введение

Исследования воздействия сильных землетрясений на атмосферу с целью выявления закономерностей в изменении различных её параметров имеют продолжительную историю и особенно активно проводятся в последние десятилетия, что связано с качественно новым уровнем и значительным прогрессом в развитии и совершенствовании спутниковых технологий, многообразием информации в данных дистанционного зондирования, а также с доступностью большого количества специализированных сервисов (Jiao et al., 2018).

Одним из проявлений сейсмоатмосферных возмущений выступают тепловые аномалии (Свердлик, 2021; Jiao, Shan, 2022), наблюдаемые на различных уровнях атмосферы от приземного слоя (Jiao et al., 2018) и нижней тропосферы (Ma et al., 2018; Zhang et al., 2021) до стратосферных высот (Yang et al., 2019), что подтверждается экспериментами, проведёнными в разных географических регионах. Область верхней тропосферы – нижней стратосферы (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere — UTLS) представляется наименее изученной с точки зрения установления взаимосвязи между динамикой изменчивости различных её параметров и сейсмической активностью. Несмотря на то что вариации температуры подвержены влиянию множества факторов (Sverdlik, Imashev, 2020), особенность термической структуры UTLS, которая заключается в смене знака вертикального градиента температу-

ры, позволяет более эффективно реализовать выделение сейсмогенных вариаций, используя многоуровневый подход для изучения изменения температуры до, во время и после сильных землетрясений (Ma et al., 2018; Zhang et al., 2021).

Результаты, свидетельствующие о вероятной связи между сейсмической активностью и мезомасштабными возмущениями температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере UTLS, были приведены в ряде ранее опубликованных работ (Кашкин, 2013; Свeрдлик, 2021, 2022). Среди возможных причин развития предсейсмических возмущений температуры в UTLS наряду с атмосферными гравитационными волнами могут рассматриваться циркуляционные процессы, в частности струйные течения (Свeрдлик, Имашев, 2020). Эти важные элементы динамики атмосферы проявляются в изменениях скорости ветра. Они во многом определяют распределение термодинамических параметров, влияя на обменные процессы в UTLS. В качестве критерия для выделения струйных течений часто используют нижний предел скорости 30 м/с (Wu, Tikhonov, 2014).

Известно, что при сильных горизонтальных воздушных течениях происходят значительные вертикальные перемещения и турбулентные движения (Gavrilov, Fukao, 2004), которые сопровождаются изменениями температуры. Рассматривая аномалии температуры как динамические возмущения, можно предположить, что горизонтальные движения воздушных масс становятся одним из механизмов, который играет важную роль в развитии возмущений температуры (Свeрдлик, Имашев, 2020; Ma et al., 2018). Исходя из этого, струйные течения в верхней тропосфере, как и температура в области UTLS, могут рассматриваться в качестве одного из возможных краткосрочных предвестников сильных землетрясений (Wu, Leybourne, 2020; Wu, Tikhonov, 2014).

Цель данного исследования заключается в анализе термической и ветровой структуры UTLS по данным спутниковых измерений, выделение аномальных вариаций метеопараметров и их сопоставление с сейсмическим процессом в регионах Ирака и Китая.

Исследуемый регион, используемые данные и алгоритм обработки

В качестве области исследования была выбрана характеризующаяся частыми землетрясениями зона Альпийско-Гималайского сейсмического пояса (АГСП), ограниченная координатами 20–50° с. ш. и 50–110° в. д. За последние двадцать лет (2002–2022) здесь было зарегистрировано 12 крупных землетрясений с магнитудами $M \geq 7,0$. Ранее были проанализированы пространственно-временные аномалии температуры в периоды подготовки наиболее крупных сейсмических событий, магнитуда которых превышала 7,5 (Свeрдлик, 2022). Для подтверждения выявленных предсейсмических эффектов список землетрясений был дополнен ещё двумя событиями с $M = 7,3$. Их характеристики приведены в *таблице*. Это самые сильные события последних лет, представляющие различные сеймотектонические и метеорологические условия, а также географическое положение и сезоны года. Источником сейсмических данных послужил глобальный каталог землетрясений Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/>).

Характеристики исследуемых землетрясений $M > 7,0$

	Дата	Время, UTC	Широта, град. с. ш.	Долгота, град. в. д.	Глубина очага, км	M	Расположение
EQ1	12.11.2017	18:18:17	34,91	45,96	19,0	7,3	г. Халабджа (<i>англ.</i> Halabja), Ирак
EQ2	21.05.2021	18:04:13	34,60	98,25	10,0		Провинция Цинхай (<i>англ.</i> Qinghai, <i>кит.</i> 青海), Китай

Для исследования предсейсмических атмосферных аномалий использовались трёхмерные массивы температуры и горизонтальной скорости ветра из архива глобального

реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, версия 2) (Rienecker et al., 2011), который играет важную роль в исследованиях динамических процессов в UTLS (см., например, (Manney et al., 2017)). Данные реанализа основаны на наземных, аэростатных и спутниковых наблюдениях и представляют собой синтезированные значения метеопараметров на 12 стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 гПа в узлах равномерной сетки $0,5 \times 0,625^\circ$ с временным разрешением, составляющим $\Delta t = 3$ ч. Продолжительность временных серий составляла не менее ± 90 сут относительно каждого землетрясения. Загрузка метео данных в виде файлов M2I3NPASM версии V5.12.4 в формате netCDF проводилась в разработанной NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства — НАСА) системе GES-DISC (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM_5.12.4/summary) и с помощью интерактивного сервиса GIOVANNI (*англ.* GES-DISC Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure) (<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni>).

Обработка временных рядов температуры (T) выполнялась с использованием известного критерия STA/LTA (*англ.* Short-Term Average/Long-Term Average), который был адаптирован для решения задачи выделения и идентификации предсейсмических аномалий (Свердлик, 2021). Обновлённый алгоритм обеспечивает обработку как исходных данных, так и результатов их преобразования в межсуточные приращения температуры (ΔT) (Свердлик, 2022). Применение алгоритма, подробное описание которого приведено в работе (Свердлик, 2021), позволило свести изменения полей температуры на двух изобарических уровнях к единому численному показателю, представленному в данном случае интегральным параметром аномальных вариаций δT и его скорректированным на коэффициент корреляции значением δT_C . Такое решение 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.) (Zhang et al., 2021). Пространственные характеристики возмущённых областей определялись с помощью программного приложения IPPLA (*англ.* Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) (Свердлик, Ибраев, 2022, 2023).

Наряду с временными и высотными вариациями температуры также был проанализирован ещё один фундаментальный параметр атмосферной динамики, а именно скорость ветра. В данном случае ветер рассматривался как двумерная векторная величина. Для интерпретации состояния ветрового режима вместе с зональной (V_E) и меридиональной (V_N) компонентами горизонтальной скорости ветра представлены результаты расчёта модуля результирующего вектора скорости (V_R) и направления ветра (α).

Пред- и постсейсмические возмущения температуры

Несмотря на то что предсейсмические возмущения температуры не всегда отчётливо различимы на фоне других процессов, развивающихся в атмосфере, в большинстве случаев пространственная структура и динамика аномалий температуры в области тропопаузы указывали на вероятную связь с сильной сейсмичностью. Пример формирования такого достаточно хорошо выраженного возмущения иллюстрирует высотно-временной разрез приращений температуры ΔT , построенный в интервале высот 5,0–25,0 км над эпицентральной областью землетрясения в Китае (*рис. 1а*, см. с. 147).

Как видно, положительная аномалия температуры начала формироваться на высоте 12 км примерно за 5 сут до события. За двое суток до землетрясения возмущение приобрело отчётливую слоистую структуру. Наиболее интенсивные противофазные положительные (до 10 К) и отрицательные (–10 К) изменения температуры происходили на уровнях 300 гПа (~9–11 км) и 100 гПа (~17 км) соответственно (*рис. 1б*). Такие изменения вертикальной структуры температуры в UTLS служили одним из предсейсмических признаков (Свердлик, Имашев, 2020). Возмущение ΔT продолжало наблюдаться спустя сутки после события.

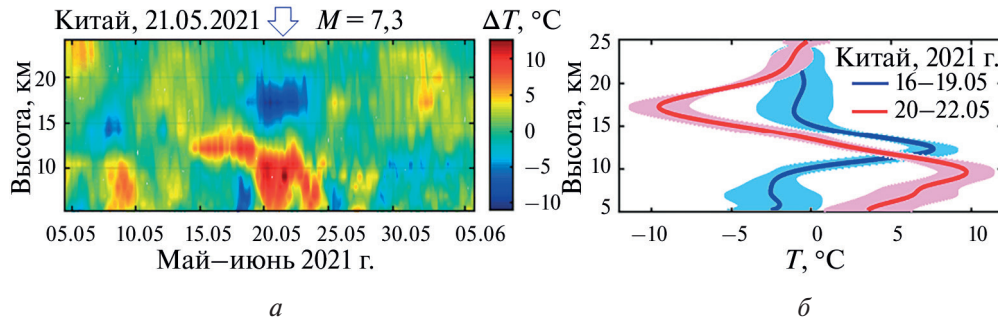


Рис. 1. Высотно-временное распределение ΔT с 5 мая по 5 июня 2021 г. (а); средние вертикальные профили приращения температуры (плюс-минус стандартное отклонение) над эпицентральной областью землетрясения в Китае, усреднённые в периоды 16–19 мая и 20–22 мая 2021 г. (б)

Результаты расчёта карт распределения параметра δT_C до, во время и после землетрясения в Китае показали, что область с максимальными значениями δT_C была локализована вблизи эпицентра предстоящего землетрясения $M = 7,3$ (рис. 2) и наблюдалась в течение двух-трёх дней (20–22 мая 2021 г.), что можно интерпретировать как проявление мезомасштабного возмущения, источником которого выступает локальное усиление интенсивности атмосферных гравитационных волн (АГВ) (Gavrilov, Fukao, 2004). Горизонтальные размеры аномальной области составляли порядка нескольких сотен километров, что согласуется с результатами предыдущих исследований (Свєрдлик, 2021, 2022), и соответствовали радиусу области подготовки землетрясения (Dobrovolsky et al., 1979). Положение мезомасштабного возмущения в пространстве оставалось практически неизменным на протяжении 18 ч (с 00:00 по 18:00 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 20 мая 2021 г.), а максимум наблюдался за ~ 6 ч до события $M = 7,3$ в 12:00 UTC (21 мая 2021 г.) (см. рис. 2е).

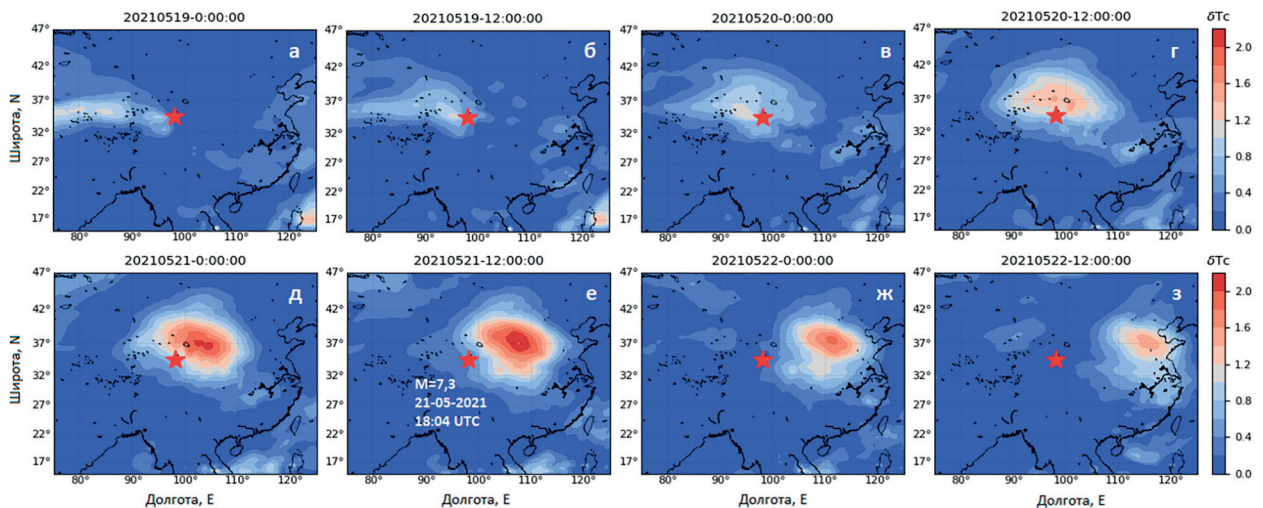


Рис. 2. Карты пространственного распределения интегрального параметра δT_C , рассчитанные через 12-часовые интервалы времени (00:00 и 12:00 UTC) в период с 19 по 22 мая 2021 г. Маркером показан эпицентр землетрясения $M = 7,3$ (34,60° с. ш., 98,25° в. д.)

Возмущения в пространственно-временных изменениях скорости ветра

Для анализа ветрового режима над эпицентрными областями землетрясений в Ираке (июль–ноябрь 2017 г.) и Китае (март–июль 2021 г.) было построено распределение всех трёхчасовых значений модуля вектора скорости ветра (V_R) для различных его направлений (α)

на уровне 200 гПа (~12,0 км), содержащие по 1240 точек данных (рис. 3а и в). Возмущения, наблюдаемые в изменениях температуры 12 ноября 2017 г. и 20 мая 2021 г. и представленные выше, отчётливо проявлялись и в поле ветра. Видно, что в обоих случаях за 3–30 ч до землетрясений наблюдалось увеличение модуля вектора скорости ветра до 60–70 м/с, обусловленное ростом меридиональной (V_N) составляющей скорости ветра, о чём свидетельствует изменение направления V_R на ~10–15°. Распределения точек данных V_R и α на диаграмме рассеяния, характеризующие изменения ветра в пятидневные предсейсмические периоды (8–13 ноября 2017 г. и 16–21 мая 2021 г.), выделены цветными маркерами и демонстрируют схожий характер поведения V_R и α . Как видно из графиков временной эволюции вертикальных профилей ветра (рис. 3б и г), уровень 200 гПа (~12 км) соответствовал горизонтальной оси струйного течения с максимальной скоростью ветра. По краям струйного течения (на 300 и 100 гПа) такой предсейсмический эффект в вариациях скорости ветра был выражен более слабо или совсем не наблюдался.

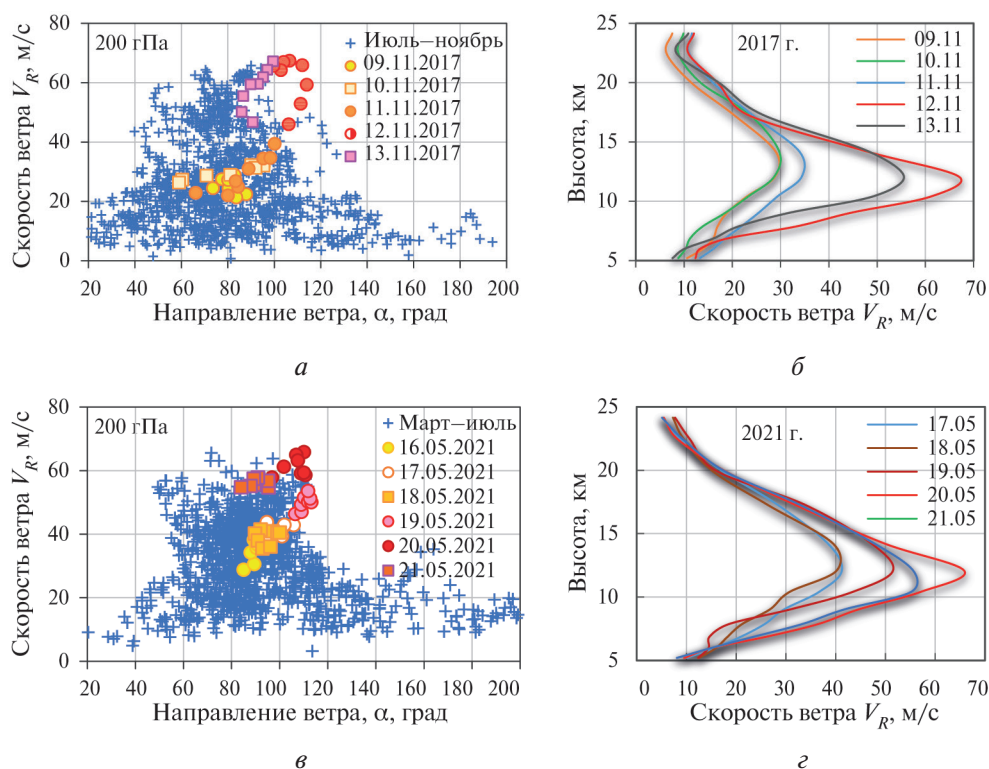


Рис. 3. Распределение модуля скорости ветра различного направления на уровне 200 гПа (~12,0 км) над эпицентрными областями землетрясений в июле–ноябре 2017 г. (а) и марте–июле 2021 г. (в); вертикальные профили $V_R(h)$ в предшествующие событиям 5–6 дней (б, г)

Карты пространственного распределения зональной компоненты скорости ветра на уровне 200 гПа показали, что струйные течения в выделенные пятидневные периоды вели себя достаточно устойчиво и прослеживались в виде почти непрерывного пояса сильных западных ветров, пересекающих весь исследуемый регион (рис. 4, см. с. 149). Скорость движения в полосах струй была существенно неоднородной с чередованием областей более сильного и слабого ветра. За 2 сут до землетрясения в Китае (19 мая 2021 г.) и за сутки до события в Ираке (12 ноября 2017 г.) наблюдалась практически полная идентичность формы струйных течений, а области наиболее высокой скорости ветра примерно указывали на расположение эпицентральных областей землетрясений.

Влияние сильной сейсмической активности на состояние нижней атмосферы проявлялось не только в динамике метеопараметров, но и в изменении взаимосвязи между ними. Примером может служить анализ корреляционной связи между вариациями меридиональной

$V_N(t)$ и зональной $V_E(t)$ составляющих скорости ветра. Установлено, что на фоне достаточно продолжительных периодов рассогласованного поведения $V_N(t)$ и $V_E(t)$ выделялись интервалы времени их синхронных противофазных вариаций, которые характеризовались высокими отрицательными коэффициентами корреляции ($r = -0,95 \dots -0,96$) и проявлялись непосредственно перед сильными землетрясениями (рис. 5). Наибольшие коэффициенты корреляции, рассчитанные по значениям за предшествующие 5 сут, приходились на область высот 9–17 км, соответствующую максимальной скорости ветра ($V_R > 30$ м/с). На рисунке представлены диаграммы профилей коэффициентов корреляции за 3 мес (736 и 728 профилей соответственно для Ирака и Китая).

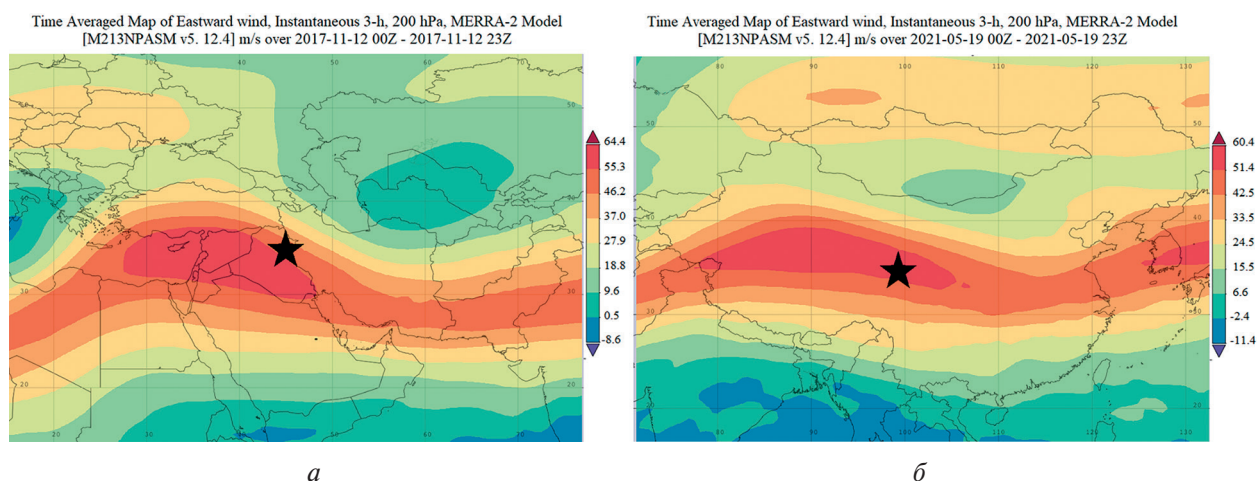


Рис. 4. Пространственное распределение среднесуточной скорости зонального ветра (200 гПа) перед землетрясениями в Ираке (12 ноября 2017 г.) (а) и Китае (19 мая 2021 г.) (б). Маркерами показаны эпицентры землетрясений $M = 7,3$, произошедших 12 ноября 2017 г. и 21 мая 2021 г.

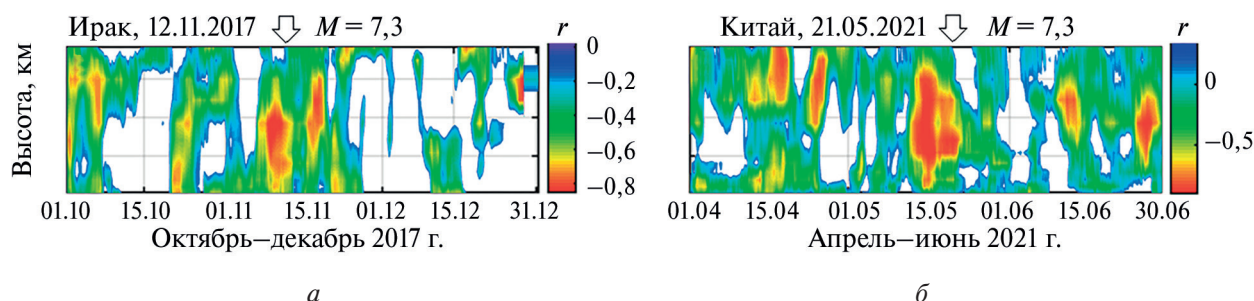


Рис. 5. Высотно-временное распределение отрицательных значений коэффициента корреляции в Ираке (октябрь – декабрь 2017 г.) (а) и Китае (апрель – июнь 2021 г.) (б)

Таким образом, пространственно-временная эволюция температурных возмущений в верхней тропосфере достаточно хорошо согласуется с изменениями ветрового режима на соответствующих уровнях и сейсмичностью в зоне АГСП. Это может означать, что возникающие на поверхности Земли предсейсмические эффекты приводят к изменению параметров атмосферы (Наукава et al., 2016). Под действием этих процессов (в частности, генерации АГВ) изменяется скорость воздушного потока над эпицентральной областью или вблизи неё (Wu, Tikhonov, 2014). Заметное усиление активности гравитационных волн было выявлено вблизи струйных течений (Plougonven, Zhang, 2014). Формирование возмущённых областей температуры, располагающихся вблизи эпицентров сейсмических событий и сохраняющих свою форму, размер и положение в течение двенадцати и более часов (Свердлик, Имашев, 2020) вместе с аномалиями струйного течения в верхней тропосфере (Wu, Tikhonov, 2014) могут служить признаками вероятного сильного землетрясения.

Заключение

В продолжение ранее выполненных исследований предсейсмических эффектов, основанных на данных спутникового дистанционного зондирования (реанализ MERRA-2), были проанализированы изменения температурного и ветрового режима в периоды подготовки сильных землетрясений $M = 7,3$, зарегистрированных в зоне Альпийско-Гималайского сейсмического пояса вблизи г. Халабджа в Ираке 12 ноября 2017 г. и в провинции Цинхай на северо-западе Китая 21 мая 2021 г. Получены новые результаты, свидетельствующие о вероятной связи аномальных изменений метеопараметров в верхней тропосфере и нижней стратосфере с экстремальными сейсмическими событиями. Особенность выявленных возмущений состояла в том, что они проявлялись не только за 1–2 сут до сейсмических событий, но также спустя 1–2 сут после них. Также наблюдалось согласие между мезомасштабными возмущениями температуры и структурой зональных струйных течений в верхней тропосфере. Важно отметить большое сходство в проявлениях аномальных вариаций метеопараметров в обоих анализируемых случаях, что, вероятно, можно рассматривать как свидетельство взаимодействия литосферы и атмосферы в периоды сейсмической активности.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC и USGS за предоставление свободного доступа к данным измерений.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания Научной станции 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 1021052806454-2-1.5.1.

Литература

1. *Кашкин В. Б.* Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
2. *Свердлик Л. Г.* Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
3. *Свердлик Л. Г.* Атмосферные эффекты крупнейших землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 81–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
4. *Свердлик Л. Г., 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 РФ. Рег. 03.02.2023.
6. *Свердлик Л. Г., Имашев С. А.* Пространственно-временное распределение возмущений в атмосфере перед сильными землетрясениями в Тянь-Шане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 114–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122.
7. *Dobrovolsky I., Zubkov S., Miachkin V.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure and Applied Geophysics. 1979. V. 117. No. 5. P. 1025–1044.
8. *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. No. 11. P. 3889–3898. DOI: 10.5194/angeo-22-3889-2004.
9. *Hayakawa M., Asano T., Rozhnoi A., Solovieva M.* Seismo-ionospheric perturbations as observed by sub-ionospheric VLF/LF propagation, and their generation hypothesis in terms of atmospheric gravity waves // Intern. J. Electronics and Applied Research (IJEAR). 2016. V. 3. Iss. 1. P. 40–61.
10. *Jiao Z., Shan X.* Pre-Seismic Temporal Integrated Anomalies from Multiparametric Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 10. Art. No. 2343. DOI: 10.3390/rs14102343.
11. *Jiao Z-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018. V. 18. No. 4. P. 1013–1036. DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
12. *Ma W., Zhang X., Jun L., Qi Y., Bo Z., Chong Y., Chunli K., Xian L.* 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.

13. Manney G. L., Hegglin M. I., Lawrence Z. D., Wargan K., Millán L. F., Schwartz M. J., Santee M. L., Lambert A., Pawson S., Knosp B. W., Fuller R. A., Daffer W. H. Reanalysis comparisons of upper tropospheric–lower stratospheric jets and multiple tropopause // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. V. 17. No. 18. P. 11541–11566. DOI: 10.5194/acp-17-11541-2017.
14. Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // *Reviews of Geophysics*. 2014. V. 52. P. 33–76. DOI: 10.1002/2012RG000419.
15. Rienecker M. M., Suarez M. J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M. G., Schubert S. D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., Da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R. D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C. R., Reichle R., Robertson F. R., Ruddick A. G., Sienkiewicz M., Woollen J. MERRA: NASA's Modern-Era retrospective analysis for research and applications // *J. Climate*. 2011. V. 24. P. 3624–3648. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
16. Sverdlik L., Imashev S. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // *MAUSAM*. 2020. V. 71. No. 3. P. 481–490. <https://doi.org/10.54302/mausam.v71i3.49>.
17. Wu H.-C., Leybourne B. Using Jet Stream's Precursors to Make Earthquake Forecast // *Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2020. V. 18. No. 4. P. 62–65.
18. Wu H.-C., Tikhonov I. N. Jet streams anomalies as possible short-term precursors of earthquakes with $M > 6.0$ // *Research in Geophysics*. 2014. V. 4. No. 1. P. 12–18. DOI: 10.4081/rg.2014.4939.
19. 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.
20. 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. Art. No. 884. DOI: 10.3390/rs13050884.

Dynamics of perturbations in the lower atmosphere in seismically active regions of Asia

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

The work presents the results of the study of atmospheric effects, which manifested themselves in an abnormal change in meteorological parameters in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) during extreme seismic events. Using the capabilities of satellite remote sensing (global MERRA-2 reanalysis) to assess the effect of strong seismicity on the state of the atmosphere, an analysis of time series of temperature, as well as zonal and meridional wind speeds at all available isobaric levels in the range of altitudes of ~5–25 km was carried out. These parameters made it possible to trace the processes of formation and spatiotemporal transformation of perturbations coinciding in time with the processes of preparation and passage of strong earthquakes $M = 7,3$, recorded in the zone of the Alpine-Himalayan seismic zone in Iraq (November 12, 2017) and China (May 21, 2021). Isolation and identification of pre-seismic temperature perturbations was performed using a special algorithm. Comparison of UTLS temperature perturbation data with seismicity variations revealed abnormal variations lasting up to 5 days, which were formed ~1–2 days before the studied events. Temperature disturbances were manifested not only at the stage of preparation of strong earthquakes, but also in the post-seismic period. In the changes in the wind regime, pre-seismic effects were also revealed. An important result of the studies is the large similarity of the detected abnormal disturbances of meteorological parameters during the periods of preparation of two earthquakes, which can probably be considered as evidence of the interaction of the lithosphere and the atmosphere during periods of seismic activity.

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

Accepted: 10.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152

References

1. Kashkin V. B., Inner gravity waves in the troposphere, *Optika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 26, No. 10, pp. 908–916 (in Russian).
2. Sverdlik L. G., Identification of pre-seismic atmospheric perturbations using modified STA/LTA criterion, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
3. Sverdlik L. G., Atmospheric effects of the largest earthquakes in the Alpine-Himalayan seismic belt, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 81–90 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
4. Sverdlik L. G., Ibraev A. E., Use of the modified STA/LTA algorithm for detection pre-seismic temperature perturbations in the lower atmosphere, *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo slavyanskogo universiteta*, 2022, 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. Sverdlik L. G., Imashev S. A., Spatial-temporal distribution of atmospheric perturbations before strong earthquakes in Tien-Shan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 114–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122.
7. Dobrovolsky I., Zubkov S., Miachkin V., Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Applied Geophysics*, 1979, Vol. 117, No. 5, pp. 1025–1044.
8. 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, Vol. 22, No. 11, pp. 3889–3898, DOI: 10.5194/angeo-22-3889-2004.
9. Hayakawa M., Asano T., Rozhnoi A., Solovieva M., Seismo-ionospheric perturbations as observed by sub-ionospheric VLF/LF propagation, and their generation hypothesis in terms of atmospheric gravity waves, *Intern. J. Electronics and Applied Research (IJEAR)*, 2016, Vol. 3, Issue 1, pp. 40–61.
10. Jiao Z., Shan X., Pre-Seismic Temporal Integrated Anomalies from Multiparametric Remote Sensing Data, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Issue 10, Art. No. 2343, DOI: 10.3390/rs14102343.
11. Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X., Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, Vol. 18, No. 4, pp. 1013–1036, DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
12. Ma W., Zhang X., Jun L., Qi Y., Bo Z., Chong Y., Chunli K., Xian L., 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.
13. Manney G. L., Hegglin M. I., Lawrence Z. D., Wangan K., Millán L. F., Schwartz M. J., Santee M. L., Lambert A., Pawson S., Knosp B. W., Fuller R. A., Daffer W. H., Reanalysis comparisons of upper tropospheric–lower stratospheric jets and multiple tropopauses, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, No. 18, pp. 11541–11566, DOI: 10.5194/acp-17-11541-2017.
14. Plougonven R., Zhang F., Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, *Reviews of Geophysics*, 2014, Vol. 52, pp. 33–76, DOI: 10.1002/2012RG000419.
15. Rienecker M. M., Suarez M. J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M. G., Schubert S. D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., Da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R. D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C. R., Reichle R., Robertson F. R., Ruddick A. G., Sienkiewicz M., Woollen J., MERRA: NASA’s Modern-Era retrospective analysis for research and applications, *J. Climate*, 2011, Vol. 24, pp. 3624–3648, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1
16. Sverdlik L., Imashev S., Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan, *MAUSAM*, 2020, Vol. 71, No. 3, pp. 481–490, <https://doi.org/10.54302/mausam.v71i3.49>.
17. Wu H.-C., Leybourne B., Using Jet Stream’s Precursors to Make Earthquake Forecast, *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2020, Vol. 18, No. 4, pp. 62–65.
18. Wu H.-C., Tikhonov I. N., Jet streams anomalies as possible short-term precursors of earthquakes with $M > 6.0$, *Research in Geophysics*, 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 12–18, DOI: 10.4081/rg.2014.4939.
19. 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.
20. 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, Art. No. 884, DOI: 10.3390/rs13050884.