

Динамика предсейсмических вариаций скорости ветра в регионе Центральной Азии

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 результаты анализа временной изменчивости горизонтальной скорости ветра в верхней тропосфере и нижней стратосфере в периоды подготовки шести землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, которые произошли в сейсмически активном регионе Центральной Азии в 2015–2016 гг. Для выделения и идентификации предсейсмических эффектов в изменениях скорости ветра использовались данные измерений из архива реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2). Было установлено, что наблюдались характерные особенности предсейсмических изменений поля ветра. За несколько суток до всех исследуемых землетрясений скорость ветра в верхней тропосфере достигала максимальных значений. Используя полиномиальную аппроксимацию в качестве фона, оценивались флуктуации зональной и меридиональной компоненты ветра в области высот 5–24 км. Предполагая, что возмущения скорости ветра вызваны атмосферными гравитационными волнами, с использованием метода анализа на основе построения годографов были проанализированы направления распространения гравитационных волн. Установлено, что периоды подготовки землетрясений характеризовались усилением волновой активности в верхней тропосфере с преимущественным переносом волновой энергии вверх. В целом, несмотря на сложный характер влияния процессов подготовки сильных землетрясений на динамику атмосферы в пространстве и во времени, полученные результаты свидетельствуют о важности использования метеорологических параметров для исследований предсейсмических атмосферных эффектов.

Ключевые слова: спутниковые измерения, скорость ветра, землетрясение, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, возмущение, годограф

Одобрена к печати: 03.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-150-161

Введение

Ранее были представлены результаты анализа вариаций температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере UTLS (*англ.* Upper Troposphere/Lower Stratosphere) по данным реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) в периоды подготовки шести крупных землетрясений с магнитудой $M > 6,0$, зарегистрированных в 2015–2016 гг. в сейсмически активном регионе Центральной Азии (Афганистан, Таджикистан и Кыргызстан) (Свердлик, 2025б). Как было установлено, в процессе подготовки крупных сейсмических событий вертикальная структура температуры UTLS претерпевала значительные изменения (Свердлик, 2023), которые могли быть вызваны как геохимическими и электромагнитными процессами в земной коре (Alimoradi et al., 2024; Rasheed et al., 2024), так и распространяющимися вверх от эпицентральной области атмосферными гравитационными волнами, возбуждение которых обусловлено вертикальными и горизонтальными смещениями земной поверхности (Свердлик, 2024; Meng et al., 2019).

На основе использования уникальных термических и динамических характеристик атмосферы в области тропопаузы был создан комплекс программ для выделения в изменениях температуры когерентных волновых структур и последующей визуализации тепловых аномалий (Свердлик, 2021). Возмущения температуры идентифицированы по соответствующим изменениям параметров аномальных вариаций δT и δT_c . Аномальными считались значения

$\delta T_c > 1,5$ (Свердлик, 2025б). Устойчивые в пространстве и времени мезомасштабные возмущения температуры отчётливо наблюдались за 1–8 сут до событий в пределах областей, рассчитанных с использованием радиуса Добровольского (Dobrovolsky et al., 1979), что послужило основанием для вывода о проявлении реакции слоёв нижней атмосферы на процессы, происходящие в литосфере при подготовке сильных землетрясений.

С сильными землетрясениями связано множество физических, химических и механических процессов, оказывающих влияние на изменения различных параметров атмосферы, которые регистрировались в определённых зонах и в определённое время (Bardhan et al., 2022). Несмотря на многочисленность и разнообразие исследований предсейсмических аномальных явлений в нижней атмосфере, тема особенностей изменения ветрового режима практически не затрагивалась, за редким исключением (например, (Wu, Tikhonov, 2014)).

Настоящая работа стала продолжением исследований атмосферных эффектов сильных землетрясений и в некоторой степени восполняет этот пробел, дополняя информацию о ранее выделенных сейсмотермических аномалиях данными космического мониторинга пространственно-временного распределения зонального и меридионального ветра в UTLS. Что даёт основу для реализации комплексного подхода на основе изучения возможной связи температурных аномалий с вариациями скорости ветра и тектонической активностью (Свердлик, 2023). Цель исследования состояла в выявлении характерных особенностей вариаций скорости ветра над эпицентрными областями и зонами подготовки землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$ на основе анализа горизонтальных движений воздушных масс и волновых процессов в нижней атмосфере, которые, предположительно, играют важную роль в развитии предсейсмических возмущений температуры.

Исследуемый регион и используемые данные

Исследование вариаций скорости ветра проводилось в Памиро-Гиндукушской сейсмогенной зоне ($34\text{--}42^\circ$ с. ш. и $68\text{--}76^\circ$ в. д.) и было сосредоточено на одном из наиболее выраженных всплесков сейсмической активности, который наблюдался в 2015–2016 гг. По данным Геологической службы США USGS (*англ.* United States Geological Survey) (<https://earthquake.usgs.gov/>) в этом регионе были зарегистрированы шесть событий с магнитудой $M > 6,0$: $M = 7,5$ (26.10.2015; $36,52^\circ$ с. ш.; $70,37^\circ$ в. д.) в Афганистане; $M = 7,2$ (07.12.2015; $38,21^\circ$ с. ш.; $72,78^\circ$ в. д.) в Таджикистане; $M = 6,3$ (25.12.2015; $36,49^\circ$ с. ш.; $71,13^\circ$ в. д.) и $M = 6,6$ (10.04.2016; $36,47^\circ$ с. ш.; $71,13^\circ$ в. д.) в Афганистане; $M = 6,4$ (26.06.2016; $39,48^\circ$ с. ш.; $73,34^\circ$ в. д.) в Кыргызстане; $M = 6,6$ (25.11.2016; $39,27^\circ$ с. ш.; $73,98^\circ$ в. д.) в Таджикистане. В этой последовательности событий землетрясение магнитудой 7,2 занимает особое место. Считается, что именно после него сейсмичность региона возросла (Liu et al., 2024). Более того, такое скопление крупных землетрясений поднимает вопросы о возможных механизмах передачи напряжений во времени и инициировании последующих событий $M > 6,0$ (Shi et al., 2023).

Для анализа временных и высотных вариаций скорости ветра в области UTLS использовались данные реанализа MERRA-2. Загрузка данных проводилась в разработанной NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) 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>). Данные реанализа представляют собой трёхмерные массивы синтезированных значений метеопараметров на 12 стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 гПа в узлах равномерной сетки $0,5 \times 0,625^\circ$ с временным разрешением $\Delta t = 3$ ч. Продолжительность временных серий составляла не менее ± 60 сут относительно каждого исследуемого землетрясения. В процессе выявления особенностей ветрового режима над эпицентрными областями землетрясений зональная (V_E или U) и меридиональная (V_N или V) компоненты горизонтальной скорости ветра пересчитывались в значения модуля результирующего вектора скорости V_R и направления ветра α .

Результаты выделения предсейсмических возмущений скорости ветра в UTLS

Результаты анализа профилей температуры на уровнях от 500 до 40 гПа, приведённых в работе (Свердлик, 2025б), показали, что в периоды, предшествующие сейсмической активности, эта область атмосферы (UTLS) находилась в возмущённом состоянии, что позволяло предположить наличие возмущений в изменении других параметров атмосферы, например горизонтальной скорости ветра, поскольку они часто имеют общие физические механизмы (Свердлик, 2024; Wooten, 2011). Подтверждением могут служить показанные на *рис. 1* наборы профилей модуля вектора скорости V_R в периоды сейсмоактивности в Таджикистане (1 августа – 31 декабря 2015 г.) и в Афганистане и Кыргызстане (1 марта – 10 июля 2016 г.), соответствующие пространственному расположению областей, в которых выделены наиболее интенсивные тепловые аномалии ($34,0^\circ$ с. ш.; $73,0^\circ$ в. д.) и ($40,0^\circ$ с. ш.; $78,5^\circ$ в. д.).

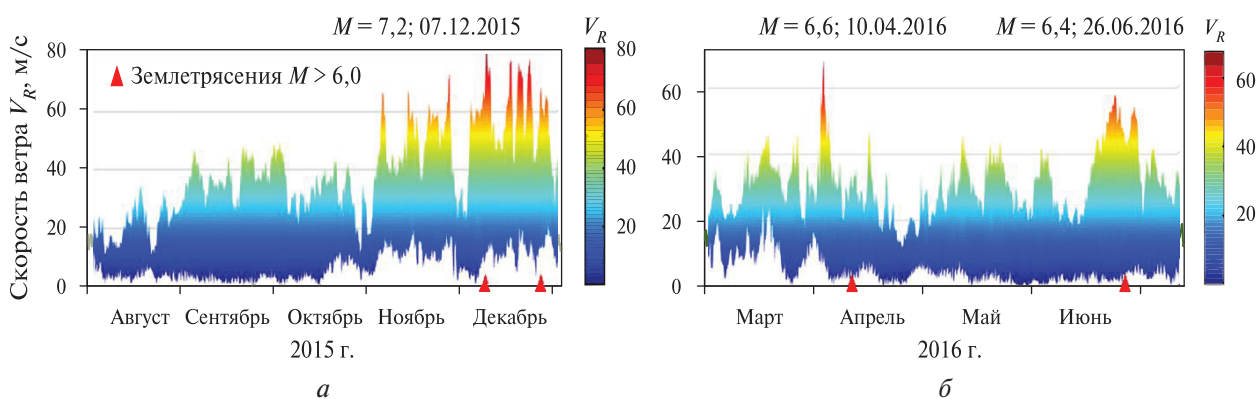


Рис. 1. Вариации модуля скорости ветра V_R в периоды сейсмоактивности: *а* — в Таджикистане (1 августа – 31 декабря 2015 г.); *б* — в Афганистане и Кыргызстане (1 марта – 10 июля 2016 г.)

В целом зональные и меридиональные ветры демонстрировали большие временные изменения, главным образом в верхней тропосфере при уровнях давления 250–150 гПа (10,0–14,0 км). Но при этом во всех случаях за несколько дней до землетрясений наблюдалось увеличение скорости ветра, которая ослабевала к моменту событий. Этот эффект, который в большей степени проявлялся в изменениях зональной компоненты, наблюдался даже в условиях сезонного повышения скорости ветра в зимний период (см. *рис. 1а*).

В ряде случаев всплески скорости ветра перед сильными сейсмическими событиями были менее ярко выражены, но тем не менее отмеченный эффект имел место, что иллюстрируют распределения трёхчасовых значений модуля вектора скорости V_R для различных направлений ветра α на уровне 200 гПа ($\sim 12,0$ км) (*рис. 2*, см. с. 153).

Диаграммы рассеяния, содержащие от 1200 до 1700 точек данных, соответствуют периодам продолжительностью 5–7 мес. Точки данных, отмеченные цветными маркерами и представляющие изменения ветра в предсейсмические периоды, выделялись на фоне всего множества данных более высокими значениями модуля вектора скорости ветра, достигающими 60–80 м/с. Представленные диаграммы служат подтверждением результатов, приведённых в работе (Свердлик, 2024). Наблюдаемые изменения вектора скорости ветра V_R были обусловлены, главным образом, вариациями зональной циркуляции, которые над исследуемым регионом связаны с субтропическим струйным течением, представляющим собой узкую полосу сильного ветра с максимальной скоростью >30 м/с на уровне ~ 200 гПа.

Карты пространственного распределения зональной компоненты скорости ветра на уровнях 250 и 200 гПа показали, что струйные течения в выделенные пятидневные периоды прослеживались в виде почти непрерывного пояса сильных западных ветров, пересекающих весь представленный на *рис. 3* (см. с. 153) обширный регион. Скорости ветра в полосах

струй были существенно неоднородными с чередованием областей более сильного и слабого ветра. В качестве примера приведено распределение V_E за 3–4 сут до событий в Афганистане (25.12.2015; $M = 6,3$) и Кыргызстане (26.06.2016; $M = 6,4$), демонстрирующие области высокой скорости ветра (50–80 м/с) вблизи эпицентральных областей землетрясений.

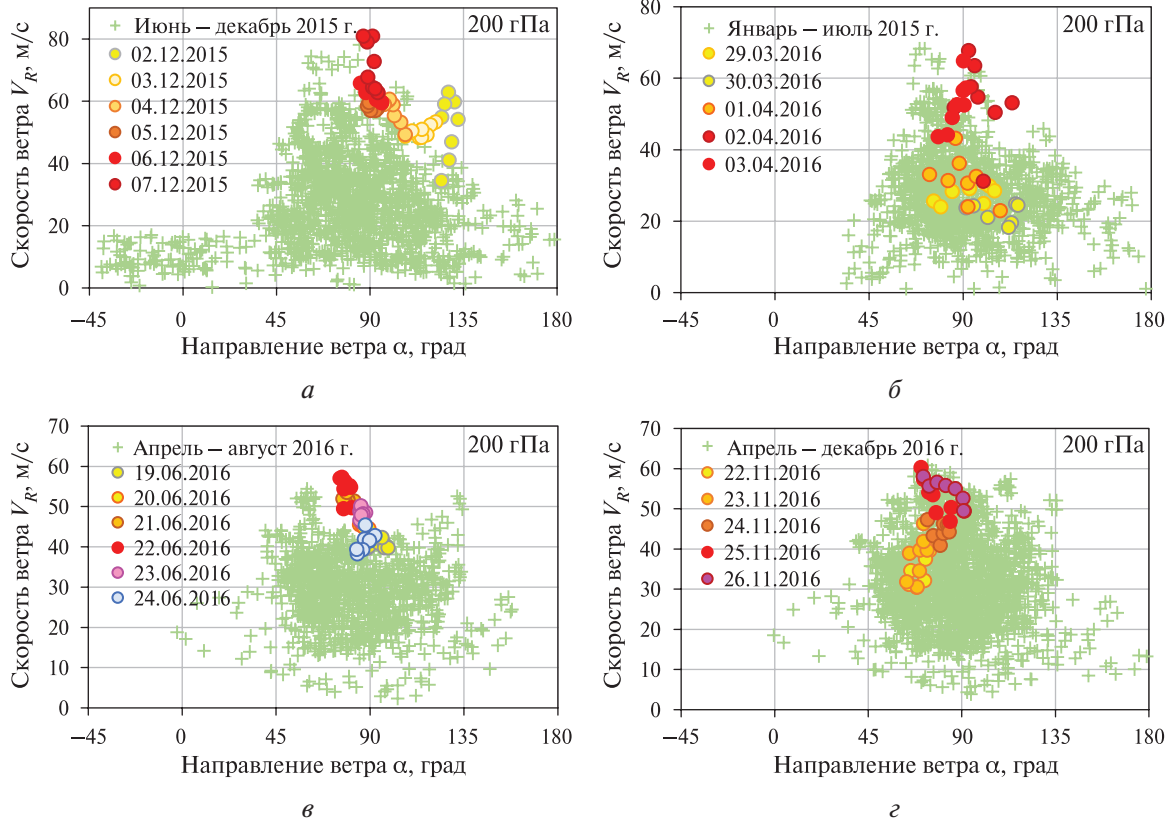


Рис. 2. Распределение модуля вектора скорости ветра для различных его направлений на уровне 200 гПа: а — с июня по декабрь 2015 г. в Таджикистане; б — в январе–июле 2016 г. в Афганистане; в — в апреле–августе 2016 г. в Кыргызстане; г — в апреле–декабре 2016 г. в Таджикистане

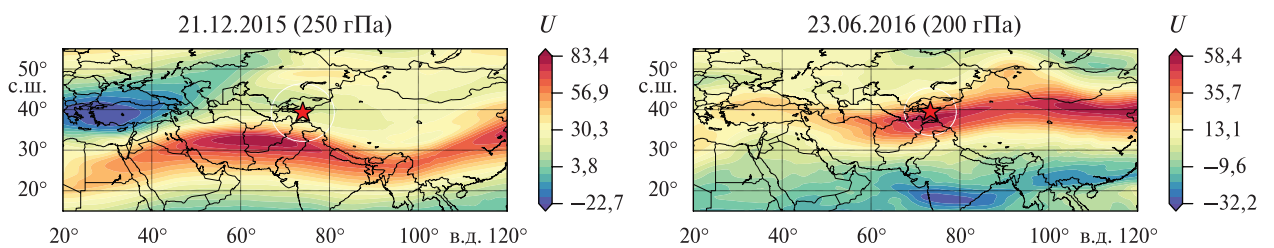


Рис. 3. Пространственное распределение скорости зонального ветра (250–200 гПа) перед землетрясениями $M \geq 6,0$ в Афганистане (25.12.2015) и Кыргызстане (26.06.2016). Маркерами показаны эпицентры этих землетрясений

Когда струйные течения в процессе эволюции смещались, пересекая зоны подготовки землетрясений, определяемые соотношением, полученным И. П. Добровольским с соавторами (Dobrovolsky et al., 1979), или в данном случае области расположения тепловых аномалий, в вариациях скорости ветра регистрировались максимумы. Результаты проведенного исследования подтверждают наличие корреляции между струйными течениями и исследуемыми землетрясениями в пространстве и времени, что согласуется с результатами работы (Wu, Tikhonov, 2014).

Несмотря на то, что каждое землетрясение, как правило, имело свои индивидуальные характеристики, зависящие от множества факторов, и вариации параметров атмосферы не были полностью идентичны, анализ данных позволил выявить некоторые общие черты в предсейсмических изменениях ветрового режима. Так, например, влияние сейсмической активности на состояние атмосферы проявлялось не только в динамике метеопараметров, но и в изменении взаимосвязи между ними (Свердлик, 2023). В частности, за несколько суток до сейсмических событий в вариациях меридиональной и зональной составляющей скорости ветра проявлялся эффект локальных синхронных противофазных изменений (рис. 4), характеризующихся высокими отрицательными коэффициентами корреляции ($r = -(0,80 \dots 0,96)$).

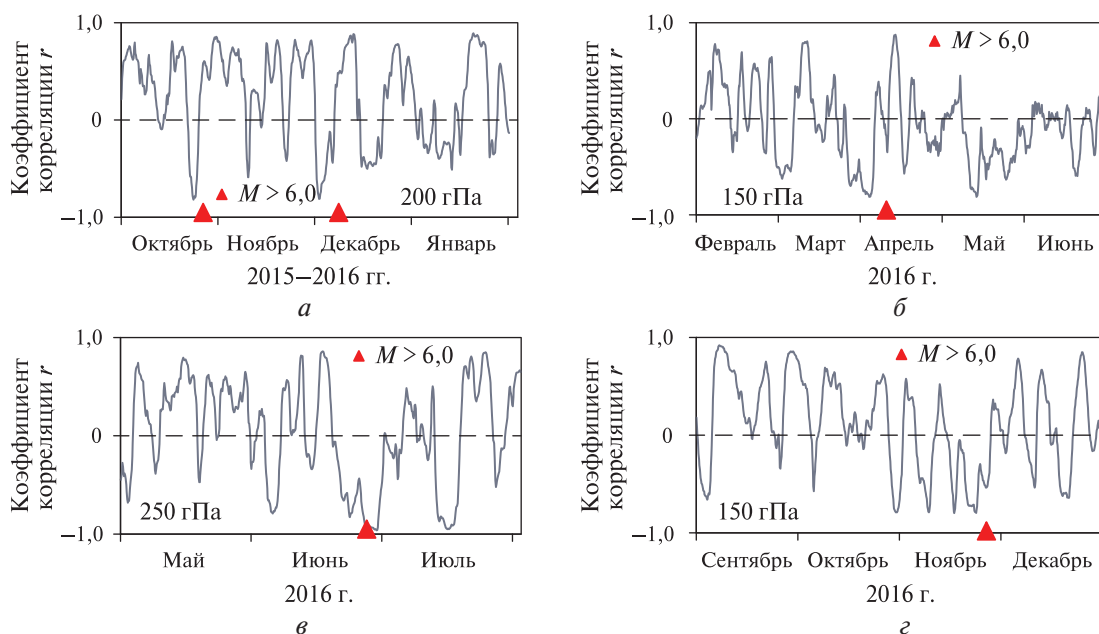


Рис. 4. Временные ряды коэффициентов корреляции r между составляющими скорости ветра V_N и V_E на уровнях 250–150 гПа в 2015–2016 гг. Красными маркерами отмечены моменты исследуемых землетрясений $M > 6,0$

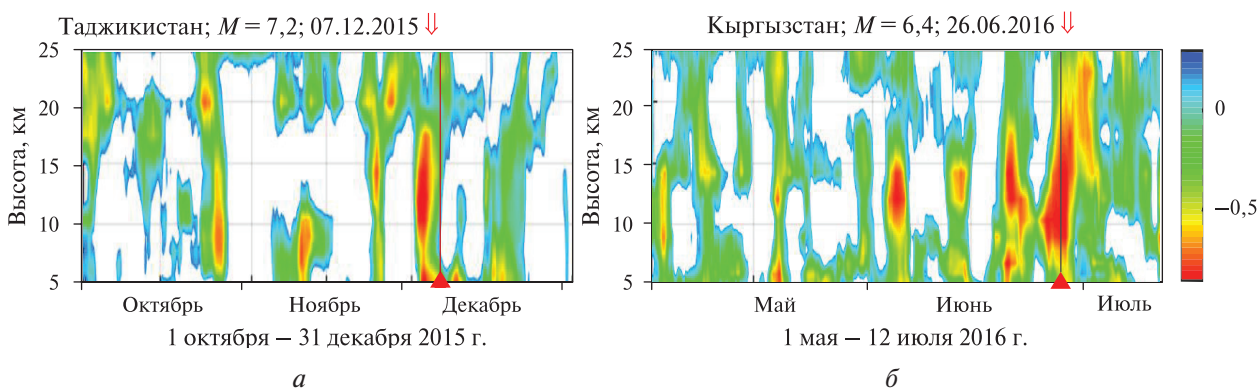


Рис. 5. Высотно-временное распределение отрицательных коэффициентов корреляции r : а — в Таджикистане (октябрь–декабрь 2015 г.); б — Кыргызстане (май–июль 2016 г.). Красными стрелками отмечены моменты землетрясений

Коэффициенты корреляции рассчитывались по значениям $V_N(t)$ и $V_E(t)$ за предшествующие 5 сут. Для этого использовались данные реанализа над областями наиболее интенсивных предсейсмических тепловых аномалий, которые располагались в пределах координат $33,0-34,5^\circ$ с. ш. и $72,5-73,125^\circ$ в. д. для землетрясения в Таджикистане и $38,5-40,0^\circ$ с. ш.; $71,875-$

72,5° в.д. для события в Кыргызстане. Как видно, в обоих случаях наиболее выражено корреляционная связь проявлялась на высотах 10,0–14,0 км, которые соответствовали максимальной скорости ветра (рис. 5, см. с. 154). Карты пространственного распределения коэффициента корреляции (рис. 6) демонстрируют области согласованных изменений меридиональной V_N и зональной V_E компоненты скорости ветра на уровнях 250–150 гПа в зонах подготовки сильных землетрясений (примерно за сутки до событий) в Афганистане (26.10.2015 и 10.04.2016), Кыргызстане (26.06.2016) и Таджикистане (25.11.2016), что является, вероятно, проявлением литосферно-атмосферного взаимодействия.

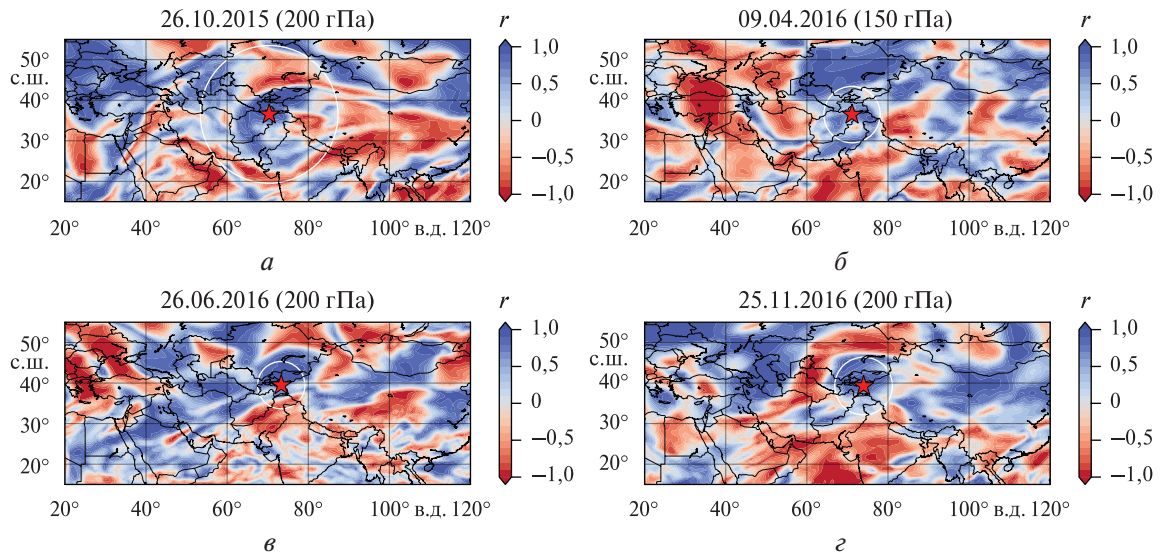


Рис. 6. Пространственное распределение коэффициента корреляции между составляющими скорости ветра V_N и V_E на уровне 200 (150) гПа за сутки до землетрясений в Афганистане 26.10.2015 (а) и 10.04.2016 (б), Кыргызстане 26.06.2016 (в) и Таджикистане 25.11.2016 (г). Маркерами показаны эпицентры землетрясений

Согласно существующим представлениям динамика нижней атмосферы существенным образом определяется протекающими в атмосфере волновыми процессами, результатом которых является перераспределение и передача энергии и импульса из одних слоёв атмосферы в другие (например, (Zhang et al., 2024)). Настоящее исследование основано на предположении, что важную роль в литосферно-атмосферном взаимодействии играют волновые процессы, а именно эффекты возбуждения интенсивных длиннопериодных сейсмогравитационных колебаний (например, (Кашкин, 2013; Линьков и др., 1990; Kundu et al., 2022)), на что указывают некоторые характерные особенности изменения вертикальной структуры температуры (Свердлик, 2025а). Поскольку гравитационные волны проявляются также в виде возмущений в поле скорости ветра в слоях нижней атмосферы (Tsuda, 2014), были проанализированы возмущения зональной ΔU и меридиональной ΔV составляющей скорости ветра, которые определялись как разность исходных (V_N и V_E) и соответствующих средних (невозмущённых) профилей, вычисленных на основе полиномиальной аппроксимации исходных данных. На рис. 7 (см. с. 156) представлены 27-суточные диаграммы изменения вертикального распределения выделенных возмущений скорости ветра в интервале высот 5–25 км. Показаны наиболее интенсивные вариации модулей ΔV_R , характеризующиеся значениями, превышающими указанные пороговые уровни ($\Delta V_R \geq 2,0$ и 2,5 м/с). Координаты используемых данных, дискретизация которых составляла $\Delta t = 12$ ч, соответствовали расположению тепловых аномалий, предшествующих землетрясениям в Афганистане и Кыргызстане (Свердлик, 2025б).

Соответствующие карты пространственного распределения ΔV_R на изобарических уровнях 200–250 гПа, демонстрирующие горизонтальные размеры возмущённых областей и их расположение относительно зон подготовки землетрясений, показаны на рис. 8 (см. с. 156). Представленные данные демонстрируют достаточно близкое совпадение времени возникно-

вения предсейсмических тепловых аномалий (21–23.10.2015, 24–26.12.2015, 05–06.04.2016, 21–23.06.2016) с увеличением интенсивности возмущений скорости ветра, что может быть связано с возрастающей активностью атмосферных гравитационных волн, которая наблюдалась главным образом в верхней тропосфере на высотах, соответствующих расположению струйного течения (~9,0–15,0 км). Продолжительность протекания обоих процессов также примерно совпала и составляла 2–3 сут.

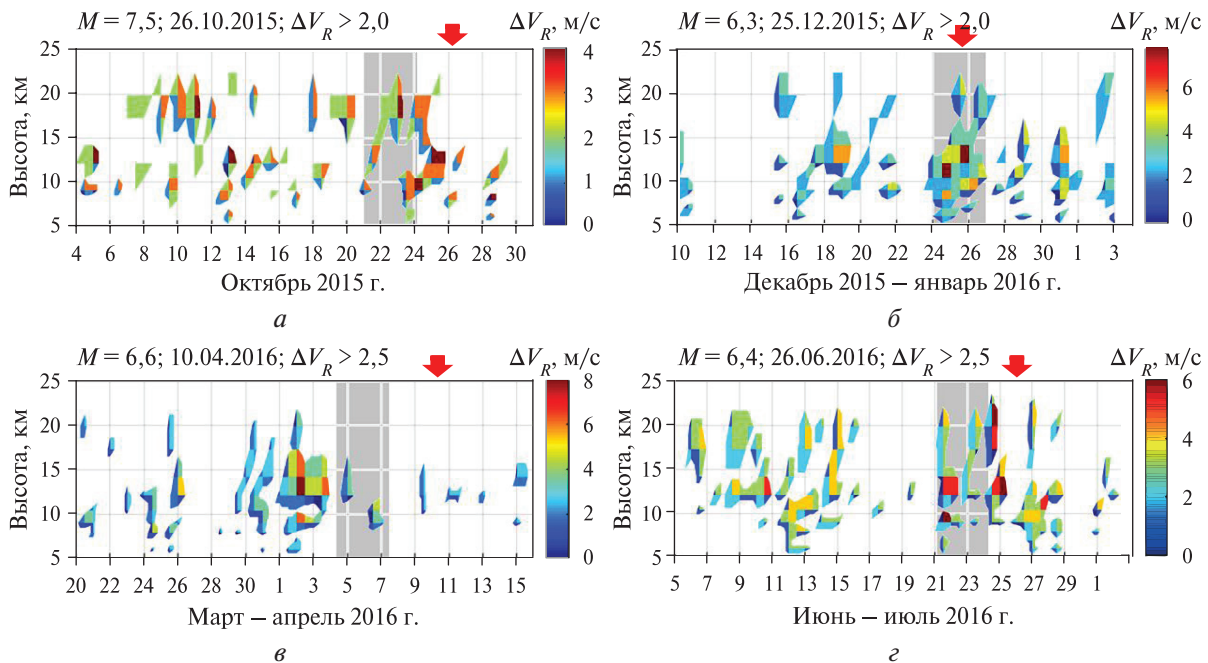


Рис. 7. Высотно-временное распределение модуля возмущений скорости ветра перед землетрясениями $M > 6,0$. Показано распределение ΔV_R в моменты времени 00:00 и 12:00 UT, превышающие указанные пороговые уровни (2,0 и 2,5 м/с). Серым цветом отмечены тепловые аномалии (Свердлик, 2025б). Красные стрелки — моменты землетрясений. UT — (англ. Universal Time, Всемирное время)

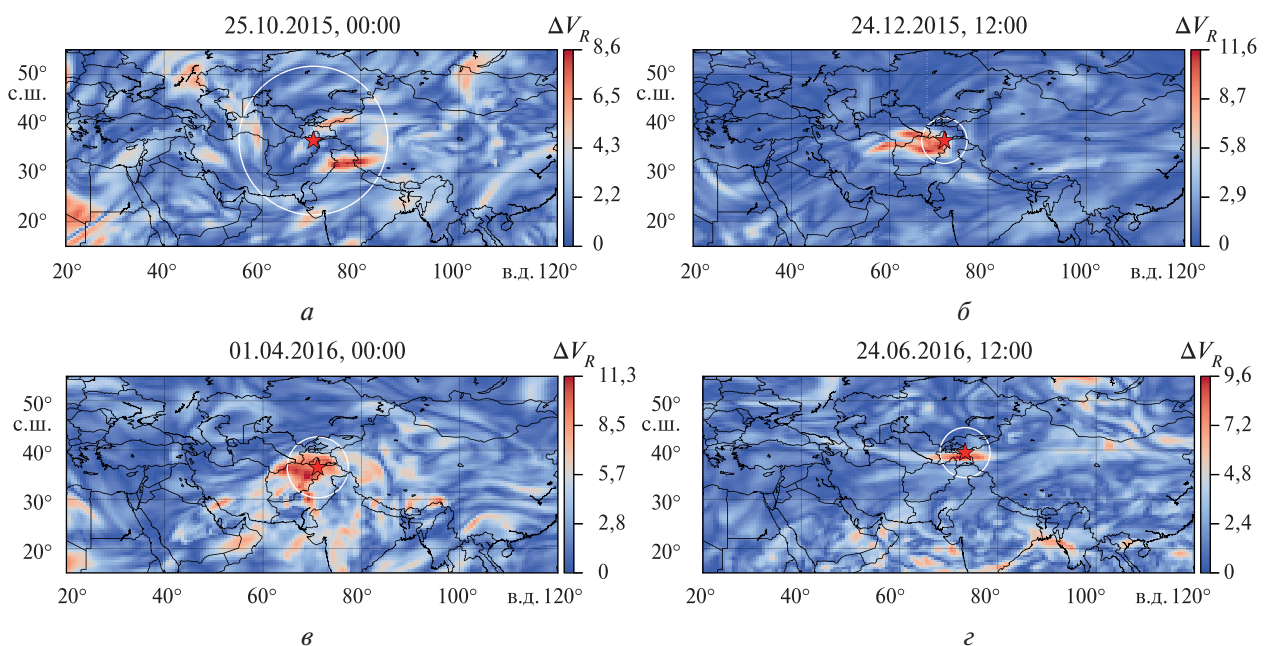


Рис. 8. Пространственное распределение модуля возмущений скорости ветра ΔV_R (в м/с) перед землетрясениями $M > 6,0$ в Афганистане (а–в) и Кыргызстане (г). Маркерами показаны эпицентры этих землетрясений

В то же время анализ данных реанализа MERRA-2 показал, что вариации параметров атмосферы перед землетрясением $M=6,6$ (10.04.2016) в Афганистане (см. рис. 7в) имели ряд особенностей, обусловивших смещения по времени примерно на 3 сут между возмущениями скорости ветра ΔV_R (01–03.04.2016) и температуры (05–06.04.2016). Также данный эффект проявлялся вследствие особенностей работы алгоритма, используемого нами для выделения предсейсмических тепловых аномалий. Подобные проявления предсейсмических аномалий в изменениях нескольких параметров атмосферы представляют определённый интерес и в будущем могут быть рассмотрены в отдельном дополнительном исследовании.

Предсейсмические периоды характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх, подтверждением чему могут служить годографы и соответствующие им профили возмущений скорости ветра (рис. 9). При этом возмущения горизонтальной скорости ветра ΔV_R усиливались с увеличением скорости ветра V_R и проявлялись на всех высотах, достигая максимума в области тропопаузы. Вертикальные длины волн доминирующих мод V_R составляли 4–8 км.

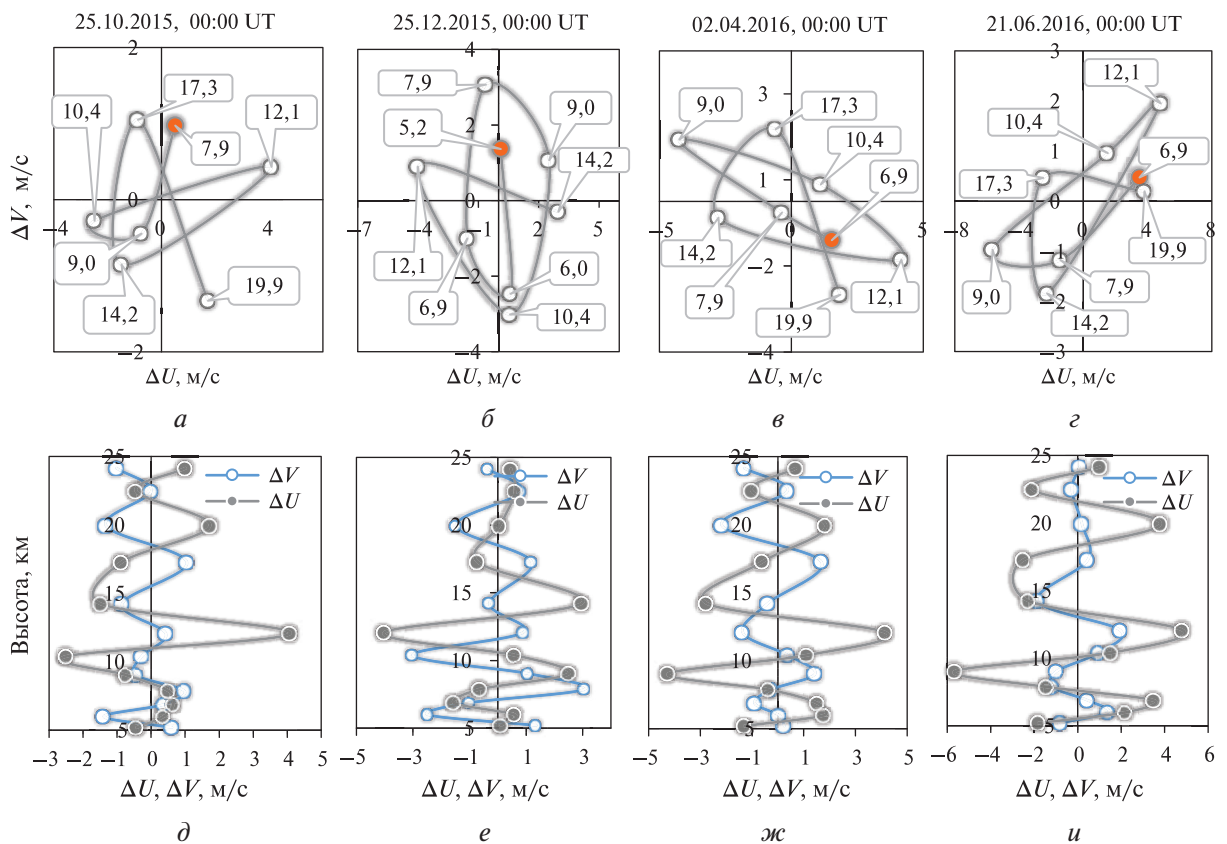


Рис. 9. Годографы и соответствующие им профили флуктуаций зональной ΔU и меридиональной ΔV составляющей скорости ветра по данным измерений 25 октября 2015 г. (а, д), 25 декабря 2015 г. (б, е), 2 апреля 2016 г. (в, ж) и 21 июня 2016 г. (з, и)

Известно, что струйные течения — один из источников гравитационных волн (Li, Yi, 2007). В исследованиях, посвящённых наблюдениям в UTLS, подчёркивается наличие как восходящих, так и нисходящих волн, направленных в противоположные стороны от струйного течения (Plougonven, Zhang, 2014), что представляется характерным признаком возбуждения акустических и внутренних гравитационных волн (Thomas et al., 1999). Поскольку перед всеми исследуемыми землетрясениями активность атмосферных гравитационных волн усиливалась и перенос волновой энергии происходил преимущественно вверх, что соответствует вращению годографов по часовой стрелке, представленные выше результаты позволяют сделать вывод, что, вероятно, амплитуды атмосферных волн, связанных с сильной сейсмической

активностью, становились достаточно большими, чтобы оказать влияние на скорость фонового ветра (Tsuda, 2014) и структуру волновой активности в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

Таким образом, наблюдаемые в области UTLS предсейсмические тепловые аномалии (Свердлик, 2025б) формировались в нестабильных условиях с экстремальными значениями скорости ветра ($V_R \geq 50$ м/с) и максимальными амплитудами флуктуаций ($\Delta V_R \geq 3,0$ м/с). Можно предположить, что атмосферные гравитационные волны взаимодействовали со струйным течением, передавая импульс (Yang et al., 2021). Этот процесс сопровождался комплексом явлений — усилением вертикального переноса, созданием локальной турбулентности, нарушением атмосферной циркуляции и др. (Pavelin, Whiteway, 2002), а как следствие, приводил к возмущениям метеопараметров в области тропопаузы.

Результаты исследования показали, что анализ одновременных измерений вариаций скорости ветра и температуры позволяет более точно идентифицировать атмосферные гравитационные волны (Zhao et al., 2016), предшествующие сильным сейсмическим событиям.

Заключение

С целью установления взаимосвязи между процессами в литосфере и атмосфере проанализированы данные спутниковых измерений скорости ветра в периоды подготовки и прохождения шести землетрясений ($M \geq 6,0$), которые зарегистрированы в регионе Центральной Азии в периоды низкой солнечной активности в 2015–2016 гг. Для исследования, выделения и идентификации предсейсмических атмосферных эффектов использовались данные реанализа MERRA-2. Установлено, что вариации скорости ветра демонстрировали необычное поведение в периоды от 1 до 8 дней до землетрясений, которое во всех случаях проявлялось в кратковременном увеличении амплитуды флуктуаций и синхронном противофазном изменении зональной и меридиональной компоненты ветра ($r = -(0,80...0,96)$).

Полученные результаты дают основания считать, что одним из важных факторов, влияющих на изменение температуры, которые наблюдаются непосредственно перед крупными сейсмическими событиями, была, вероятно, генерация атмосферных гравитационных волн. Данный вывод сделан на основании анализа годографов возмущений скорости ветра в интервале высот ~5–25 км, который подтвердил, что предсейсмические периоды характеризовались преимущественным переносом волновой энергии вверх, а также с учётом результатов расчёта высотно-временного распределения плотности потенциальной энергии гравитационных волн.

Совокупность всех представленных данных показывает, что выявленные особенности предполагают общий источник возмущений температуры и скорости ветра, что подтверждает ранее полученные результаты и согласуется с ними. В дальнейшем подобные исследования впервые будут проведены в отношении крупных землетрясений в Латинской Америке.

Автор выражает благодарность сотрудникам Центра данных и информационных служб Годдарда по наукам о Земле, НАСА (Национальному управлению по аэронавтике и исследованию космического пространства, NASA) и USGS за предоставление свободного доступа к данным измерений.

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

Литература

1. *Кашкин В. Б.* Внутренние гравитационные волны в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана.* 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
2. *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.
3. *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.
4. *Свердлик Л. Г.* Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2023. Т. 20. № 2. С. 144–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
5. *Свердлик Л. Г.* Сейсмоатмосферные эффекты в изменениях метеопараметров нижней атмосферы по данным спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2024. Т. 21. № 2. С. 122–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130.
6. *Свердлик Л. Г.* (2025а) Предсейсмические возмущения метеопараметров в нижней атмосфере по данным спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2025. Т. 22. № 1. С. 56–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-68.
7. *Свердлик Л. Г.* (2025б) Динамика тепловых аномалий в сейсмически активном регионе Центральной Азии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2025. Т. 22. № 4. С. 149–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-149-163.
8. *Alimoradi H., Rahimi H., De Santis A.* Successful tests on detecting pre-earthquake magnetic field signals from space // *Remote Sensing.* 2024. V. 16. Iss. 16. Article 2985. DOI: 10.3390/rs16162985.
9. *Bardhan A., Sharma P., Sahai A., Sharma D. K.* Ionospheric and surface thermal parameters during three high magnitude earthquakes // *J. Indian Geophysical Union.* 2022. V. 26. No. 6. P. 448–461.
10. *Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pure and Applied Geophysics.* 1979. V. 117. P. 1025–1044. DOI: 10.1007/BF00876083.
11. *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. Article 3201104. 23 p. DOI: 10.1155/2022/3201104.
12. *Liu Z., Li Z., Yu C. et al.* Stress triggering and future seismic hazards implied by four large earthquakes in the Pamir from 2015 to 2023 revealed by Sentinel-1 radar interferometry // *Geophysical J. Intern.* 2024. V. 237. P. 887–901. DOI: 10.1093/gji/ggae079.
13. *Li W., Yi F.* Characteristics of inertia-gravity waves around jet stream from radiosonde observations in Wuhan (30.5°N, 114.4°E) // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2007. V. 69. Iss. 7. P. 826–834. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.01.004.
14. *Meng X., Vergados P., Komjathy A., Verkhoglyadova O.* Upper atmospheric responses to surface disturbances: An observational perspective // *Radio Science.* 2019. V. 54. P. 1076–1098. DOI: 10.1029/2019RS006858.
15. *Pavelin E., Whiteway J. A.* Gravity wave interactions around the jet stream // *Geophysical Research Letters.* 2002. V. 29. No. 21. Article 2024. DOI: 10.1029/2002GL015783.
16. *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.
17. *Rasheed R., Chen B., Wu D., Wu L.* A comparative study on multi-parameter ionospheric disturbances associated with the 2015 Mw 7.5 and 2023 Mw 6.3 earthquakes in Afghanistan // *Remote Sensing.* 2024. V. 16. Iss. 11. Article 1839. DOI: 10.3390/rs16111839.
18. *Shi Y., Wang Y., Bian Y.* Coseismic source model of the February 2023 Mw 6.8 Tajikistan earthquake from Sentinel-1A InSAR observations and its associated earthquake hazard // *Remote Sensing.* 2023. V. 15. Iss. 12. Article 3010. DOI: 10.3390/rs15123010.
19. *Thomas L., Worthington R. M., McDonald A. J.* Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region // *Annales Geophysicae.* 1999. V. 17. P. 115–121.
20. *Tsuda T.* Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation // *Proc. Japan Academy Ser B Physical and Biological Sciences.* 2014. V. 90. No. 1. P. 12–27. DOI: 10.2183/pjab.90.12.
21. *Wooten R. D.* Statistical analysis of the relationship between wind speed, pressure and temperature // *J. Applied Sciences.* 2011. V. 11. Iss. 15. P. 2712–2722. DOI: 10.3923/jas.2011.2712.2722.
22. *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.
23. *Yang S.-S., Pan C.-J., Das U.* Investigating the spatio-temporal distribution of gravity wave potential energy over the equatorial region using the ERA5 reanalysis data // *Atmosphere.* 2021. V. 12. No. 3. Article 311. DOI: 10.3390/atmos12030311.

24. Zhang K., Luo T., Li X. et al. A novel method for detecting tropopause structures based on the bi-Gaussian function // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. V. 24. P. 11157–11173. DOI: 10.5194/acp-24-11157-2024.
25. Zhao R., Dou X., Sun D. et al. Gravity waves observation of wind field in stratosphere based on a Rayleigh Doppler lidar // *Optics Express*. 2016. V. 24. Iss. 6. P. A581–A591. DOI: 10.1364/OE.24.00A581.

Dynamics of pre-seismic wind speed variations in the Central Asian region

L. G. Sverdlik

Research Station RAS in Bishkek City, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

E-mail: l.sverdlik@mail.ru

Kyrgyz–Russian Slavic University, Bishkek 720000, Kyrgyzstan

The work presents the results of analysis of temporal horizontal wind speed variability in the upper troposphere/lower stratosphere during periods of preparation of 6 earthquakes of magnitudes $\geq 6,0$ occurred in the seismically active Central Asia region in 2015–2016. To distinguish and identify pre-seismic effects in wind speed variations we used measurement data from the MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) reanalysis archive. It was found that there were characteristic features of pre-seismic changes in the wind field. Several days before all earthquakes under study the wind speed in the upper troposphere reached maximum values. Polynomial approximation was used as a background to assess fluctuations of zonal and meridional wind components in the area of heights of 5–24 km. Assuming that wind speed perturbations were induced by atmospheric gravity waves, propagation directions of gravity waves were analyzed on the basis of hodograph technique. It has been established that earthquake preparation periods were characterized by intensification of wave action in the upper troposphere with predominantly upward wave energy transfer. Generally, despite the complicated nature of the influence exerted by processes of strong earthquake preparation on atmospheric dynamics in space and time, the results obtained indicate the importance of using meteorological parameters in the study of pre-seismic atmospheric effects.

Keywords: satellite measurements, wind speed, earthquake, upper troposphere, lower stratosphere, perturbation, hodograph

Accepted: 03.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-150-161

References

1. Kashkin V. B., Inner gravity waves in the troposphere, *Optika atmosfery i okeana*, 2013, V. 26, No. 10, pp. 908–916 (in Russian).
2. 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).
3. 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.
4. Sverdlik L. G., Dynamics of perturbations in the lower atmosphere in seismically active regions of Asia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 144–152 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
5. Sverdlik L. G., Seismic-atmospheric effects in changes in meteorological parameters of the lower atmosphere, according to satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 122–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-122-130.

6. Sverdlik L. G. (2025a), Pre-seismic disturbances of meteorological parameters in the lower atmosphere based on satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 56–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-56-68.
7. Sverdlik L. G. (2025b), Thermal anomaly dynamics in the seismically active region of Central Asia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 149–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-149-163.
8. Alimoradi H., Rahimi H., De Santis A., Successful tests on detecting pre-earthquake magnetic field signals from space, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Iss. 16, Article 2985, DOI: 10.3390/rs16162985.
9. Bardhan A., Sharma P., Sahai A., Sharma D. K., Ionospheric and surface thermal parameters during three high magnitude earthquakes, *J. Indian Geophysical Union*, 2022, V. 26, No. 6, pp. 448–461.
10. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Miachkin V. I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Applied Geophysics*, 1979, V. 117, pp. 1025–1044, DOI: 10.1007/BF00876083.
11. 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, Article 3201104, 23 p., DOI: 10.1155/2022/3201104.
12. Liu Z., Li Z., Yu C. et al., Stress triggering and future seismic hazards implied by four large earthquakes in the Pamir from 2015 to 2023 revealed by Sentinel-1 radar interferometry, *Geophysical J. Intern.*, 2024, V. 237, pp. 887–901, DOI: 10.1093/gji/ggae079.
13. Li W., Yi F., Characteristics of inertia-gravity waves around jet stream from radiosonde observations in Wuhan (30.5°N, 114.4°E), *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, V. 69, Iss. 7, pp. 826–834, DOI: 10.1016/j.jastp.2007.01.004.
14. Meng X., Vergados P., Komjathy A., Verkhoglyadova O., Upper atmospheric responses to surface disturbances: An observational perspective, *Radio Science*, 2019, V. 54, pp. 1076–1098, DOI: 10.1029/2019RS006858.
15. Pavelin E., Whiteway J. A., Gravity wave interactions around the jet stream, *Geophysical Research Letters*, 2002, V. 29, No. 21, Article 2024, DOI: 10.1029/2002GL015783.
16. Plougonven R., Zhang F., Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, *Reviews of Geophysics*, 2014, V. 52, pp. 33–76, DOI: 10.1002/2012RG000419.
17. Rasheed R., Chen B., Wu D., Wu L., A comparative study on multi-parameter ionospheric disturbances associated with the 2015 Mw 7.5 and 2023 Mw 6.3 earthquakes in Afghanistan, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Iss. 11, Article 1839, DOI: 10.3390/rs16111839.
18. Shi Y., Wang Y., Bian Y., Coseismic source model of the February 2023 Mw 6.8 Tajikistan earthquake from Sentinel-1A InSAR observations and its associated earthquake hazard, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Iss. 12, Article 3010, DOI: 10.3390/rs15123010.
19. Thomas L., Worthington R. M., McDonald A. J., Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region, *Annales Geophysicae*, 1999, V. 17, pp. 115–121.
20. Tsuda T., Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Japan Academy Ser B Physical and Biological Sciences*, 2014, V. 90, No. 1, pp. 12–27, DOI: 10.2183/pjab.90.12.
21. Wooten R. D., Statistical analysis of the relationship between wind speed, pressure and temperature, *J. Applied Sciences*, 2011, V. 11, Iss. 15, pp. 2712–2722, DOI: 10.3923/jas.2011.2712.2722.
22. 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, pp. 12–18, DOI: 10.4081/rg.2014.4939.
23. Yang S.-S., Pan C.-J., Das U., Investigating the spatio-temporal distribution of gravity wave potential energy over the equatorial region using the ERA5 reanalysis data, *Atmosphere*, 2021, V. 12, No. 3, Article 311, DOI: 10.3390/atmos12030311.
24. Zhang K., Luo T., Li X. et al., A novel method for detecting tropopause structures based on the bi-Gaussian function, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, V. 24, pp. 11157–11173, DOI: 10.5194/acp-24-11157-2024.
25. Zhao R., Dou X., Sun D. et al., Gravity waves observation of wind field in stratosphere based on a Rayleigh Doppler lidar, *Optics Express*, 2016, V. 24, Iss. 6, pp. A581–A591, DOI: 10.1364/OE.24.00A581.