

Пространственно-временное распределение возмущений в атмосфере перед сильными землетрясениями в Тянь-Шане

Л. Г. Сverdлик, С. А. Имашев

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, 720049, Кыргызстан
E-mail: l.sverdlik@mail.ru

В настоящей статье проанализированы пространственно-временные изменения температуры в верхней тропосфере/нижней стратосфере (UTLS) над территорией Кыргызстана, полученные по данным спутникового дистанционного зондирования, которые были сопоставлены с сейсмической активностью в Тянь-Шане. Для исследования изменчивости температуры в предсейсмические периоды были выбраны 16 землетрясений магнитудой от 5,0 до 7,4, произошедших на территории Кыргызстана и вблизи его границ в 1992–2015 гг. Выделение аномальных изменений во временных рядах температуры, которые использовались в качестве предсейсмических признаков, проводилось с использованием специального алгоритма, позволяющего визуализировать в одно- и двумерном представлении возмущения в области тропопаузы. Интегральные показатели аномальных вариаций рассчитывались с учётом особенностей изменения амплитуды и фазы короткопериодных вариаций температуры на разделённых тропопаузой изобарических уровнях UTLS. Полученные результаты показали, что пространственная структура и динамика аномалий температуры в области тропопаузы имеют достаточно устойчивую связь с сейсмической активностью. Оценка пространственного масштаба и времени проявления возмущений температуры показала, что аномалии температуры, горизонтальный размер которых составлял примерно 200–500 км, наблюдались во всех рассмотренных случаях в период от ~3 до 72 ч до основного сейсмического события.

Ключевые слова: землетрясения, спутниковые данные, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, температура, аномалии, тропопауза, интегральный параметр

Одобрена к печати: 13.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122

Введение

Прогресс в развитии и совершенствовании спутниковых технологий, а также доступность большого количества специализированных сервисов и баз данных способствовали активному исследованию воздействия сильных землетрясений на атмосферу с целью выявления закономерностей изменения различных её параметров (Jiao et al., 2018; Tronin, 2010). Одной из основных физических величин, которые описывают состояние, условия протекания большинства динамических процессов и изменение структуры атмосферы, становится температура (Singh et al., 2010). Исследование атмосферных эффектов землетрясений, основанное на данных спутниковых измерений температуры, проводилось в разделённой тропопаузой области верхней тропосферы/нижней стратосферы (*англ.* Upper Troposphere and Lower Stratosphere — UTLS) (Sverdlik, Imashev, 2018). Важная особенность этой переходной области атмосферы (450–70 гПа, или ~6,0–19,5 км) заключается в том, что она характеризуется большой динамической изменчивостью и чувствительностью к воздействию различного рода возмущающих факторов и активности атмосферных волн (влияние циркуляционных процессов планетарного и синоптического масштаба, изменение уровня солнечной активности и содержания стратосферного озона, обмен массой между тропосферой и стратосферой и др.) (Birner, 2006; Manney et al., 2017; Morozova et al., 2017; Pilch Kedzierski et al., 2017; Randel et al., 2007). Исходя из предположения, что одним из таких влияющих факторов оказалась и сейсмическая активность (Кашкин, 2013), ставилась задача из всей совокупности сложных процессов взаимодействия разномасштабных факторов выделить роль землетрясений в модуляции изменения температуры. Для этого были определены признаки, которыми характеризуются вариации температуры как в период подготовки, так и во время сильных землетрясений (Sverdlik, Imashev,

2018), и разработан алгоритм обработки и анализа сейсмических и температурных данных (Свердлик, Имашев, 2019).

В настоящей работе представлены результаты диагностирования аномальных изменений временного и пространственного распределения температуры в периоды сейсмической активности на примере крупных землетрясений магнитудой $M \geq 5,0$ в Тянь-Шане, полученные с использованием модифицированной версии алгоритма.

Исходные сейсмические и спутниковые данные

Для исследования изменчивости температуры в предсейсмические периоды были выбраны 16 землетрясений магнитудой от 5,0 до 7,4, зарегистрированных на территории Кыргызстана и вблизи его границ в 1992–2015 гг. Основные характеристики сейсмических событий, представленные в *таблице*, взяты из каталога землетрясений Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики и Научной станции Российской академии наук в Бишкеке, составленного по данным Киргизской широкополосной сейсмической сети (KNET — Kyrgyz Seismic Network). Для получения сведений о сейсмических событиях, находящихся за пределами сети, использовались данные онлайн-версии мирового каталога Геологической службы США (United States Geological Survey — USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Расположение эпицентров землетрясений показано на *рис. 1* (см. с. 116). С целью оценки чувствительности алгоритма рассматривались также землетрясения магнитудой $4,0 < M < 5,0$, которые произошли в рассматриваемые периоды.

Характеристики исследуемых землетрясений (EQ) магнитудой $M \geq 5,0$

№	Дата	Время	Широта (с. ш.)	Долгота (в. д.)	M	D , км	N_{event}
EQ01	19.08.1992	02:04:36	42,07	73,63	7,4	20,0	89
EQ02	30.03.2003	23:15:46	39,52	77,34	5,3	16,2	2
EQ03	16.01.2004	09:06:18	42,55	75,30	6,0	14,0	14
EQ04	25.12.2006	20:00:58	42,11	76,03	6,7	0,8	20
EQ05	08.01.2007	17:21:49	39,80	70,31	6,0	16,0	2
EQ06	05.10.2008	15:52:42	38,90	73,40	5,6	27,4	11
EQ07	02.01.2010	02:15:10	38,29	71,47	5,3	29,8	7
EQ08	19.01.2010	17:35:45	42,09	72,09	5,0	0,6	3
EQ09	17.03.2011	15:34:34	40,48	79,08	5,0	10,7	2
EQ10	18.03.2011	09:36:27	43,02	74,95	5,0	17,1	2
EQ11	19.07.2011	19:35:43	40,10	71,50	6,1	20,0	3
EQ12	05.02.2012	07:10:15	41,40	74,76	5,6	10,0	5
EQ13	11.03.2013	03:01:37	40,12	77,47	5,4	10,0	2
EQ14	14.11.2014	01:24:16	42,19	77,23	5,2	10,1	1
EQ15	17.11.2015	17:29:37	40,43	73,19	5,6	3,1	14
EQ16	07.12.2015	08:30:57	41,73	74,61	5,5	15,9	48

Примечание: D — глубина очага землетрясений (км); N_{event} — количество сейсмических событий ($M > 1,0$) в течение указанных суток.

Информация о временных и высотных вариациях температуры атмосферы получена по данным системы реанализа MERRA-2 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>), которые основаны на спутниковых наблюдениях, прошедших обработку в глобальной модели (Manney et al., 2017), и представляют собой массивы синтезированных значений температуры на стандартных изобарических уровнях (p_k) от 450 до 70 гПа в узлах равномерной сетки $0,5 \times 0,625^\circ$.

Разрешение временных рядов температуры $T(t)$ по времени $\Delta t = 3$ ч обеспечило достаточно хорошую детализацию процесса формирования аномалий в области, ограниченной координатами 37–46° с. ш. и 65–85° в. д. Продолжительность рядов наблюдений составляла 90 дней (± 45 сут относительно дня землетрясения).

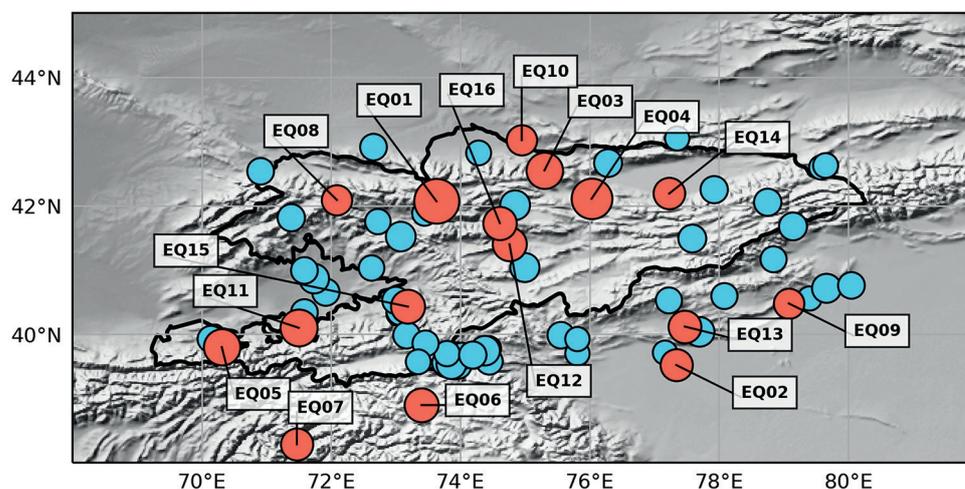


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений магнитудой $M \geq 5,0$ (красные маркеры) и $4,0 < M < 5,0$ (синие маркеры)

Алгоритм обработки спутниковых данных

Как уже отмечалось, изменения температуры в области UTLS имеют сложный характер, подвержены влиянию различных источников возмущений и тесно связаны с атмосферными волновыми процессами, среди которых значительными представляются эффекты возбуждения интенсивных гравитационных волн, и в частности длиннопериодных сейсмогравитационных колебаний (Кашкин, 2013; Собисевич и др., 2020). Движения больших локальных объёмов земной коры в процессе развития сильных землетрясений приводят к резкому увеличению интенсивности колебаний длительностью от 5 до 15 ч и синхронных с ними идентичных по спектру пульсаций атмосферы, периодичность которых составляет $\sim 6\text{--}8$ сут (Линьков и др., 1990; Свердлик, Имашев, 2019).

Особенность нашего подхода состоит в выделении этих спектральных составляющих. При этом рассматривались не только аномальные по амплитуде вариации, но и динамика изменений температуры в фазовой и временной областях. Таким образом, аномальные возмущения в области UTLS определялись по наличию трёх характерных признаков в изменении температуры, которые одновременно наблюдаются на двух разделённых тропопаузой уровнях верхней тропосферы/нижней стратосферы. Выходным параметром используемого алгоритма, изменения которого сопоставлялись с сейсмической активностью, стал интегральный показатель D_{CORR} . Алгоритм построен таким образом, что значения параметра $D_{\text{CORR}} > 0,8$ свидетельствуют о наличии аномальных возмущений температуры в области UTLS (Свердлик, Имашев, 2019). Расчёты проводились для каждого пикселя исследуемого региона и каждых трёхчасовых отсчётов спутниковых данных.

Пространственно-временное распределение аномальных возмущений температуры

Использование модернизированной версии алгоритма обработки данных спутникового дистанционного зондирования позволило визуализировать в двумерном представлении результаты вычислений и, соответственно, получить более полную картину эволюции аномалий в процессе их развития и затухания.

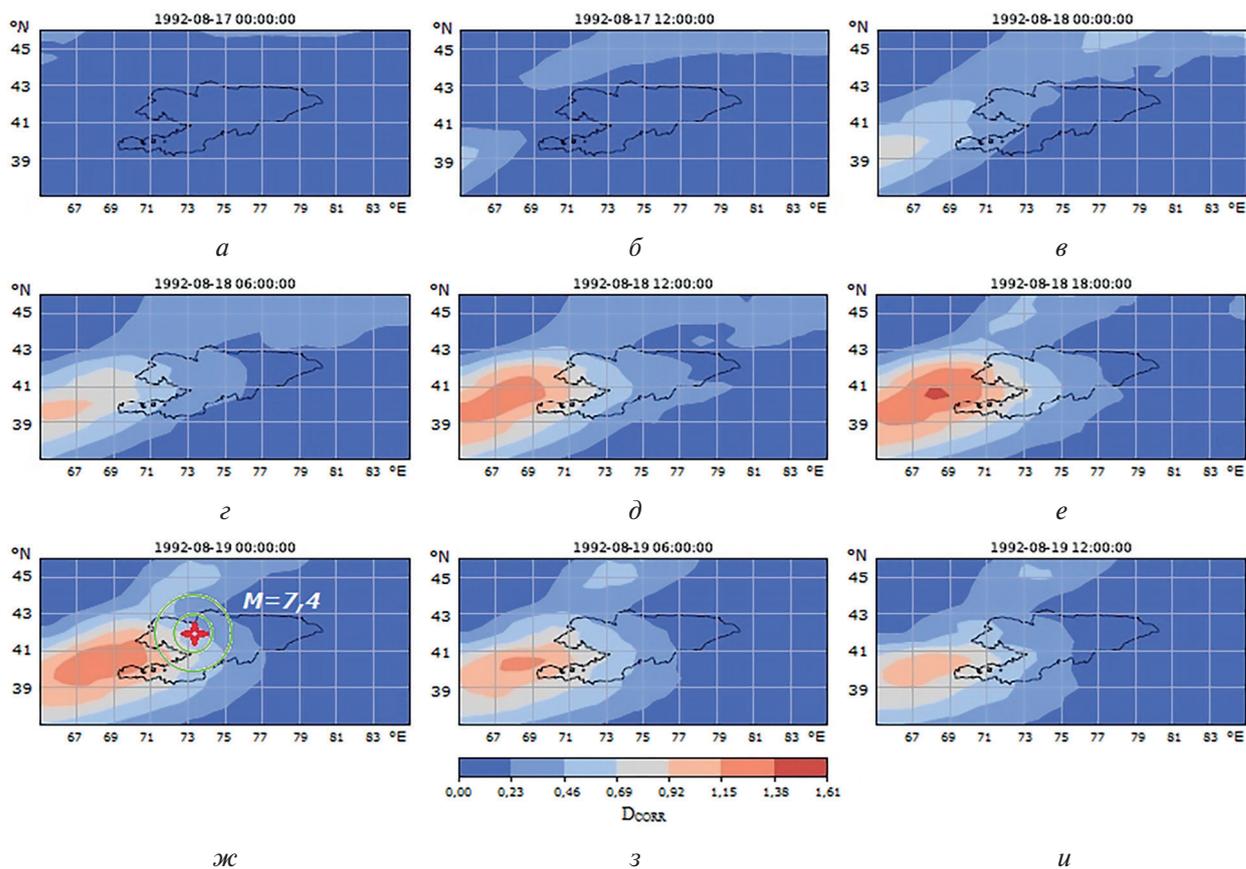


Рис. 2. Эволюция пространственного распределения интегрального параметра D_{CORR} в период подготовки и прохождения землетрясения магнитудой $M = 7,4$ (19 августа 1992 г., 02:04:36). Максимум в развитии аномалии наблюдался за ~ 8 ч до события

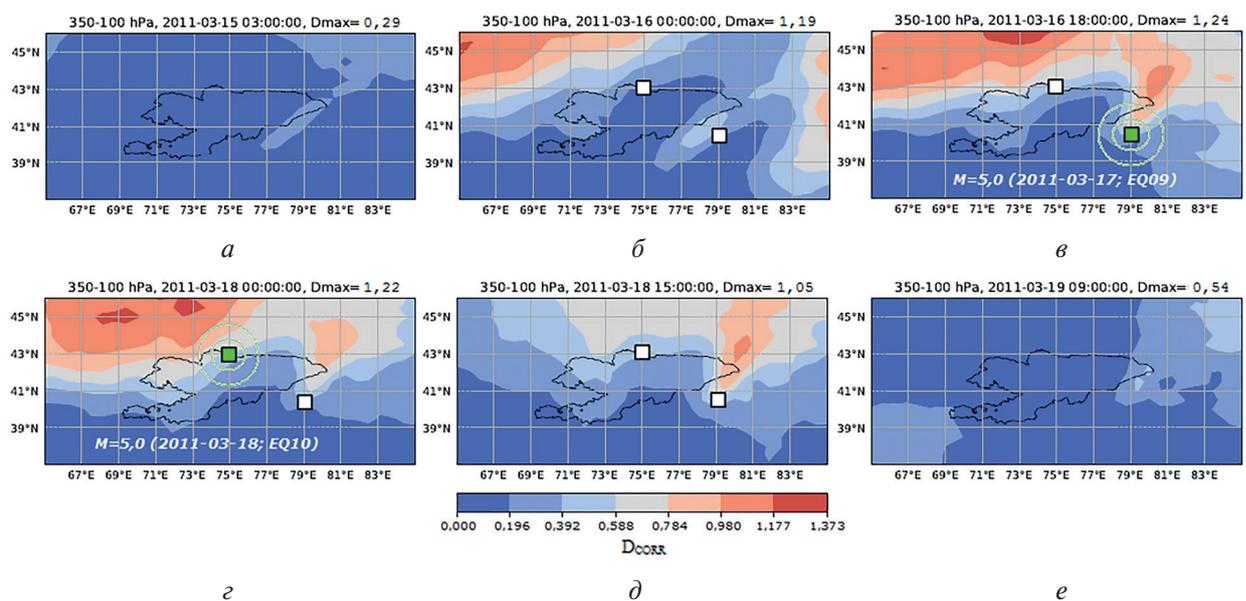


Рис. 3. Карты пространственного распределения параметра D_{CORR} в период подготовки и прохождения двух землетрясений магнитудой $M = 5,0$ (15–19 марта 2011 г.)

Результаты расчёта пространственно-временного распределения аномальных возмущений температуры 17–19 августа 1992 г. приведены на рис. 2. Набор карт демонстрирует наиболее показательные моменты динамики процесса эволюции аномалий температуры в период

подготовки и прохождения крупнейшего в регионе за последние 30 лет землетрясения магнитудой $M = 7,4$ (19.08.1992; 02:04:37 UTC), эпицентр которого находился в сейсмически слабоактивном районе Суусамырской впадины. В течение 50 мин в этом районе произошли три сильных афтершока ($M \geq 6,1$). В результате динамической подвижки по разлому севернее эпицентров землетрясений была выявлена система широтных первичных сейсмических дислокаций длиной около 50 км (Kashkin et al., 2020). Учитывая данные о характере нарушения земной коры, можно сделать вывод, что процесс подготовки землетрясения сопровождался сейсмогравитационными возмущениями. Формирование области высоких значений параметра D_{CORR} ($D_{CORR} = 1,35-1,45$) наблюдалось вблизи эпицентра землетрясения (см. рис. 2д–ж). Расположение этой области оставалось практически неизменным на протяжении всего периода наблюдения (примерно 2 сут), а максимум в развитии аномалии фиксировался за ~ 8 ч до основного события (см. рис. 2е).

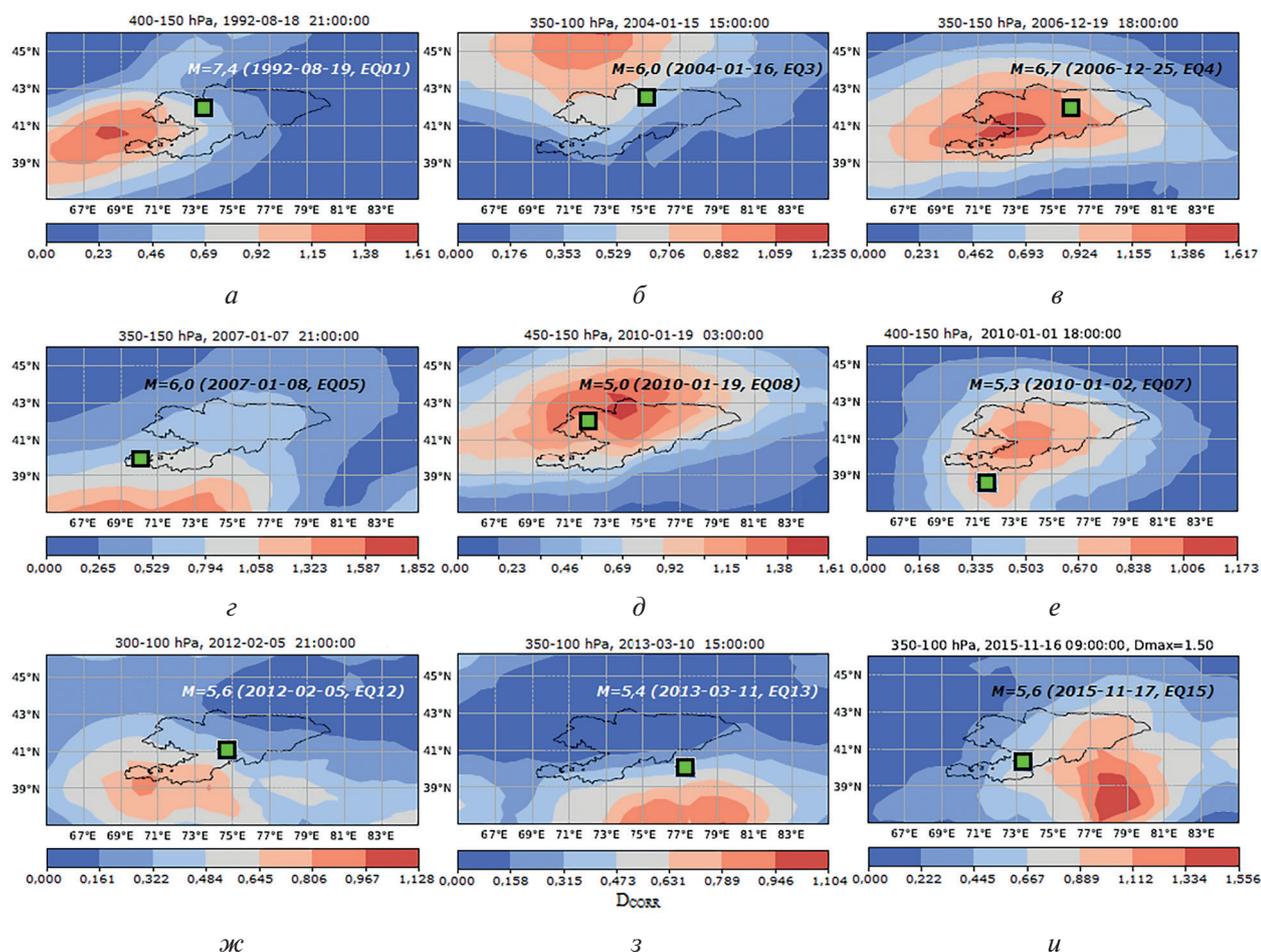


Рис. 4. Пространственное распределение параметра D_{CORR} в периоды подготовки землетрясений $M \geq 5,0$ (см. таблицу)

Следующий пример интересен тем, что 17–18 марта 2011 г. с разницей во времени 18 ч были зарегистрированы два землетрясения магнитудой $M = 5,0$ (EQ09, EQ10), эпицентры которых разнесены в пространстве на ~ 500 км. Как видно из рис. 3 (см. с. 117), возмущение температуры в этом случае охватывало более обширную область, а формирование двух локальных максимумов согласовано с активизацией сейсмического процесса в регионе.

Из анализа полученных результатов, отражающих особенности распределения параметра D_{CORR} и относящихся ко всем рассматриваемым сейсмическим событиям (рис. 4), произошедшим в пределах одной области исследования в разные годы, следует, что общая закономерность, которая объединяет эти случаи, состоит в том, что им предшествовали аномальные

изменения температуры вблизи эпицентров землетрясений. Аномалии температуры в области тропопаузы были относительно кратковременными (от нескольких часов до 1–2 дней), но главное, были синхронизированы во времени и в пространстве, предвеляя эти сейсмические события. Горизонтальные размеры областей аномального изменения температуры находились в пределах нескольких сотен километров.

Различия рассмотренных периодов подготовки землетрясений проявлялись, прежде всего, во времени запаздывания сейсмических событий (от ~3 до 72 ч) относительно появления аномалий температуры вблизи эпицентральной области, а также в разбросе максимальных величин параметра D_{CORR} . Предварительный анализ результатов показал определённую связь величины параметра D_{CORR} с магнитудой землетрясений $M \geq 5,0$. Коэффициент корреляции между D_{CORR} и M составлял ~0,7. Что касается землетрясений $4,0 < M < 5,0$, примерно в 50 % случаев (30 из 58) аномалии температуры не были обнаружены, что, вероятно, свидетельствует об отсутствии связи между более слабой сейсмичностью и появлением сейсмогравитационных пульсаций (Линьков и др., 1990), или эти вариации слабо различимы на фоне других процессов, развивающихся в атмосфере.

Различия рассмотренных периодов подготовки землетрясений проявлялись, прежде всего, во времени запаздывания сейсмических событий (от ~3 до 72 ч) относительно появления аномалий температуры вблизи эпицентральной области, а также в разбросе максимальных величин параметра D_{CORR} . Предварительный анализ результатов показал определённую связь величины параметра D_{CORR} с магнитудой землетрясений $M \geq 5,0$. Коэффициент корреляции между D_{CORR} и M составлял ~0,7. Что касается землетрясений $4,0 < M < 5,0$, примерно в 50 % случаев (30 из 58) аномалии температуры не были обнаружены, что, вероятно, свидетельствует об отсутствии связи между более слабой сейсмичностью и появлением сейсмогравитационных пульсаций (Линьков и др., 1990), или эти вариации слабо различимы на фоне других процессов, развивающихся в атмосфере.

Заключение

В статье проанализированы пространственно-временные изменения температуры в верхней тропосфере/нижней стратосфере, полученные по данным спутникового дистанционного зондирования над территорией Кыргызстана и вблизи его границ, которые были сопоставлены с сейсмической активностью в Тянь-Шане. Сейсмические данные представлены 16 землетрясениями магнитудой от 5,0 до 7,4, зарегистрированными в 1992–2015 гг. В качестве главных признаков, характеризующих поведение температуры атмосферы перед сильными землетрясениями, рассматривались аномальные изменения амплитуды, частоты и фазы вариаций температуры, происходящие ниже и выше тропопаузы. Представленные пространственно-временные распределения зон повышенных значений параметра аномальных вариаций температуры указывают на вероятную связь с сейсмическим процессом. Во всех исследуемых случаях вблизи эпицентров формировались области аномальных возмущений температуры, горизонтальный размер которых составлял несколько сотен километров. Положение в пространстве аномальных областей оставалось достаточно стабильным на протяжении 1–3 сут. Время задержки землетрясений относительно максимума в развитии аномалий, как правило, не превышало 3,0 сут.

Выявленные особенности поведения температуры в UTLS дают основания считать, что длиннопериодные сейсмогравитационные процессы играют важную роль в развитии возмущений температуры, которые проявляются непосредственно перед сильными сейсмическими событиями, перекрывая, вероятно, влияние других факторов. Также, по-видимому, имеет место взаимосвязь предсейсмических аномальных образований в области UTLS с изменением (ослаблением или блокированием) зональной циркуляции, что должно быть связано с изменением градиента атмосферного давления. И наоборот, неоднородно распределённая с высотой циркуляция атмосферы оказывает влияние (главным образом на начальной и финальной стадиях) на пространственную изменчивость области аномальных возмущений температуры.

В этом отношении очевидна необходимость проведения дальнейших исследований с привлечением дополнительных данных и методов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Годдардского центра данных и информации по наукам о Земле (*англ.* Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)) НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, *англ.* National Aeronautics and Space Administration — NASA) за обеспечение свободного доступа к данным спутниковых измерений.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

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. Акад. наук СССР.* 1990. Т. 313. № 5. С. 1095–1098.
3. *Сverdlik Л. Г., Имашев С. А.* О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // *Геосистемы переходных зон.* 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
4. *Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Лиходеев Д. В.* Сейсмогравитационные процессы, сопровождающие эволюцию сейсмофрактальных структур литосферы // *Геодинамика и тектонофизика.* 2020. Т. 11. № 1. С. 53–61. DOI: 10.5800/GT-2020-11-1-0462.
5. *Birner T.* Fine-scale structure of the extratropical tropopause region // *J. Geophysical Research.* 2006. V. 111. Iss. D4. Art. No. D04104. 14 p. DOI: 10.1029/2005JD006301.
6. *Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review // *Natural Hazards and Earth System Science.* 2018. V. 18. No. 4. P. 1013–1036. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>.
7. *Kashkin V., Sverdlik L., Odintsov R., Rubleva T., Simonov K., Romanov A., Imashev S.* Features of atmospheric disturbances in temperate latitudes before strong earthquakes ($M > 7$) according to satellite measurements // *Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS'2019): E3S Web Conf.* 2020. V. 149. Art. No. 03011. 6 p. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014903011>.
8. *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 tropopauses // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2017. V. 17. No. 18. P. 11541–11566. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-17-11541-2017>.
9. *Morozova A. L., Blanco J. J., Ribeiro P.* Modes of temperature and pressure variability in midlatitude troposphere and lower stratosphere in relation to cosmic ray variations // *Space Weather.* 2017. V. 15. No. 5. P. 673–690. DOI: 10.1002/2016SW001582.
10. *Pilch Kedzierski R., Matthes K., Bumke K.* Wave modulation of the extratropical tropopause inversion layer // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2017. V. 17. No. 6. P. 4093–4114. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-17-4093-2017>.
11. *Randel W. J., Seidel D. J., Pan L. L.* Observational characteristics of double tropopauses // *J. Geophysical Research.* 2007. V. 112. Iss. D7. Art. No. D07309. 13 p. DOI: 10.1029/2006JD007904.
12. *Singh R. P., Mehdi W., Gautam R., Senthil Kumar J., Zlotnicki J., Kafatos M.* Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008 // *Intern. J. Remote Sensing.* 2010. V. 31. No. 13. P. 3341–3354. DOI: 10.1080/01431161.2010.487503.
13. *Sverdlik L. G., Imashev S. A.* Diagnosis of Atmospheric Temperature Anomalies in Seismically Active Regions of Asia on the Basis of Satellite Data // *J. Siberian Federal Univ. Engineering and Technologies.* 2018. V. 11. No. 8. P. 956–963. DOI: 10.17516/1999-494X-0117.
14. *Tronin A.* Satellite remote sensing in seismology: A review // *Remote Sensing.* 2010. V. 2. No. 1. P. 124–150. URL: <https://doi.org/10.3390/rs2010124>.

Spatial-temporal distribution of atmospheric perturbations before strong earthquakes in Tien-Shan

L. G. Sverdlik, S. A. Imashev

Research Station RAS in Bishkek, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

E-mail: l.sverdlik@mail.ru

In this paper, we analyzed spatial-temporal temperature changes in the upper troposphere/lower stratosphere (UTLS) above the territory of Kyrgyzstan detected by spaceborne remote sensing data which were compared against seismic activities in Tien-Shan. To examine temperature variability in pre-seismic periods, 16 earthquakes of magnitude 5.0 to 7.4 were selected that occurred in the territory or in the vicinity of Kyrgyzstan borders during the 1992–2015 period. The anomalous changes highlighted in temperature time series, that were used as pre-seismic attributes, were determined using a special algorithm, which allows to visualize perturbations in the tropopause in one- and bi-dimensional representation. Anomalous variations of integrated parameters were calculated with account for specifics of amplitude variations and the phase of short-term temperature variations at UTLS isobaric levels divided by the tropopause. The results obtained show that the spatial structure and temperature anomalies dynamics in the sphere of the tropopause have a sufficient stable relation to seismic activity. The assessment of the spatial scale and time of anomalous temperature perturbations manifestations demonstrated that the temperature anomalies, the horizontal dimension of which was about 200–500 km, were observed in all the reviewed cases for a period from ~3 to 72 hours before the main seismic event.

Keywords: earthquake, satellite data, upper troposphere, lower stratosphere, temperature, anomalies, tropopause, integral parameter

Accepted: 13.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122

References

1. Kashkin V. B., Vnutrennie gravitatsionnye volny v troposfere (Inner gravity waves in the troposphere), *Optika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 26, No. 10, pp. 908–916.
2. Lin'kov E. M., Petrova L. N., Osipov K. Ts., Seismogravitatsionnye pul'satsii Zemli i vozmushcheniya atmosfery kak vozmozhnye predvestniki sil'nykh zemletryasenii (Seismogravitational pulsations of the Earth and atmospheric disturbances as possible precursors of strong earthquakes), *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1990, Vol. 313, No. 5, pp. 1095–1098.
3. Sverdlik L. G., Imashev S. A., O pre-seismicheskikh anomal'yakh temperatury atmosfery (On pre-seismic anomalies of atmosphere temperature), *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 19–26, DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
4. Sobisevich A. L., Sobisevich L. E., Likhodeev D. V., Seismogravitatsionnye protsessy, soprovozhdayushchie evolyutsiyu seismofractal'nykh struktur litosfery (Seismogravitational processes accompanying the evolution of seismic focal structures in the lithosphere), *Geodinamika i tektonofizika*, 2020, Vol. 11, No. 1, pp. 53–61, DOI: 10.5800/GT-2020-11-1-0462.
5. Birner T., Fine-scale structure of the extratropical tropopause region, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, Issue D4, Art. No. D04104, 14 p., DOI: 10.1029/2005JD006301.
6. Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X., Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, *Natural Hazards and Earth System Science*, 2018, Vol. 18, No. 4, pp. 1013–1036, available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>.
7. Kashkin V., Sverdlik L., Odintsov R., Rubleva T., Simonov K., Romanov A., Imashev S., Features of atmospheric disturbances in temperate latitudes before strong earthquakes ($M > 7$) according to satellite measurements, *Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS'2019): E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 149, Art. No. 03011, 6 p., available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014903011>.
8. 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 tropopauses, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, No. 18, pp. 11541–11566, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-17-11541-2017>.

9. Morozova A. L., Blanco J. J., Ribeiro P., Modes of temperature and pressure variability in midlatitude troposphere and lower stratosphere in relation to cosmic ray variations, *Space Weather*, 2017, Vol. 15, No. 5, pp. 673–690, DOI: 10.1002/2016SW001582.
10. Pilch Kedzierski R., Matthes K., Bumke K., Wave modulation of the extratropical tropopause inversion layer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, No. 6, pp. 4093–4114, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-17-4093-2017>.
11. Randel W. J., Seidel D. J., Pan L. L., Observational characteristics of double tropopauses, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, Issue D7, Art. No. D07309, 13 p., DOI: 10.1029/2006JD007904.
12. Singh R. P., Mehdi W., Gautam R., Senthil Kumar J., Zlotnicki J., Kafatos M., Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 13, pp. 3341–3354, DOI: 10.1080/01431161.2010.487503.
13. Sverdlik L. G., Imashev S. A., Diagnosis of Atmospheric Temperature Anomalies in Seismically Active Regions of Asia on the Basis of Satellite Data, *J. Siberian Federal Univ. Engineering and Technologies*, 2018, Vol. 11, No. 8, pp. 956–963, DOI: 10.17516/1999-494X-0117.
14. Tronin A., Satellite remote sensing in seismology: A review, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2, No. 1, pp. 124–150, available at: <https://doi.org/10.3390/rs2010124>.