Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA

Л. Г. Свердлик

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

Предложен новый подход к анализу пространственно-временных вариаций температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS), основанный на использовании модифицированного критерия STA/LTA и предназначенный для выделения и идентификации возмущений. Разработанный алгоритм позволяет обнаруживать связанные с сейсмической активностью уникальные вариации, присутствующие в непрерывных изменениях температуры и согласованно проявляющиеся на различных уровнях UTLS. Для этого были определены оптимальные параметры для вычисления отношения характеристических функций в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах. Тестирование предлагаемого алгоритма показало его достаточно высокую устойчивость к воздействию на изменения температуры различных несейсмических факторов и способность работать в реальном времени, что удобно для прогнозных целей и позволяет автоматизировать идентификацию аномалий. Приведены результаты ретроспективного анализа спутниковых временных рядов температуры над эпицентральной областью разрушительного Нуринского землетрясения магнитудой M = 6,7, произошедшего 5 октября 2008 г. в сейсмически активном регионе Тянь-Шаня. Установлено, что явно выраженная мезомасштабная аномалия температуры в UTLS наблюдалась в период с 1 по 3 октября 2008 г. Аномальная область начала формироваться на расстоянии ~200-300 км от эпицентра, а затем перемещалась в восточном направлении и достигла максимума 2 октября 2008 г. за 3 дня до землетрясения M = 6,7. Пространственные и временные распределения возмущения температуры дают основание предполагать вероятную связь с подготовкой к сейсмическому событию.

Ключевые слова: землетрясение, спутниковые данные, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера, температура, аномалии, алгоритм, STA, LTA, дисперсия, идентификация

> Одобрена к печати: 20.05.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149

Введение

Изучение тепловых аномалий на поверхности Земли и в атмосфере представляет собой одно из самых многообещающих направлений исследований в рамках общих усилий по установлению возможной связи с сейсмической активностью (Tramutoli et al., 2015). Эксперименты, проведённые в разных географических регионах с использованием спутниковых данных, подтвердили появление тепловых эффектов перед сильными землетрясениями и их потенциальную возможность служить индикатором тектонической активности (Tronin, 1996; Zhang et al., 2018). Изучение процессов взаимодействия между различными слоями атмосферы и литосферой, протекающих в условиях сильной пространственно-временной изменчивости вертикальной структуры температуры атмосферы, является сложной и в то же время актуальной задачей, что определяет важность разработки эффективных способов выделения в изменениях температуры аномальных вариаций. Можно отметить большой прогресс, достигнутый в последние десятилетия в технике обработки и анализе данных дистанционного зондирования, интерпретации происхождения атмосферных возмущений и разработке физических моделей, обосновывающих связь между аномальными вариациями и возникновением землетрясений (Yang et al., 2019). Ранее были опубликованы результаты многочисленных исследований в сейсмоопасных районах, использующих для выделения предсейсмических аномалий методы на основе RST (англ. Robust Satellite Techniques) (см., например, работу (Tramutoli et al., 2015)) и его более сложные модификации (Sverdlik, Imashev, 2020).

Одним из перспективных способов идентификации аномалий в данных дистанционного зондирования может стать представленный в настоящей статье алгоритм, основанный на использовании известного критерия STA/LTA (*англ*. Short Time Averaging/Long Time Averaging), который получил широкое распространение для выделения импульсных колебаний, главным образом для распознавания прихода сейсмической волны и регистрации микросейсмических событий (Sabbione, Velis, 2013). Данный критерий в несколько изменённом виде может быть применён к спутниковым измерениям температуры T(t). Присутствующие в изменениях температуры атмосферы возмущения различного природного происхождения (атмосферные процессы, солнечная активность, землетрясения и пр.), характеризующиеся различным спектральным составом с наличием нескольких периодичностей, интенсивность которых изменянется со временем, предоставляют возможность идентифицировать аномальные вариации, связанные с подготовкой сильных сейсмических событий (Sverdlik, Imashev, 2020).

В настоящем исследовании представлено краткое описание разработанного алгоритма, основанного на использовании различных подходов к вычислению критерия STA/LTA и предназначенного для выделения и идентификации аномальных возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS — *англ*. Upper Troposphere and Lower Stratosphere), связанных с сейсмической активностью в зоне сопряжения двух крупных горных систем Тянь-Шаня и Памира.

Данные сейсмических и спутниковых измерений

Тестирование алгоритма проведено на примере разрушительного Нуринского землетрясения с магнитудой M = 6,7 (39,52° с. ш., 73,77° в.д.), которое произошло в южной части Кыргызстана 5 октября 2008 г. (15:52:49 UTC) на глубине примерно 27,5 км (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/). Всего в течение дня было зарегистрировано более 50 афтершоков с магнитудами M = 3,0 (http://www.isc.ac.uk), которые сконцентрировались вблизи эпицентра главного землетрясения (*puc. 1*). Сотрясениями была охвачена обширная территория, включающая приграничные районы Кыргызстана, Таджикистана и Китая.



Puc. 1. Афтершоковое поле землетрясения M = 6,7 (05.10.2008) (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gjd4/shakemap/intensity)

Информация об изменениях температуры атмосферы получена по данным глобального реанализа MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM 5.12.4/summary), версия 2) разработанного в NASA GMAO (англ. National Aeronautics and Space Administration – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, Global Modelling and Assimilation Office — Отдел по глобальному моделированию и ассимиляции данных) для периода современной космической эры с использованием системы наблюдения GEOS-5 (Goddard Earth Observing System, версия 5) и алгоритмов ассимиляции атмосферных данных ADAS (Atmospheric Data Assimilation System, версия 5.12.4) (Manney et al., 2017). Анализируемый набор временных и высотных вариаций температуры атмосферы на 10 стандартных изобарических уровнях (p_k) от 500 до 70 гПа охватывал высотный диапазон от верхней тропосферы до нижней стратосферы (UTLS). Данные спутниковых наблюдений представляли собой значения температуры в узлах равномерной сетки 0,5×0,625° и были восстановлены над участком, ограниченным координатами 35-50° с.ш. и 60-90° в.д. для временного периода с января по декабрь 2008 г. Дискретизация температурных данных T(t)по времени составляла $\Delta t = 3$ ч.

Алгоритм обработки данных спутниковых измерений

Идентификация связанных с сейсмической активностью возмущений температуры UTLS производилась с использованием алгоритма, основанного на анализе отношения статистических показателей в коротком и длинном временных окнах (STA/LTA). Классическая формула расчёта критерия STA/LTA (с выравниванием скользящих окон по правому краю) может быть записана следующим образом (https://rdrr.io/cran/IRISSeismic/man/STALTA.html):

$$R(t_i, p_k) = \frac{\text{STA}(t_i, p_k)}{\text{LTA}(t_i, p_k)} = \frac{\frac{1}{N_S} \sum_{i=N_S}^{i} CF(t_i, p_k)}{\frac{1}{N_L} \sum_{i=N_L}^{i} CF(t_i, p_k)},$$

где: t_i — время текущей выборки (или отсчёт) временного ряда температуры на изобарическом уровне p_k ; N_S — длина короткого (STA) временного окна; N_L — размер длинного (LTA) окна; $CF(t_i)$ — значение характеристической функции, соответствующее моменту времени t_i .

Основными параметрами критерия STA/LTA, наряду с выбором оптимальной характеристической функции *CF*, выступают размеры окон (N_S, N_L) и порог обнаружения (THR) события (Vaezi, Van der Baan, 2015), в данном случае — возмущения температуры. Ещё один принципиальный момент — определение наиболее информативных уровней, которые целесообразно использовать для конкретного расположения эпицентра землетрясения с учётом особенностей динамики вертикальной структуры температуры. Примеры вертикальных профилей нормированных аномалий (*puc. 2a*, см. с. 144) показывают, что перед Нуринским землетрясением (с 1 по 4 октября 2008 г.) наиболее интенсивные противофазные изменения температуры происходили на изобарических уровнях 200 гПа (~12 км) в верхней тропосфере (UT) и 100 гПа (~17 км) в нижней стратосфере (LS). На основании сопоставления данных о сейсмической активности с особенностями поведения временных рядов температуры в UTLS был сделан выбор в пользу применения дисперсии (VAR) в качестве характеристической функции (*puc. 26*). Эффективность алгоритма в этом случае была очевидно выше.

Анализ данных температурных измерений (Sverdlik, Imashev, 2020) свидетельствует, что сейсмо-атмосферные возмущения не проявляются одновременно во всех частотных диапазонах. В результате проведённых исследований был предложен подход, основанный на выделении противофазных аномальных вариаций, период которых составляет 5–6 сут. Соответственно, значения скользящих дисперсий в коротком окне (VAR_{STA}), рассчитанные для каждого момента времени ($\Delta t = 3$ ч), описывают локальные изменения температуры, которые произошли в предыдущие 2,5–3,0 сут. Такая величина окна соответствует диапазону полупериодов, где, как предполагается, сейсмо-атмосферные возмущения доминируют над другими источниками, определяющими изменения температуры. Скользящие дисперсии в длинном окне (VAR_{ITA}) рассчитывались по значениям за предшествующие 15 сут.



Рис. 2. Высотные профили нормированных аномалий (*a*) и дисперсий (VAR_{STA}) флуктуаций (*б*) температуры в диапазоне высот 5,0–25,0 км над эпицентральной областью (38,5–40,5° с.ш., 73,125– 75,0° в.д.) Нуринского землетрясения *M* = 6,7 с 1 по 4 октября 2008 г. (для 00:00 UTC)

Выделение возмущений температуры проводилось на основе вычисления показателя аномальности $\delta T(t_i)$, равного произведению двух отношений ($R(t_i) = \text{VAR}_{\text{STA}}(t_i)/\text{VAR}_{\text{LTA}}(t_i)$), рассчитанных для временных рядов температуры на изобарических уровнях в верхней тропосфере (P_{UT}) и нижней стратосфере (P_{LS}), что позволило сделать двухпараметрический алгоритм более устойчивым к воздействию различных несейсмических факторов:

$$\delta T(t_i) = R(t_i, p_{UT}) R(t_i, p_{LS}) \ge \text{THR.}$$
(1)

Пороговое значение THR задавалось в диапазоне от 2,0 до 3,0 и устанавливалось равным примерно одному стандартному отклонению исходных временных рядов температуры.

Для минимизации вероятности формирования ложных (синфазных) аномалий параметр $\delta T(t_i)$ вычислялся с учётом коэффициента корреляции $r(t_i)$ между изменениями температуры на рассматриваемых изобарических уровнях в каждом коротком временном окне (STA):

$$\delta T_{\text{CORR}}(t_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } r(t_i)_{\text{STA}} \ge 0, \\ \delta T(t_i) | r(t_i)_{\text{STA}} | & \text{если } r(t_i)_{\text{STA}} < 0. \end{cases}$$
(2)

Результаты идентификации возмущений во временных рядах температуры

Рисунок 3 (см. с. 145) иллюстрирует процесс детектирования предсейсмических возмущений температуры в верхней тропосфере (200 гПа) и нижней стратосфере (100 гПа) (см. *рис. 3а*) в период с 1 сентября по 31 октября 2008 г. В соответствии с представленным алгоритмом для распознавания и выделения наиболее устойчивых в пространстве и во времени аномальных вариаций температуры использовались результаты сравнения дисперсий предыдущих значений $T(t_i)$ в коротком и длинном окне (см. *рис. 3б*, *в*) на двух уровнях UTLS. При обнаружении возмущения температуры дисперсия VAR_{STA} изменяется быстрее, чем VAR_{LTA}. Соответственно, происходит значительное увеличение отношения STA/LTA (см. *рис. 3г*). Алгоритм максимально использует эффект когерентности в аномальных изменениях температуры, что отчётливо проявлялось 5 сентября и 2–3 октября 2008 г. По результатам вычисления δT выявлялись окна, в которых этот параметр превышал пороговое значение THR = 3,0 (см. *рис. 3д*).



Рис. 3. Исходные временные ряды температуры (*a*); скользящие дисперсии VAR_{STA} и VAR_{LTA} на уровнях 100 гПа (*б*) и 200 гПа (*в*); соответствующие отношения дисперсий STA/LTA (*г*) и их произведение (δT) (*d*) в точке с координатами 43,0° с.ш. и 73,125° в.д. (маркерами отмечен момент землетрясения M = 6,7); распределение логарифма сейсмической энергии (log *Es*) (*e*) в период с 1 сентября по 31 октября 2008 г.



Рис. 4. Вариации температуры на изобарических уровнях 300, 200 и 100 гПа (*a*), изменения параметров $\delta T(\delta)$ и $\delta T_{\text{CORR}}(\epsilon)$, распределение магнитуд ($M \ge 4,0$) и числа сейсмических событий $N(\epsilon)$ в 2008 г.

Как видно, наиболее интенсивные короткопериодные возмущения температуры в области UTLS наблюдались примерно за 2–3 дня до землетрясения M = 6,7 (см. *рис. 3e*) и могли быть связаны с генерацией акустических и гравитационных волн (Свердлик, Имашев, 2020; Yang et al., 2019). Во все другие моменты времени исследуемого периода такого эффекта не наблюдалось.

Проверка устойчивости результатов диагностирования возмущений температуры в течение более длительного временного периода с января по декабрь 2008 г. (*рис. 4a*, см. с. 145) показала, что аномальное изменение температуры, предваряющее основное сейсмическое событие (*рис. 4z*), чётко выделялось после применения алгоритма STA/LTA (*рис. 4б* и *в*) на фоне более слабых возмущений. Приведённые рисунки иллюстрируют также различия в работе алгоритма, реализованного в соответствии с формулами (1) и (2). Использование параметра $\delta T_{\rm CORR}$ (см. *рис. 4в*) позволяет в значительной степени ослабить синфазные возмущения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (например, в феврале – апреле).

Пространственно-временное распределение температурной аномалии

Важный компонент идентификации предсейсмического возмущения заключается в определении не только временной, но и пространственной локальности проявления аномалии температуры. На основе результатов проведённых расчётов была восстановлена трёхмерная матрица $\delta T_{\rm CORR}$, которая использовалась для исследования динамики распределения аномальных возмущений температуры по меридиональному и широтному направлениям. Два поперечных сечения изменчивости $\delta T_{\rm CORR}$ в период с 29 сентября по 5 октября 2008 г., показанные на *рис. 5а* и *б*, позволили оценить местоположение и размеры аномальных областей, их эволюцию во времени, а также определить, когда значения $\delta T_{\rm CORR}$ были наибольшими.



Рис. 5. Распределения параметра δT_{CORR} по широте (*a*) и долготе (*б*) с 29 сентября по 5 октября 2008 г. Вертикальные линии указывают момент землетрясения (05.10.2008, 15:52:49 UTC). Горизонтальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения. Красным цветом выделены области, в которых $\delta T_{\text{CORR}} \ge \text{THR} \ge 2,0$

Из представленных рисунков следует, что возмущение UTLS наблюдалось в период с 1 по 3 октября 2008 г. Аномальная область начала формироваться 1 октября в 09:00 UTC западнее эпицентра, а затем переместилась вдоль широты 43° на восток и достигла максимума 2 октября 2008 г. — за 3 дня до землетрясения. Наиболее высокие значения $\delta T_{\rm CORR} = 2,79$ и $\delta T_{\rm CORR} = 2,83$, превышающие THR = 2,0, наблюдались в 03:00 и 06:00 UTC соответственно.

и $\delta T_{\text{CORR}} = 2,83$, превышающие THR = 2,0, наблюдались в 03:00 и 06:00 UTC соответственно. *Рисунки ба и б* (см. с. 147) показывают, что мезомасштабная область аномально высоких значений δT_{CORR} располагалась в пределах координат 40–44° с.ш. и 72–80° в.д. Максимум температурного возмущения, наблюдаемого 2 октября 2008 г., был смещён на ~2–3° в северо-западном направлении (в 00:00 UTC) и на ~2–4° в северо-восточном направлении (в 12:00 UTC) относительно эпицентра землетрясения.



Рис. 6. Эволюция пространственного распределения параметра δ*T*_{CORR} 2 октября 2008 г. в 00:00 UTC (*a*) и 12:00 UTC (*б*). Горизонтальные и вертикальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения *M* = 6,7 (39,52° с. ш., 73,77° в.д.)

Приведённые результаты подтверждают вероятную связь между сейсмической активностью и локальным возмущением температуры в UTLS, устойчиво наблюдающимся в течение 36 ч вблизи эпицентра землетрясения M = 6,7. В предположении, что наиболее вероятный механизм переноса возмущений в системе «литосфера – атмосфера – ионосфера» — акустико-гравитационные волны (АГВ) (Свердлик, Имашев, 2020; Yang et al., 2019), очевидным оказывается влияние инверсионного слоя тропопаузы на вертикальное распространение атмосферных волн. Рассеяние энергии, локальный нагрев и турбулентность, вызванные АГВ, прямо или косвенно изменяют тепловую и динамическую структуру области тропопаузы (Zhang et al., 2015), способствуя формированию возмущений в UTLS (Yu et al., 2019), которые проявляются в короткопериодных вариациях температуры.

Заключение

Таким образом, представленный алгоритм, основанный на использовании модифицированного критерия STA/LTA, обладает достаточно высокой чувствительностью для выделения возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере, связанных с крупными землетрясениями. Очевидное преимущество алгоритма заключается в простоте, эффективности, отсутствии необходимости в дополнительных преобразованиях исходных температурных данных и удобстве использования для прогнозных целей.

Результаты тестирования алгоритма отражают динамику области аномальных изменений температуры, чётко связанную как по времени, так и в пространстве с сейсмическим процессом и с периодом подготовки рассматриваемого землетрясения M = 6,7. При этом был обнаружен эффект смещения максимума аномалии в восточном направлении.

Предсейсмические возмущения температуры в UTLS были идентифицированы с помощью разработанного алгоритма и в нескольких других проанализированных случаях сильных землетрясений ($M \ge 5,0$) на территории Тянь-Шаня. В то же время существует необходимость дальнейших исследований атмосферных эффектов землетрясений.

Автор выражает благодарность сотрудникам Годдардского центра данных и информации по наукам о Земле (NASA GES-DISC) за обеспечение свободного доступа к данным спутни-ковых измерений.

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

Литература

- 1. *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.
- 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. DOI: 10.5194/acp-17-11541-2017.
- 3. *Sabbione J. I., Velis D. R.* A robust method for microseismic event detection based on automatic phase pickers // J. Applied Geophysics. 2013. V. 99. P. 42–50. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.07.011.
- 4. *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. URL: https://metnet.imd.gov. in/mausamdocs/171310_F.pdf.
- Tramutoli V., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Pergola N. From visual comparison to Robust Satellite Techniques: 30 years of thermal infrared satellite data analyses for the study of earthquake preparation phases // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2015. V. 56. No. 2. P. 167–202. DOI: 10.4430/ bgta0149.
- 6. *Tronin A.A.* Satellite Thermal Survey A New Tool for the Study of Seismoactive Regions // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 8. P. 1439–1455. DOI: 10.1080/01431169608948716.
- 7. *Vaezi Y., Van der Baan M.* Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection // Geophysical J. Intern. 2015. V. 203. No. 3. P. 1896–1908. DOI: 10.1093/gji/ggv419.
- 8. *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. No. 2. P. 1410–1425. DOI: 10.1029/2018JA026002.
- 9. *Yu D., Xu X., Luo J., Li J.* On the Relationship between Gravity Waves and Tropopause Height and Temperature over the Globe Revealed by COSMIC Radio Occultation Measurements // Atmosphere. 2019. V. 10. Iss. 2. Art. No. 75. DOI: 10.3390/atmos10020075.
- Zhang X., Kang C., Ma W., Ren J., Wang Y. Study on thermal anomalies of earthquake process by using tidal-force and outgoing-longwave-radiation // Thermal Science. 2018. V. 22. No. 2. P. 767–776. DOI: 10.2298/TSCI161229153Z.
- Zhang Y., Zhang S., Huang C., Huang K., Gong Y., Gan Q. The interaction between the tropopause inversion layer and the inertial gravity wave activities revealed by radiosonde observations at a midlatitude station // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. No. 16. P. 8099–8111. DOI: 10.1002/2015JD023115.

Identification of pre-seismic atmospheric perturbations using modified STA/LTA criterion

L.G. Sverdlik

Research Station RAS in Bishkek, Bishkek 720049, Kyrgyzstan E-mail: l.sverdlik@mail.ru

This paper presents a new approach to the analysis of spatial-temporal temperature changes in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) based on the use of a modified STA/LTA criterion and focused on selecting and identifying perturbations. The developed algorithm allows detecting unique variations associated with seismic activity that are present in continuous temperature changes and consistently appear at various UTLS levels. For this purpose, the optimal parameters for calculating the ratio of the characterizing functions in the short moving time window (STA) and the long one (LTA) were determined. Testing of the proposed algorithm showed its sufficiently high resistance to the effect of non-seismic factors on temperature changes and ability to operate in real time, which is promising for forecasting purposes and allows automating the identification of anomalies. The paper presents the results of a retrospective analysis of satellite temperature time series above the epicentral area of the destructive Nura earthquake of M = 6.7 occurred in a seismically active Tien-Shan region on October 5, 2008. It is established that an explicit mesoscale temperature anomaly in UTLS was observed during the period from October 1 to 3, 2008. The anomalous area started to form at a distance

of ~200-300 km from the epicenter, then moved to the East and reached the maximum on October 2, 2008, three days before the earthquake of M = 6.7. The temporal and spatial distributions of temperature perturbation were probably a precursive indicator of the seismic event.

Keywords: earthquake, satellite data, upper troposphere, lower stratosphere, temperature, anomalies, algorithm, STA, LTA, variance, identification

Accepted: 20.05.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149

References

- 1. 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.
- 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, DOI: 10.5194/acp-17-11541-2017.
- 3. Sabbione J. I., Velis D. R., A robust method for microseismic event detection based on automatic phase pickers, *J. Applied Geophysics*, 2013, Vol. 99, pp. 42–50, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.07.011.
- 4. 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, available at: https://met-net.imd.gov.in/mausamdocs/171310_F.pdf.
- Tramutoli V., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Pergola N., From visual comparison to Robust Satellite Techniques: 30 years of thermal infrared satellite data analyses for the study of earthquake preparation phases, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2015, Vol. 56, No. 2, pp. 167–202, DOI: 10.4430/bgta0149.
- 6. Tronin A.A., Satellite Thermal Survey A New Tool for the Study of Seismoactive Regions, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 8, pp. 1439–1455, DOI: 10.1080/01431169608948716.
- Vaezi Y., Van der Baan M., Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection, *Geophysical J. Intern.*, 2015, Vol. 203, No. 3, pp. 1896–1908, DOI: 10.1093/gji/ ggv419.
- 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, No. 2, pp. 1410–1425, DOI: 10.1029/2018JA026002.
- 9. Yu D., Xu X., Luo J., Li J., On the Relationship between Gravity Waves and Tropopause Height and Temperature over the Globe Revealed by COSMIC Radio Occultation Measurements, *Atmosphere*, 2019, Vol. 10, Issue 2, Art. No. 75, DOI: 10.3390/atmos10020075.
- Zhang X., Kang C., Ma W., Ren J., Wang Y., Study on thermal anomalies of earthquake process by using tidal-force and outgoing-longwave-radiation, *Thermal Science*, 2018, Vol. 22, No. 2, pp. 767–776, DOI: 10.2298/TSCI161229153Z.
- 11. Zhang Y., Zhang S., Huang C., Huang K., Gong Y., Gan Q., The interaction between the tropopause inversion layer and the inertial gravity wave activities revealed by radiosonde observations at a midlatitude station, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, Vol. 120, No. 16, pp. 8099–8111, DOI: 10.1002/2015JD023115.