

УДК 550.34.06.013.2:551.510.412
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-179-185

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Л.Г. Свєрдлик

Аннотация. Представлены результаты диагностирования аномалий температуры в нижней атмосфере, основанные на ретроспективном анализе данных дистанционного зондирования над эпицентральной областью землетрясения магнитудой $M = 5.1$, произошедшего 15 февраля 2020 г. в восточной части Кыргызстана на границе с Китаем. Для анализа использовались вертикальные профили температуры на изобарических уровнях от 500 до 40 гПа, полученные по данным глобального реанализа MERRA-2. Как показала обработка спутниковых данных, проведенная с использованием разработанного алгоритма, область аномального возмущения температуры наблюдалась вблизи эпицентра за 5–6 дней до рассматриваемого сейсмического события. Аномалии температуры наблюдались в условиях спокойной геомагнитной обстановки (значения D_{ST} -индекса варьировали от -20 нТл до $+10$ нТл), что дает основание предполагать их вероятную связь с процессом подготовки землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение; спутниковые данные; температура; верхняя тропосфера; нижняя стратосфера; возмущение; алгоритм; STA; LTA; дисперсия; D_{ST} -индекс.

СЕЙСМИКАЛЫК БУЗУЛУУЛАРДЫ ИЗИЛДӨӨ ЖАНА АНЫКТОО ҮЧҮН АТМОСФЕРАНЫН ТӨМӨНКҮ КАТМАРЫНА СПУТНИКТИК МОНИТОРИНГ ЖҮРГҮЗҮҮ

Л.Г. Свєрдлик

Аннотация. Макалада 2020-жылдын 15-февралында Кыргызстандын чыгыш бөлүгүндө Кытай менен чек ара тилкесинде болгон магнитудасы $M=5,1$ баллдык жер титирөөнүн эпицентралдык аймагын аралыктан зонддоо маалыматтарына ретроспективдүү талдоо жүргүзүүнүн негизинде атмосферанын төмөнкү катмарындагы температуралык аномалияларды диагностикалоонун натыйжалары берилди. Талдоо жүргүзүү үчүн MERRA-2 глобалдык реанализ маалыматтарынан алынган 500 дөн 40 гПага чейинки изобардык деңгээлдердеги вертикалдуу температура профилдери колдонулган. Иштелип чыккан алгоритмди колдонуу менен жүргүзүлгөн спутниктик маалыматтарды иштеп чыгуу көрсөткөндөй, эпицентрге жакын жерде сейсмикалык окуяга чейин 5–6 күн мурун температуранын аномалдуу бузулушу байкалган. Тынч геомагниттик кырдаалдын шартында температуранын аномалиялары байкалган (D_{ST} -индексинин мааниси -20 нТлдан $+10$ нТлга чейин өзгөргөн), бул алардын жер титирөөгө даярдоо процесси менен болжолдуу байланышын көрсөтүп турат.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; спутник маалыматтары; температура; жогорку тропосфера; төмөнкү стратосфера; бузулуу; алгоритм; STA; LTA; дисперсия; D_{ST} -индекси.

SATELLITE MONITORING OF THE LOWER ATMOSPHERE TO DETECT AND IDENTIFY PRE-SEISMIC DISTURBANCES

L. G. Sverdlik

Abstract. The results of diagnosing temperature anomalies in the lower atmosphere based on a retrospective analysis of remote sensing data over the epicentral region of a magnitude $M = 5.1$ earthquake that occurred on February 15, 2020, in the eastern part of Kyrgyzstan near the border with China are presented. Vertical temperature profiles at isobaric levels from 500 to 40 hPa were used for the analysis, obtained from the MERRA-2 global reanalysis data. Satellite data processing using the developed algorithm revealed an area of temperature anomaly disturbance near the epicenter approximately 5-6 days before the seismic event under calm geomagnetic conditions (D_{ST} index values

ranging from -20 nT to $+10$ nT), providing grounds to suggest their potential connection to the earthquake preparation process.

Keywords: earthquake; satellite data; temperature; upper troposphere; lower stratosphere; perturbation; algorithm; STA; LTA; variance; D_{ST} index.

Введение. Решение актуальной для сейсмоопасных регионов мира задачи прогноза сильных землетрясений во многих исследованиях связывают с процессами, протекающими в атмосфере Земли [1]. При этом выбор параметров, которые потенциально могут являться признаками подготовки землетрясений, достаточно широк. Часто используются, например, температура земной коры и приземного воздуха, аэрозольная оптическая толщина, общее содержание водяного пара и озона, поток скрытого тепла от поверхности, уходящая длинноволновая радиация и др. [2–4]. Важной физической характеристикой в исследованиях атмосферных эффектов землетрясений, которая описывает динамику и состояние атмосферы, является температура. В последние годы был выполнен ряд исследований, представляющих результаты анализа спутниковых измерений, которые показали наличие корреляционной связи между сейсмической активностью и изменениями амплитуды и фазы вариаций температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS), например, в период разрушительного землетрясения в Кыргызстане осенью 2008 г. [5, 6], а также накануне крупнейших сейсмических событий с магнитудой $M \geq 7.0$ в зоне Альпийско-Гималайского сейсмического пояса [7]. Данная статья является продолжением этих исследований. Основная задача на данном этапе состояла в расширении географических границ для дополнительной проверки эффективности разработанной методики диагностирования и идентификации атмосферных возмущений перед крупными землетрясениями в других регионах Азии, в частности в Кыргызстане.

Данные наблюдений, методика обработки и регион исследования. Одним из важных регионов для проведения наземного и спутникового мониторинга нижней атмосферы является восточная часть Кыргызстана, где расположена Полевая Экспериментальная База Высокогорной Обсерватории Физики Атмосферных Процессов (ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН). Для исследования корреляций между сильными землетрясениями и возмущениями в атмосфере была определена область, ограниченная координатами: $40.5\text{--}44^\circ$ N и $75\text{--}81^\circ$ E. В 2020–2022 гг. здесь было зарегистрировано 37 событий с магнитудами $M \geq 4.0$ [8]. В качестве примера в работе приведены результаты временной и пространственной изменчивости температуры, относящиеся к крупнейшим из этих событий с магнитудами $M = 5.1$ (рисунок 1), которые произошли 15 февраля 2020 г. в 03:31:56.35 UTC и 28 декабря 2022 г. в 17:16:35 примерно в одном районе на границе Китая и Кыргызстана (координаты событий: 41.815° N; 79.276° E и 41.80° N; 79.56° E, соответственно).

Для анализа временных и высотных вариаций температуры атмосферы использовали данные космических наблюдений в нижней атмосфере и специально разработанный алгоритм выделения и идентификации предсейсмических возмущений. Спутниковые данные представляли собой трехмерные массивы температуры и горизонтальной скорости ветра из архива глобального реанализа MERRA-2 на 12 стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 гПа с временным разрешением $\Delta t = 3$ часа [9].

Проведение исследований изменчивости геофизических полей в атмосфере над сейсмоактивными зонами включало статистическую обработку и спектральный анализ временных рядов параметров атмосферы, выделение вариаций, которые потенциально могут считаться признаками подготовки сильных землетрясений, а также установление корреляционной связи между сейсмической активностью и изменениями теплового режима в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS). Обработка спутниковых данных и идентификации предсейсмических возмущений основывалась на новом подходе к анализу пространственно-временных вариаций температуры в области UTLS с использованием модифицированного критерия STA/LTA (Short Time Averaging to Long Time Averaging) [5, 10–12].

Результаты обработки данных температурных измерений в период с 01 декабря 2019 г. по 31 марта 2020 г., приведенные на рисунке 2, иллюстрируют процесс детектирования предсейсмических

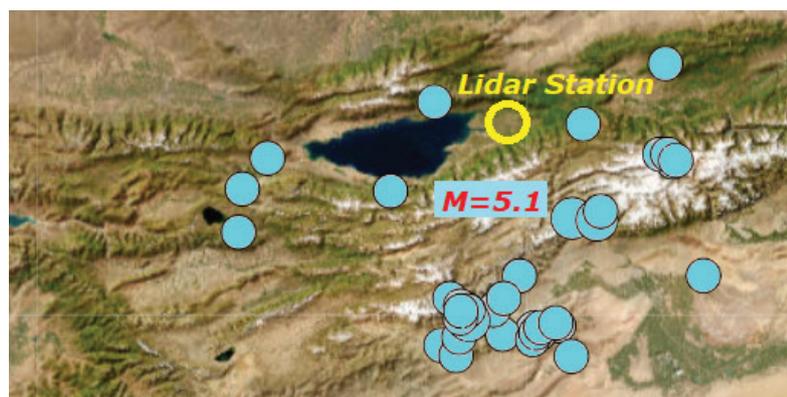


Рисунок 1 – Расположение эпицентров сейсмических событий с магнитудой $M > 4.0$, зарегистрированных в 2000–2022 гг. в области, ограниченной координатами: $40.5\text{--}44^\circ \text{N}$ и $75\text{--}81^\circ \text{E}$ (37 землетрясений)

возмущений температуры в верхней тропосфере (300 гПа) и области тропопаузы (100 гПа) (рисунок 2, а). В соответствии с разработанным алгоритмом для распознавания и выделения наиболее устойчивых в пространстве и во времени аномальных вариаций температуры, использовали результаты сравнения дисперсий значений температуры в коротком и длинном окне на двух уровнях UTLS. При обнаружении возмущения температуры дисперсия VAR_{STA} изменяется быстрее, чем VAR_{LTA} [6]. Возмущенному состоянию UTLS соответствовали флуктуации температуры в верхней тропосфере и области тропопаузы, удовлетворяющие условию: $\text{VAR}_{\text{STA}} \geq \text{VAR}_{\text{LTA}}$ (рисунок 2, b и 2, d). Алгоритм STA/LTA максимально использует эффект когерентности в аномальных изменениях температуры [5]. Как видно, наиболее интенсивные короткопериодные возмущения температуры одновременно наблюдались на обоих изобарических уровнях за 5–6 дней до землетрясения $M = 5.1$.

Важным моментом идентификации предсейсмических аномалий являлся учет противофазного характера изменений путем оценки взаимосвязи между изменениями температуры для каждого момента времени в трехдневном скользящем окне. На рисунке 2, с видно, что перед сейсмическим событием локальные коэффициенты корреляции достигали значений $R = -0.96$.

Изменения параметров δT_c (δT) определялись особенностями короткопериодных вариаций температуры, а, соответственно, позволяли оценить интенсивность возмущений. Представленные на рисунке 3, а результаты расчета временных рядов δT и δT_c демонстрируют очевидное совпадение по времени явно выраженной аномалии температуры, значительно превышающей порог обнаружения $\text{THR} = 3.0$, с периодом подготовки землетрясения $M = 5.1$. Достаточно продолжительный полугодовой рассматриваемый период времени может служить подтверждением уникальности выделенного возмущения температуры, имеющего связь с сильным землетрясением. Основным условием, приводящим к росту параметра δT_c , являлось одновременное увеличение амплитуды короткопериодных вариаций над и под тропопаузой. В отличие от результатов, приведенных в работе [7], постсейсмических возмущений в UTLS не наблюдалось. Более высокую чувствительность нового алгоритма обеспечило преобразование исходных спутниковых данных в межсуточные приращения ΔT , вычисленные как разность между значениями температуры для одного и того же момента времени, отстоящими друг от друга на определенное количество дней [5].

Среднесуточные уровни D_{ST} -индекса в период сейсмической активности оставались в диапазоне умеренных значений, изменяющихся от -20 нТл до $+20$ нТл (рисунок 3, b), а, соответственно, вероятной причиной наблюдаемых перед землетрясениями аномальных изменений температуры являлась не геомагнитная, а сейсмическая активность. Минимум индекса D_{ST} (-28 нТл) был зарегистрирован 18 февраля 2020 г., т. е. через 3 суток после землетрясения $M = 5.1$.

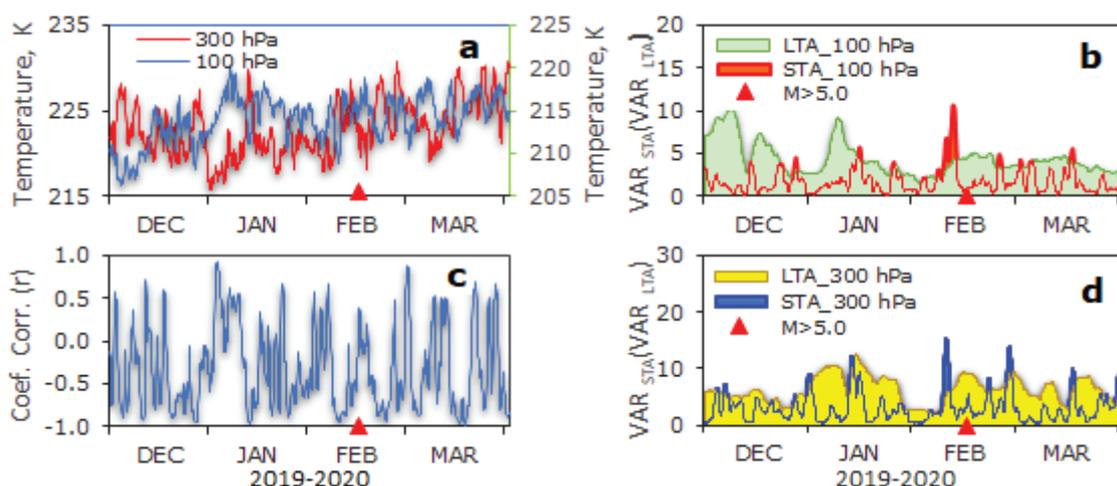


Рисунок 2 – Исходные временные ряды температуры на уровнях 300 гПа и 100 гПа (а) и коэффициента корреляции между ними (с), дисперсии вариаций температуры в коротком (VAR_{STA}) и длинном (VAR_{LTA}) временных окнах (b и d) в период с 01 декабря 2019 г. по 31 марта 2020 г. Маркером отмечен момент землетрясения $M = 5.1$ (03:31:56 UTC, 15 февраля 2020 г.)

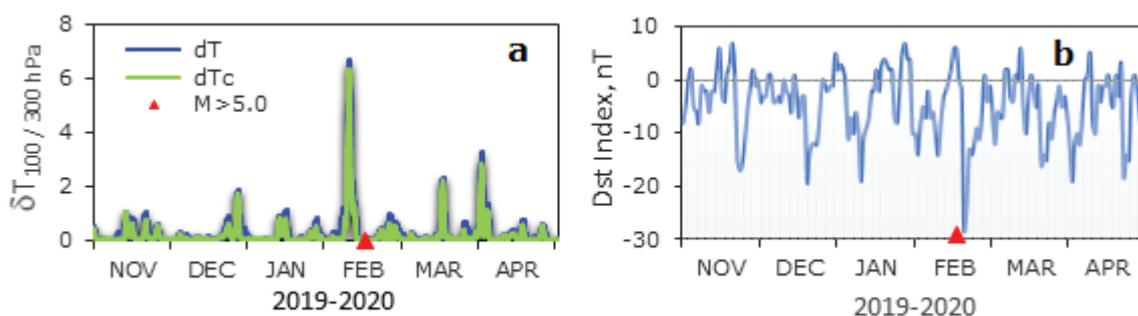


Рисунок 3 – Изменения параметров δT и δT_c (а) и вариации среднесуточных значений индекса D_{ST} (b) в период с 01 ноября 2019 г. по 30 апреля 2020 г.

Пример эволюции пространственно-временного распределения мезомасштабного возмущения температуры в нижней атмосфере, включая процессы его формирования и развития, показан на рисунке 4. На этих рисунках видно, что возмущение UTLS наблюдалось в период с 07 по 11 февраля 2020 г. Аномальная область начала формироваться западнее эпицентра 06 февраля в 09:00 UTC. Максимальные значения δT_c наблюдались вблизи эпицентра 09 февраля 2020 г. с 00:00 до 18:00 UTC.

Мезомасштабная область аномально высоких значений δT_c располагалась в пределах координат $37\text{--}41^\circ \text{ N}$ и $68\text{--}73^\circ \text{ E}$. Максимум температурного возмущения, наблюдаемого 09 февраля 2020 г., был смещен на $\sim 5\text{--}6^\circ$ в юго-западном направлении относительно эпицентра землетрясения (рисунок 4, d). Наблюдаемый эффект перемещения аномалии в восточном направлении можно связать с преобладающими в атмосфере горизонтальными течениями воздушной массы, скорость которой на рассматриваемых уровнях ($\sim 12.0\text{--}17.0 \text{ км}$) была достаточно высокой и составляла более 30 м/с [12].

Аналогичные пространственно-временные распределения параметра δT_c были получены в период, предшествующий землетрясению $M = 5.1$, зарегистрированному 28 декабря 2022 г. (рисунок 5). Возмущение температуры наблюдалось за 2–3 суток до землетрясения и также проявлялось в виде

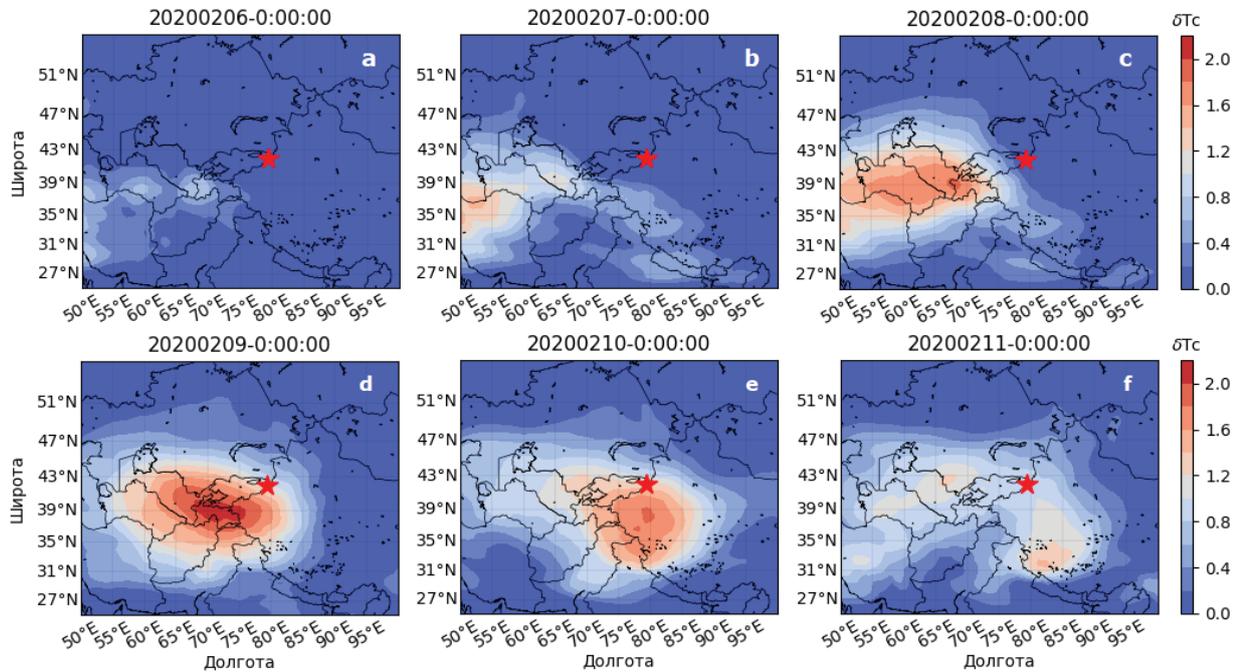


Рисунок 4 – Карты пространственного распределения интегрального параметра ΔT_c , рассчитанные через 24-часовые интервалы времени (00:00 UTC) в период 06–11 февраля 2020 г. Маркером показан эпицентр землетрясения $M=5.1$ ($41.82^\circ N$; $79.28^\circ E$), зарегистрированного 15 февраля 2020 в 03:31:56

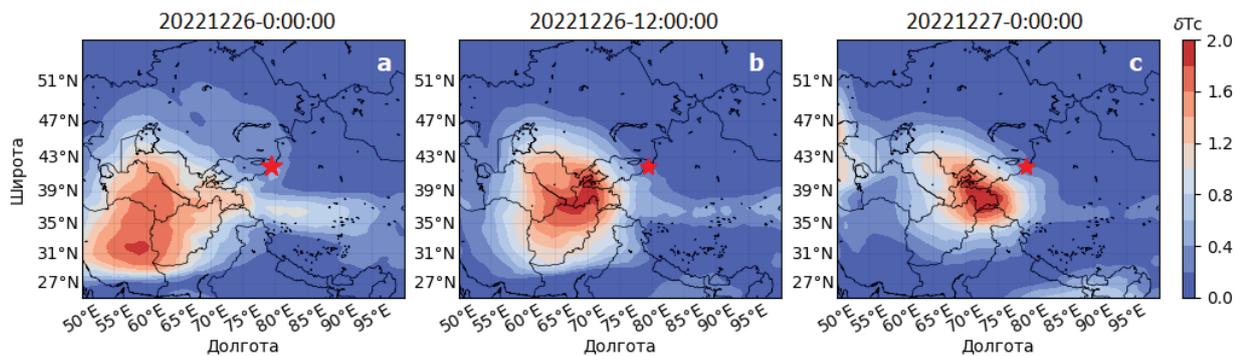


Рисунок 5 – Карты пространственного распределения параметра ΔT_c , рассчитанные через 12-часовые интервалы времени 26–27 декабря 2022 г. Маркером показан эпицентр землетрясения $M = 5.1$ ($41.80^\circ N$; $79.56^\circ E$), зарегистрированного 28 декабря 2022 г. в 17:16:35

локализованной мезомасштабной области повышенных значений параметра δT_c . Выявленное совпадение в пространстве между возмущениями температуры и эпицентрами рассматриваемых землетрясений может свидетельствовать о высокой вероятности того, что аномалии связаны не с какими-либо атмосферными явлениями, а с литосферными процессами. Также можно предположить единообразие процессов, происходящих при подготовке коровых землетрясений в регионе.

Исследования последних лет, выполненные в различных регионах мира, подтверждают, что один из источников возмущений в атмосфере может быть связан с процессами в Земной коре, такими как сейсмическая активность [4]. Аномальные изменения параметров атмосферы в большинстве случаев возникают в течение двух недель, предшествующих сильным землетрясениям, и являются результатом воздействия акустико-гравитационных волн, порождаемых медленными колебаниями поверхности Земли, которые распространяются вверх и могут способствовать развитию различных явлений в атмосфере и ионосфере [13]. К таким предсейсмическим эффектам можно отнести аномальные изменения вертикальной структуры температуры в области UTLS [6, 7, 12].

Заключение. Результаты проведенного исследования подтверждают, что над сейсмически активными районами в периоды подготовки сильных землетрясений происходят интенсивные изменения параметров верхней тропосферы и нижней стратосферы относительно уровня их регулярной изменчивости. Разработанный алгоритм, основанный на применении оригинальной методики с использованием модифицированного критерия STA/LTA, позволил по данным регулярных спутниковых измерений (глобальный реанализ MERRA-2) диагностировать аномальные вариации температуры в области тропопаузы за 5–6 суток до рассматриваемого события с магнитудой $M = 5.1$), которое было зарегистрировано на территории Кыргызстана 15 февраля 2020 г. Аномалии температуры наблюдались в условиях спокойной геомагнитной обстановки, что дает основание предполагать их вероятную связь с процессом подготовки землетрясения.

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

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Работа также выполнялась сотрудниками ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН в рамках проекта по Программе Развития КРСУ.

Поступила: 04.09.2023; рецензирована: 18.09.2023; принята: 20.09.2023.

Литература

1. Jiao Z-H. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review / Z-H. Jiao, J. Zhao, X. Shan // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1013–1036. DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
2. Marchetti D. Possible Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling effects prior to the 2018 Mw = 7.5 Indonesia earthquake from seismic, atmospheric and ionospheric data / D. Marchetti, A. De Santis, X. Shen, S.A. Campuzano, P. Loredana, A. Piscini, R. Di Giovambattista, S. Jin, A. Ippolito, G. Cianchini, C. Cesaroni, D. Sabbagh, L. Spogli, Z. Zhima, J. Huang // Journal of Asian Earth Sciences. 2020. Vol. 188. P. 104097. DOI: 10.1016/j.jseas.2019.104097.
3. Jiao Z. Pre-Seismic Temporal Integrated Anomalies from Multiparametric Remote Sensing Data / Z. Jiao, X. Shan // Remote Sens. 2022. Vol. 14. 2343. DOI: 10.3390/rs14102343.
4. Khan M.M. Atmospheric Anomalies Associated with the 2021 Mw 7.2 Haiti Earthquake Using Machine Learning from Multiple Satellites / M.M. Khan, B. Ghaffar, R. Shahzad, M.R. Khan, M. Shah, A.H. Amin, S.M. Eldin, N.A. Naqvi, R. Ali // Sustainability. 2022. Vol. 14. 14782. DOI: 10.3390/su142214782.
5. Свердлик Л.Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA / Л.Г. Свердлик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.

6. Свердлик Л.Г. Изменение характеристик предсейсмических возмущений в нижней атмосфере / Л.Г. Свердлик // Вестник КPCY. 2022. Т. 22. № 4. С. 199–204. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-199-204.
7. Свердлик Л.Г. Атмосферные эффекты крупнейших землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса / Л.Г. Свердлик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 81–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
8. The USGS (United States Geological Survey). URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (дата обращения: 20.08.2023).
9. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 11.08.2023).
10. Свердлик Л.Г. Использование модифицированного алгоритма STA/LTA для выделения предсейсмических возмущений температуры в нижней атмосфере / Л.Г. Свердлик, А.Э. Ибраев // Вестник КPCY. 2022. Т. 22. № 12. С. 190–196. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196.
11. Свердлик Л.Г. Программа IPPLA (Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere) / Л.Г. Свердлик, А.Э. Ибраев: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023612499 РФ. Рег. 03.02.2023.
12. Свердлик Л.Г. Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии / Л.Г. Свердлик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 144–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
13. Zhao B. Preliminary Analysis of Ionospheric Anomalies before Strong Earthquakes in and around Mainland China / B. Zhao, C. Qian, H. Yu, J. Liu, N. Maimaitusun, C. Yu, X. Zhang, Y. Ma // Atmosphere. 2022. Vol. 13. 410. DOI: 10.3390/atmos13030410.