

УДК 550.34.01

DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-190-196

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА STA/LTA
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

Л.Г. Свердлов, А.Э. Ибраев

Аннотация. Представлено краткое описание алгоритма, позволяющего исследовать и анализировать эффекты литосферно-атмосферного взаимодействия для выявления аномалий, присутствующих в непрерывных изменениях температуры нижней атмосферы, которые могут быть связаны с фазой подготовки сильных и катастрофических землетрясений. Разработанный алгоритм основан на последовательном вычислении межсуточных приращений температуры (ΔT), отношения характеристических функций в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах, а также интегральных параметров аномальных вариаций δT_c (δT). Программное обеспечение IPPLA, реализующее алгоритм, предоставляет широкие возможности для изучения сейсмо-атмосферных эффектов. Практическое применение программы позволило выделить и идентифицировать пространственные и временные распределения предсейсмических аномалий температуры, которые дают основание предполагать вероятную связь с процессами подготовки сильных землетрясений.

Ключевые слова: землетрясение; спутниковые данные; температура; верхняя тропосфера; нижняя стратосфера; возмущение; алгоритм; STA, LTA; дисперсия.

**ТӨМӨНКҮ АТМОСФЕРАДА СЕЙСМИКАЛЫК ТЕМПЕРАТУРАНЫН
БУЗУЛУШУН БӨЛҮП КӨРСӨТҮҮҮҮҮЧҮН МОДИФИКАЦИЯЛАНГАН STA/LTA
АЛГОРИТМИН КОЛДОНУУ**

Л.Г. Свердлов, А.Э. Ибраев

Аннотация. Макалада төмөнкү атмосферанын температурасынын үзгүлтүксүз өзгөрүүлөрүндө болгон аномалияларды аныктоо үчүн литосфералык-атмосфералык өз ара аракеттенүүнүн эффекттерин изилдөө жана талдоо үчүн алгоритмдин кыскача сүрөттөлүшү берилген, алар күчтүү жана катастрофалык жер титирөөлөрдүн даярдоо фазасы менен байланыштуу болушу мүмкүн. Иштелип чыккан алгоритм температуранын күнүмдүк өсүштөрүн ырааттуу эсептөөгө (ΔT), кыска (STA) жана узак (LTA) убакыт терезелериндеги мүнөздүү функциялардын катышына, ошондой эле аномалдуу вариациялардын интегралдык параметрлерине негизделген δT_c (δT). Алгоритмди ишке ашыруучу IPPLA программалык камсыздоосу сейсмо-атмосфералык эффекттерди изилдөө үчүн кеңири мүмкүнчүлүктөрдү берет. Программанын практикалык колдонулушу сейсмикалык температуранын аномалияларынын мейкиндик жана убакыт бөлүштүрүлүшүн бөлүп көрсөтүүгө жана аныктоого мүмкүндүк берди, бул чоң жер титирөөлөрдү даярдоо процесстери менен болжолдуу байланышты болжолдоого негиз берет.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; спутниктик маалыматтар; температура; жогорку тропосфера; төмөнкү стратосфера; бузулуу; алгоритм; STA, LTA; дисперсия.

USE OF THE MODIFIED STA/LTA ALGORITHM
FOR DETECTION PRE-SEISMIC TEMPERATURE PERTURBATIONS
IN THE LOWER ATMOSPHERE

L.G. Sverdlik, A.E. Ibraev

Abstract. The article presents a brief description of an algorithm that allows you to investigate and analyze the effects of lithospheric-atmospheric interaction to identify anomalies present in continuous changes in the temperature of the lower atmosphere, which can be associated with the preparation phase of strong and catastrophic earthquakes. The developed algorithm is based on sequential calculation of inter-day temperature increments (ΔT), ratio of characteristic functions in short (STA) and long (LTA) time windows, as well as integral parameters of abnormal δTC variations (δT). IPPLA software, which implements the algorithm, provides ample opportunities for studying seismic-atmospheric effects. The practical application of the program made it possible to identify and identify spatial and temporal distributions of pre-seismic temperature anomalies, which suggest a probable connection with the processes of preparing strong earthquakes.

Keywords: earthquake; satellite data; temperature; upper troposphere; lower stratosphere; perturbation; algorithm; STA, LTA; variance.

Введение. Многообразие информации в данных спутникового дистанционного зондирования Земли позволяет решать широкий круг задач, направленных на исследование различных природных объектов и явлений [1]. Фундаментальную роль спутниковые измерения играют при проведении мониторинга и изучении динамических процессов в атмосфере, в частности, в сейсмически опасных регионах [2]. Решение задач, связанных с прогнозной тематикой и направленных на поиск возможных физических изменений, которые могут быть связаны с возникновением землетрясения [3], является одной из самых сложных проблем, которая требует выбора наиболее эффективных методов и алгоритмов обработки экспериментальных данных, позволяющих выделять сейсмогенные аномальные вариации, и создания соответствующего программного обеспечения [4, 5].

В настоящей работе представлено описание разработанного алгоритма, предназначенного для ретроспективного анализа результатов спутниковых измерений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS) и позволяющего идентифицировать предсейсмические возмущения.

Данные спутниковых и сейсмических измерений. Исходными данными являлись трехмерные массивы температурных измерений по данным глобального реанализа *MERRA-2* [6], которые основаны на наземных, аэростатных и спутниковых наблюдениях, прошедших обработку в глобальной модели. Они представляют собой синтезированные значения температуры на стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 *hPa*, в узлах равномерной пространственной сетки $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. Временное разрешение температурных данных составляло $\Delta t = 3h$, что обеспечило получение достаточно детальной картины процессов формирования аномалий. Продолжительность анализируемых данных температуры составляла не менее 90 дней (60 суток до и 30 суток после каждого рассматриваемого события).

Сейсмические данные, относящиеся ко всем событиям, используемым в исследовании пространственно-временной изменчивости температуры, взяты из каталога землетрясений Геологической службы США (USGS) [7], который охватывает весь мир и формируется на основе сбора и анализа данных различных сейсмометрических сетей.

Алгоритм обработки данных спутниковых измерений. Разработанное программное обеспечение IPPLA (*Identification of Preseismic Perturbations in the Lower Atmosphere*) предназначено для обработки больших массивов спутниковых данных, в частности, результатов температурных измерений с целью выделения и идентификации атмосферных эффектов, связанных с сейсмической активностью. Расчетная часть ПО построена на использовании модифицированного алгоритма, основанного на анализе отношения статистических показателей в коротком и длинном временных окнах STA/LTA (*Short Time Average to Long Time Average*) [4]. Классическая формула расчета критерия STA/LTA (с выравниванием

скользящих окон по правому краю, как показано на рисунке 1), может быть записана следующим образом [8]:

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

где t_i – время текущей выборки (или отсчет) 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 .

Анализ поведения временных рядов температуры показал преимущество использования дисперсии (VAR) в качестве характеристической функции.

Важная отличительная особенность представляемой версии алгоритма состоит в преобразовании исходных спутниковых данных в межсуточные приращения температуры (ΔT), вычисленные как разность между значениями для одного и того же момента времени, отстоящими друг от друга на определенное количество дней (обычно $N\delta = 3$). Применение такой операции на начальном этапе обработки спутниковых данных обеспечило более высокую чувствительность разработанного алгоритма.

Далее определялись характерные для каждого из событий области высот, в которых происходили наиболее интенсивные возмущения. Для этого были проанализированы вертикальные профили приращений температуры ΔT , полученные в ночное время суток, а, соответственно, при более стабильных метеоусловиях атмосферы.

Выделение возмущений температуры проводилось на основе вычисления показателя аномальности $\delta T(t_i)$, равного произведению двух отношений ($R(t_i) = \text{VAR}_{STA}(t_i) / \text{VAR}_{LTA}(t_i)$), 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:

$$\delta T(t_i) = R(t_i, p_{UT}) \times R(t_i, p_{LS}) \geq THR. \quad (2)$$

Значение порога детектирования THR (*threshold value*) изменялось, как правило, в диапазоне от 2.0 до 3.0 и соответствовало примерно одному стандартному отклонению исходных временных рядов температуры.

Для снижения вероятности обнаружения ложных аномалий значения параметра аномальных вариаций δT корректировались с учетом коэффициента корреляции (r) между изменениями температуры на рассматриваемых изобарических уровнях в каждом коротком временном окне [9, 10]:

$$\delta T_C(t_i) = \begin{cases} 0,05_если_r(t_i)_{STA} \geq 0 \\ \delta T(t_i) \times |r(t_i)_{STA}|_если_r(t_i)_{STA} < 0. \end{cases} \quad (3)$$

По изменению во времени значений параметров δT_C (δT) оценивалась интенсивность возмущений, которые определялись, главным образом, короткопериодными компонентами вариаций температуры. Возмущенное состояние атмосферы характеризовалось флуктуациями температуры,



Рисунок 1 – Относительное расположение окон с выравниванием по правому краю, означающее, что точка, для которой вычисляется отношение STA / LTA, находится на крайнем правом крае

удовлетворяющими условием: $VAR_{STA} \geq VAR_{LTA}$, а значения $VAR_{STA} \geq (1.5-2.0) \times VAR_{LTA}$ идентифицировались, как аномалии. Для обеспечения эффективного обнаружения возмущений температуры в области UTLS следует задавать оптимальные значения $N\delta$ и параметров критерия STA/LTA [4, 9].

Структура программы обработки спутниковых данных. Разработанная программа IPPLA, реализующая описанный алгоритм обработки спутниковых данных, написана на языке программирования *Python* и реализована в нескольких модулях (вкладках), которые имеют следующее предназначение:

- Модуль загрузки и чтения файлов формата NetCDF4, содержащих исходные данные («Загрузка»);
- Модуль обработки временных рядов температуры («График»);
- Модуль обработки пространственных данных и построения высотно-временных распределений отношений $R = VAR_{STA}/VAR_{LTA}$ («Карта (N/E)»);
- Модуль построения пространственно-временных распределений интегральных параметров δT и δT_c («Срез»);
- Модуль визуализации исходных данных и результатов расчета («Карта» и «Профиль») с возможностью выделения необходимого фрагмента карты (по широте и долготе);
- Модуль сохранения графических и текстовых файлов с использованием различных форматов («Сохранение»).

Интерфейс программы IPPLA, главное окно которого показано на рисунке 2, предоставляет широкие возможности, позволяя задавать параметры обработки: изобарические уровни, координаты анализируемых участков и эпицентров землетрясений, размеры скользящих окон (количество выборок) STA и LTA, в которых производится расчет и порог детектирования аномалий (THR).

Обработка временных рядов температуры атмосферы. С помощью функции из библиотеки *matplotlib* (`Plt.plot(x,y)`) производится построение графиков исходных временных рядов температуры и межсуточных приращений температуры (ΔT) на каждом изобарическом уровне от 500 до 40 *hPa*, а также результатов вычисления отношений $R = VAR_{STA}/VAR_{LTA}$ и интегральных параметров δT и δT_c (с учетом и без учета коэффициента корреляции) на заданных изобарических уровнях. Графическая информация может выводиться для каждого пиксела в пределах заданных координат. При этом существует возможность редактирования всех элементов изображений, включая толщину и цвет линий, тип

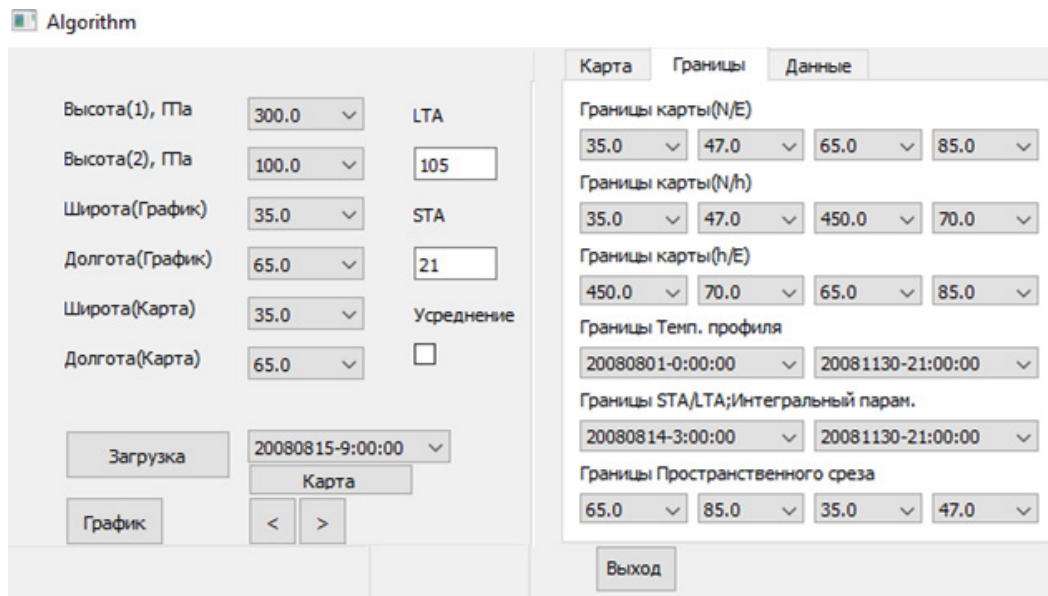


Рисунок 2 – Фрагмент пользовательского интерфейса программы IPPLA

и размеры маркеров, горизонтальный и вертикальный масштаб, разрешение. На рисунке 3 приведена временная динамика изменения температуры на исследуемых изобарических уровнях 100 и 450 hPa, соответствующие отношения скользящих дисперсий и их произведения в июне–июле 2020 г. над эпицентральной областью землетрясения магнитудой $M = 6.3$, произошедшего 25 июня 2020 г. в Китае.

Пространственно-временное распределение предсейсмических возмущений. Важным компонентом обработки спутниковых данных является определение не только временной, но и пространственной локализации предсейсмических возмущений температуры. В качестве примера на рисунке 4 представлены результаты расчета интегрального параметра δT_c , выполненные для всех пикселей в пределах исследуемой области с координатами $20\text{--}60^\circ\text{N}$ и $35\text{--}120^\circ\text{E}$, и каждого 3-х часового отсчета спутниковых данных. Максимум температурного возмущения наблюдался 23 июня 2020 г. и был смещен на $\sim 2\text{--}3^\circ$ в северном направлении от эпицентра землетрясения магнитудой $M = 6.3$. Мезомасштабная область аномально высоких значений δT_c располагалась в пределах координат $35\text{--}40^\circ\text{N}$ и $80\text{--}85^\circ\text{E}$. Вертикальное распределение температурного возмущения в UTLS перед землетрясением структурировалось таким образом, что наиболее интенсивные изменения происходили на высотах $\sim 8\text{--}9$ км в верхней тропосфере и $\sim 15\text{--}16$ км в нижней стратосфере.

Результаты проведенных расчетов, представленные в виде трехмерной матрицы δT_c , использовались для дополнительного исследования динамики распределения возмущений температуры по меридиональному и широтному направлениям. Показанные на рисунке 5 два поперечных сечения изменчивости δT и δT_c в период с 05 по 30 июня 2020 г., позволили определить, когда значения δT_c были максимальными, а также оценить расположение в пространстве, временную эволюцию и размеры аномальных областей. Как видно, предсейсмическое возмущение температуры проявлялось в виде

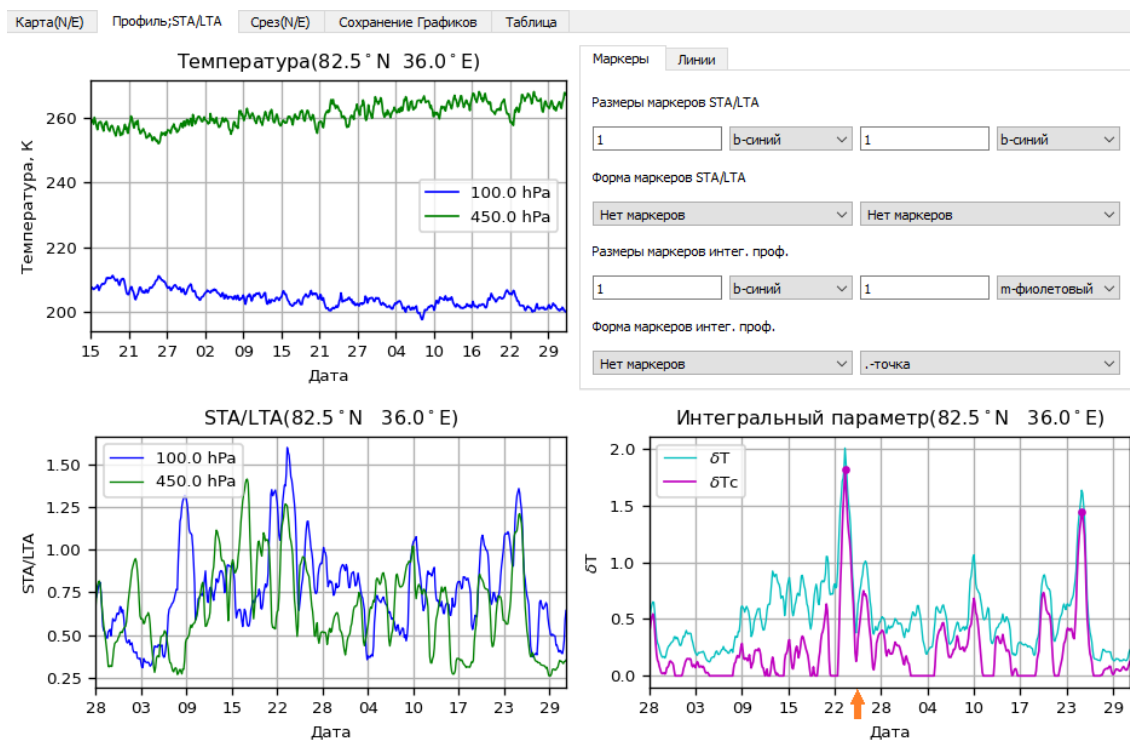


Рисунок 3 – Временная динамика изменения температуры на исследуемых изобарических уровнях 100 и 450 hPa, соответствующие отношения скользящих дисперсий и их произведения в июне–июле 2020 г.

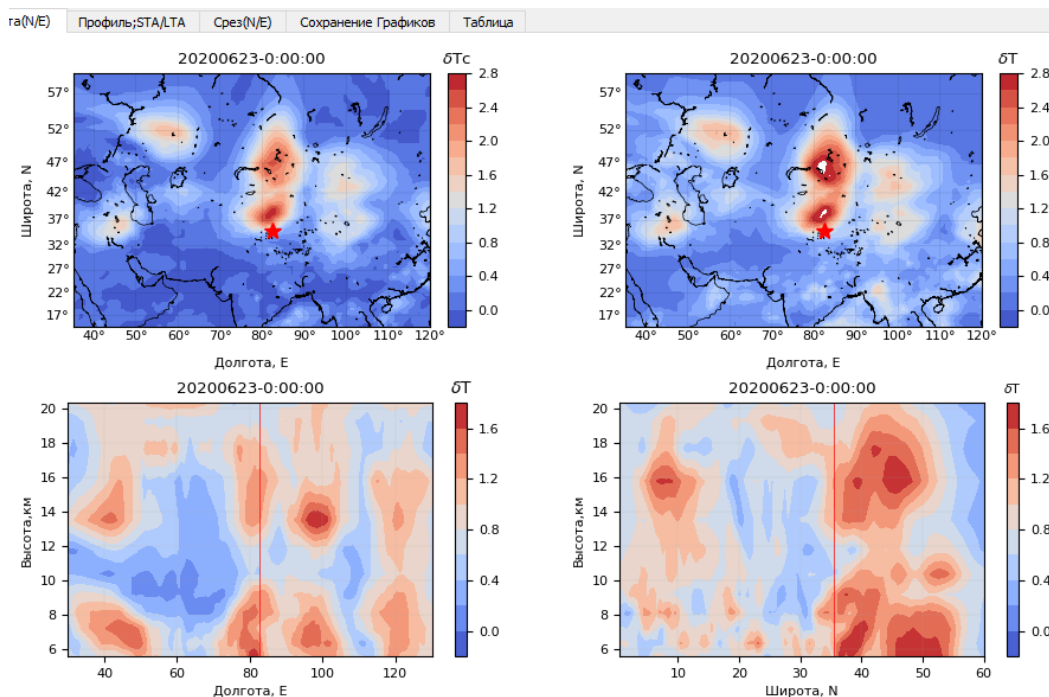


Рисунок 4 – Пространственное распределение интегральных параметров δT_C (δT) и высотно-временное распределение отношения $R = \text{VAR}_{\text{STA}} / \text{VAR}_{\text{LTA}}$ для выбранного момента времени. Красный маркер – эпицентр землетрясения

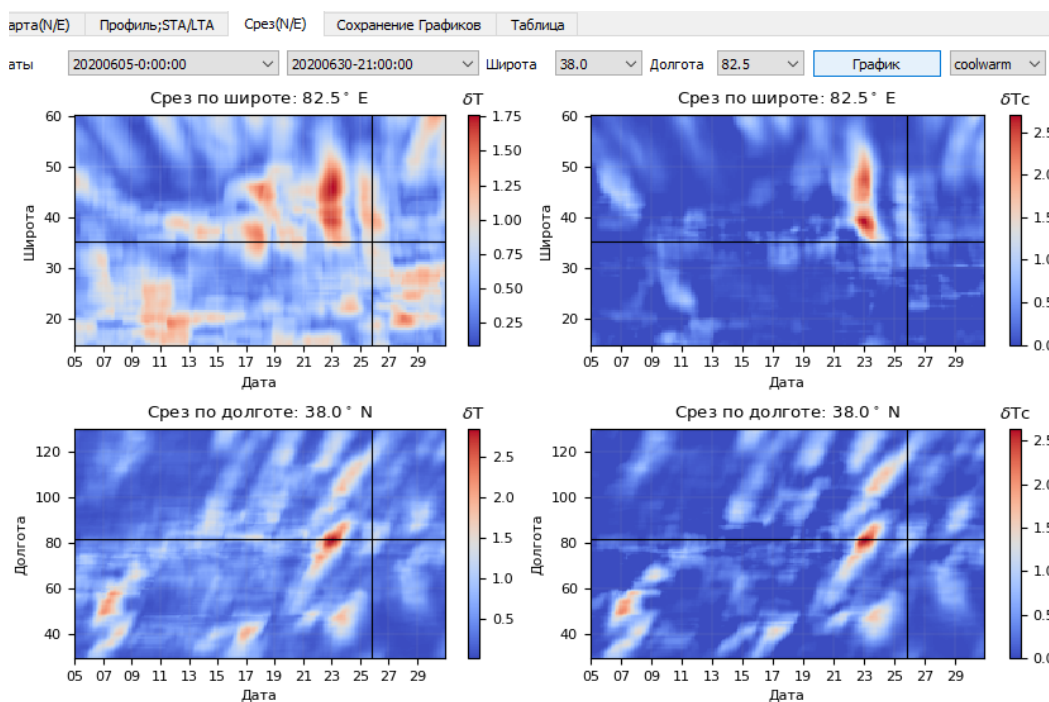


Рисунок 5 – Распределения параметров δT и δT_C по широте и долготе. Вертикальными и горизонтальными линиями обозначены момент и координаты эпицентра землетрясения $M = 6.3$, произошедшего 25 июня 2020 г. в 21:05 UTC

локализованной мезомасштабной области повышенных значений параметра δT_c , которая располагалась вблизи эпицентра землетрясения $M = 6.3$ и предвараля его на 1.5–2 суток.

Заключение. Представленная обновленная версия разработанной программы, предназначенной для обработки спутниковых данных и основанной на **использовании модифицированного критерия STA/LTA**, обладает достаточно высокой эффективностью выделения предсейсмических возмущений температуры в нижней атмосфере. Практическое применение программы IPPLA позволило проанализировать периоды сейсмической активности в различных регионах мира и выделить локальные мезомасштабные области аномальных изменений температуры, синхронизированные как по времени, так и в пространстве с периодами подготовки крупных землетрясений.

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

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Разработка ПО также выполнялась сотрудниками ВГО ФАП КРСУ и НС РАН.

Поступила: 29.08.22; рецензирована: 09.09.22; принята: 12.09.22.

Литература

1. Tronin A. Satellite remote sensing in seismology: A review / A. Tronin // Remote Sensing. 2010. Vol. 2(1). P. 124–150. DOI: 10.3390/rs2010124.
2. 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(4). P. 1013–1036. DOI: 10.5194/nhess-18-1013-2018.
3. 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.
4. Сverdlik Л.Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA / Л.Г. Сverdlik // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
5. Сverdlik Л.Г. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы / Л.Г. Сverdlik, С.А. Имашев // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
6. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 11.08.2022).
7. The USGS (United States Geological Survey). URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (дата обращения: 20.08.2022).
8. IRIS Seismic: Classes and Methods for Seismic Data Analysis. URL: <https://rdr.io/cran/IRISSeismic/man/STALTA.html> (дата обращения: 20.08.2022).
9. Сverdlik Л.Г. Атмосферные эффекты крупнейших землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса / Л.Г. Сverdlik // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 81–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-81-90.
10. Sverdlik L. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan / L. Sverdlik, S. Imashev // MAUSAM. 2020. Vol. 71. № 3. Pp. 481–490.