

РАЗДЕЛ I ГЕОЛОГИЯ. СЕЙСМИКА. ГИС [GEOLOGY. SEISMOLOGY. GIS]

УДК: 550.34.06

DOI: 10.24412/2658-4441-2023-4-6-13

А.А. КАБАНОВ, С.-С.С. МОНГУШ

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)

ПРОГНОЗЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

На основе анализа космических снимков со спутника Landsat-8 предпринята попытка выделения температурных предвестниковых (эпицентральных) аномалий поверхности Земли перед сильными ($K \geq 11,0$) землетрясениями на территории Республики Тыва в 2021 г. Рассмотрено несколько подходов к обработке и интерпретации снимков и анализу результатов. Теоретической основой алгоритмического обеспечения для обработки данных мониторинга землетрясений в информационной системе являются разработанные и обоснованные вычислительные схемы геометрического анализа пространственных данных и изображений с использованием шярлет-преобразования (Степанов, 2010).

Ключевые слова: Landsat-8, сенсоры, сигнал-шум, землетрясения, предвестники, космический мониторинг, космоснимки, зона, каталог, исследования.

Рис. 12. Табл. 1. Библ. 2 назв. С. 6–13.

A.A. KABANOV, S.-S.S. MONGUSH

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)

THE EARTHQUAKE FORECASTS USING SPACE SATELLITES

An attempt was made to isolate temperature forerunners (epicentral) anomalies of the Earth's surface before strong ($K \geq 11.0$) earthquakes on the territory of the Republic of Tuva in 2021 based on the analysis of satellite images from the Landsat 8 satellite. Several approaches to the processing and interpretation of images and results' analysis are considered. The theoretical basis of algorithmic support for processing earthquake monitoring data in an information system is the developed and substantiated computational schemes for geometric analysis of spatial data and images using the shiarlet transform (Степанов, 2010).

Keywords: Landsat-8, sensors, signal-to-noise, earthquakes, forerunners, space monitoring, satellite images, zone, catalog, research.

Figures 12. Table 1. References 2. P. 6–13.

Центр передового опыта Геологической службы США по наблюдению за земными ресурсами и научной калибровке и валидации (Cal/Val) (ЕССОЕ) фокусируется на повышении точности, прецизионности, калибровки и качества продукции данных дистанционного зондирования, используя многолетний опыт геометрической и радиометрической калибровки и определения характеристик многомасштабных оптических систем. Команда ЕССОЕ Landsat Cal/Val постоянно отслеживает геометрические и радиометрические характеристики активных миссий Landsat и при необходимости

вносит коррективы в калибровку для поддержания качества данных на самом высоком уровне.

Наличие высокоточных и надёжных цифровых моделей рельефа (ЦМР) земной поверхности имеет решающее значение для ортотрансляции изображений Landsat, особенно в горных ландшафтах, где процесс ортотрансформирования является наиболее сложным.

Landsat-8 — американский спутник дистанционного зондирования Земли, восьмой в рамках программы Landsat (седьмой, выведенный на орбиту). Изначально назывался Landsat Data Continuity Mission (LDCM), создан совместно NASA и USGS. Выведен на орбиту 11 февраля 2013 г.

Landsat-8 получает изображения в видимом диапазоне волн, в ближнем и дальнем ИК (инфракрасное излучение), с разрешением снимков от 15 до 100 метров на точку. Производится съёмка суши и полярных регионов. В сутки снимается порядка 400 сцен (у предыдущего Landsat-7 было всего 250 сцен в день). Сенсоры OLI и TIRS имеют более высокое отношение сигнал-шум (SNR) и позволяют снимать до 12 бит на точку.

Набор инструментов Operational Land Imager (OLI) является основным на спутнике. Создан в рамках контракта NASA в компании Ball Aerospace. OLI использует подход, ранее опробованный на экспериментальном спутнике NASA, EO-1 (инструмент Advanced Land Imager). В OLI используется схема pushbroom, тогда как в более ранних аппаратах Landsat использовалась схема whiskbroom. В схеме pushbroom используются длинные линейные массивы фотодатчиков, снимающие сразу всю ширину поля зрения спутника — 185 км, тогда как в whiskbroom использовались небольшое количество фотоприёмников и дополнительное сканирующее зеркало.

Инструмент Thermal InfraRed Sensor (TIRS) был создан в центре NASA Goddard Space Flight Center и предназначен для получения изображений в дальнем ИК. В фокальной плоскости TIRS установлены фотодатчики Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) на базе GaAs. Инструмент TIRS использует тот же принцип получения изображений pushbroom, что и OLI, и также имеет полосу обзора в 185 км. Получение изображений происходит в двух каналах (10 и 11), которые совместно работают в том же диапазоне, что и канал TIR на более ранних спутниках программы Landsat. Из-за того, что решение о добавлении TIRS в состав Landsat-8 принималось относительно поздно и для упрощения проектирования, TIRS имеет запланированное время работы три года.

В качестве анализируемых сейсмических событий были взяты пять землетрясений 2021 года $K \geq 11$ (табл. 1).

Таблица 1. Землетрясения $K \geq 11$, зарегистрированные на территории Республики Тыва в 2021 г.

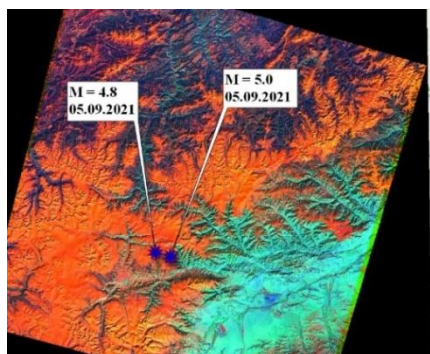
DATE	LAT	LON	H	MS	K
13.01.2021 10:06:45	51.80	98.30	15	4.0	11.2
21.02.2021 01:37:09	52.20	97.20	15	5.7	14.2
21.02.2021 01:39:04	52.21	97.21	15	5.2	13.4
05.09.2021 07:10:09	51.39	89.82	15	5.0	13.0
05.09.2021 07:44:53	51.40	89.69	15	4.8	12.6

Примечание. LAT — северная широта; LON — восточная долгота; H — глубина, км; MS — магнитуда; K — энергетический класс.

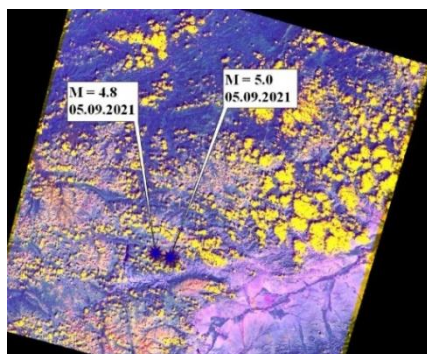
Анализ выполнялся по выделенным зонам повышенной сейсмической активности (три зоны, рис. 1–6).

ЗОНА 1

DATE	LAT	LON	H	MS	K
05.09.2021 07:10:09	51.39	89.82	15	5.0	13.0
05.09.2021 07:44:53	51.40	89.69	15	4.8	12.6

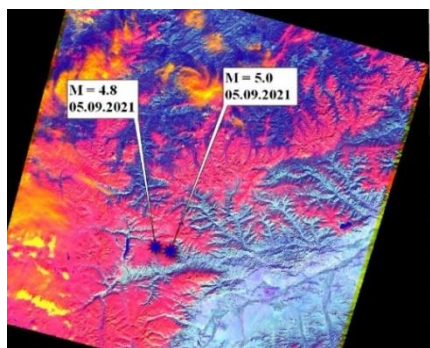


а

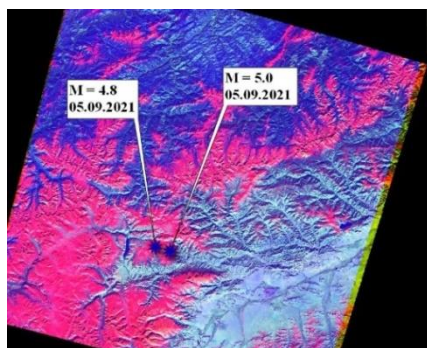


б

Рисунок 1. Космоснимки перед землетрясением 27.03.2021 (а) и 02.08.2021 (б)



а

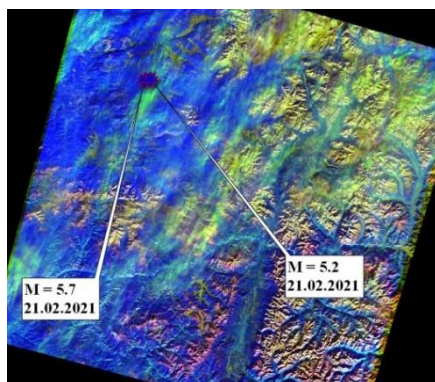


б

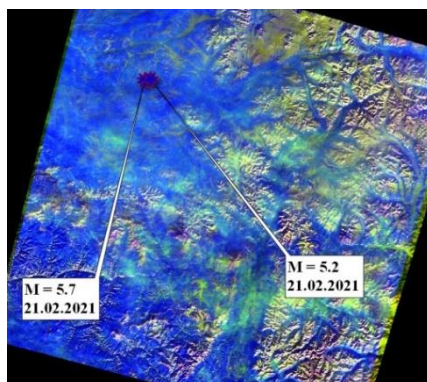
Рисунок 2. Космоснимки после землетрясения 05.10.2021 (а) и 23.10.2021 (б)

ЗОНА 2

DATE	LAT	LON	H	MS	K
21.02.2021 01:37:09	52.20	97.20	15	5.7	14.2
21.02.2021 01:39:04	52.21	97.21	15	5.2	13.4

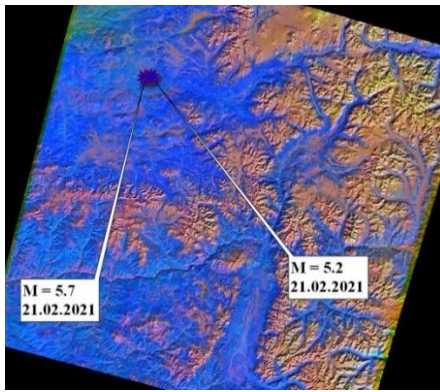


а

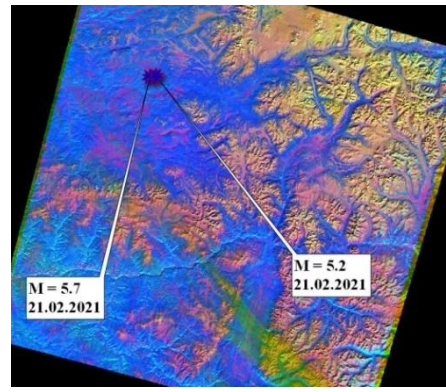


б

Рисунок 3. Космоснимки перед землетрясением 02.12.2020 (а) и 03.01.2021 (б)



а

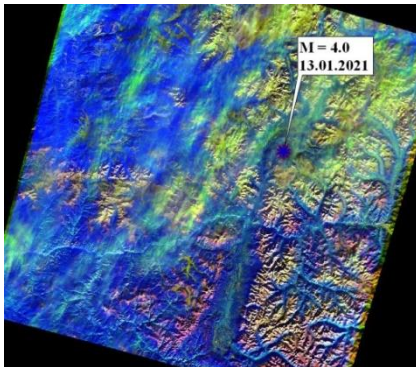


б

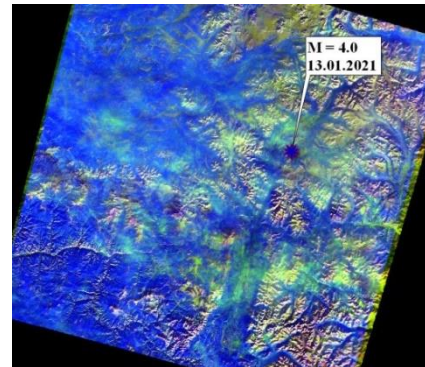
Рисунок 4. Космоснимки после землетрясения 08.03.2021 (а) и 24.03.2021 (б)

ЗОНА 3

DATE	LAT	LON	H	MS	K
13.01.2021 10:06:45	51.80	98.30	15	4.0	11.2

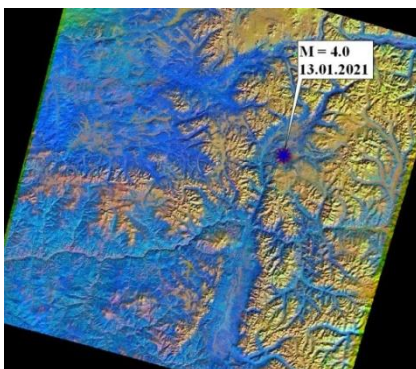


а

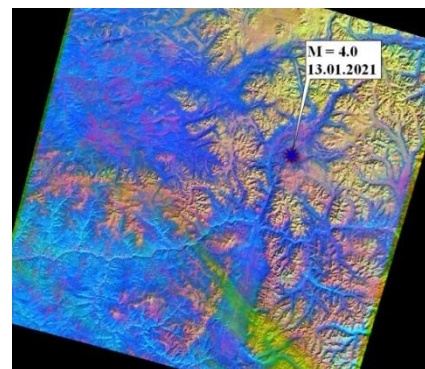


б

Рисунок 5. Космоснимки перед землетрясением 02.12.2020 (а) и 03.01.2021 (б)



а



б

Рисунок 6. Космоснимки после землетрясения 08.03.2021 (а) и 24.03.2021 (б)

Также очень сильное влияние при обработке оказывала облачность (очень мало снимков с малой облачностью), что затрудняло подборку материала и даже его анализ и интерпретацию.

Далее, для выделения неоднородностей на космоснимках ИК диапазона, проведём контрастирование посредством шiarлет-преобразования (алгоритм дискретного шiarлет-преобразования).

В рамках решения нашей задачи будем использовать алгоритма быстрого дискретного шiarлет-преобразования (Hauser: эл. ресурс) для выделения значимой частоты, соответствующей выделенной геометрической особенности изучаемого геообъекта. Предложенный способ применения алгоритма позволяет повысить точность выделения контуров и визуальное качество изображений изучаемых объектов.

На *рисунках 7–12* после обработки космоснимков быстрым дискретным шiarлет-преобразованием мы видим особенности спектров, которые могут быть предвестниками подготовки этих ощутимых землетрясений.

ЗОНА 1

DATE	LAT	LON	H	MS	K
05.09.2021 07:10:09	51.39	89.82	15	5.0	13.0
05.09.2021 07:44:53	51.40	89.69	15	4.8	12.6

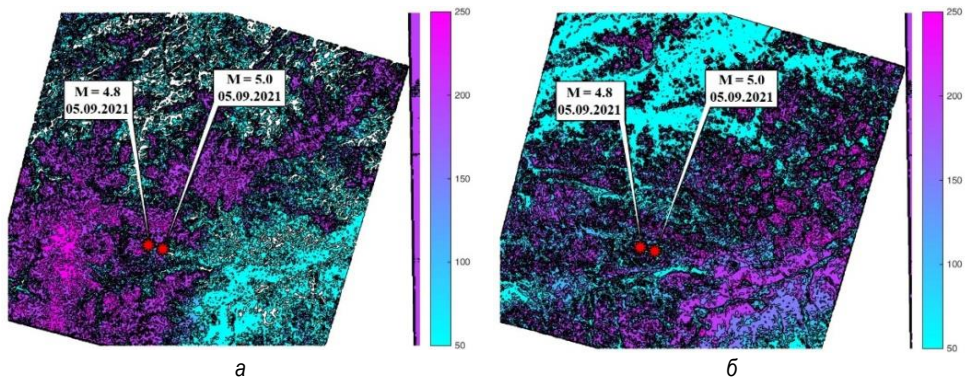


Рисунок 7. Космоснимки перед землетрясением 27.03.2021 (а) и 02.08.2021 (б)

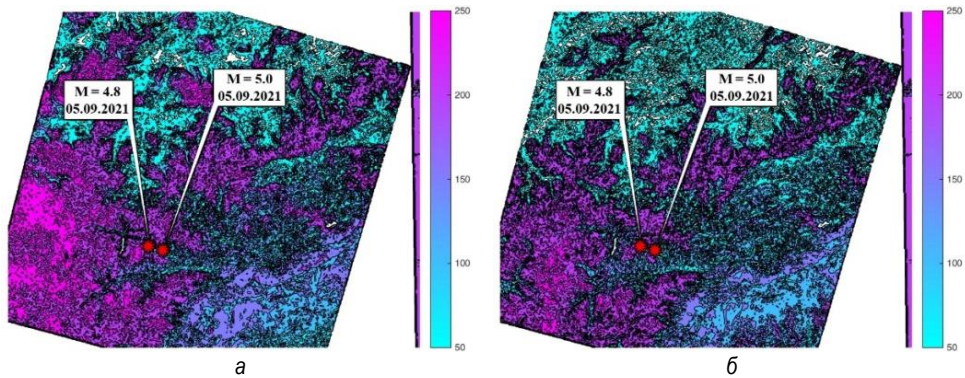


Рисунок 8. Космоснимки после землетрясения 05.10.2021 (а) и 23.10.2021 (б)

Анализируя рисунки 7–8 мы видим, что в районе эпицентров землетрясений за месяц до возникновения землетрясений (рисунок 7 б) исчезает температурная аномалия в диапазоне частот 150–200, а месяц спустя снова появляется.

ЗОНА 2

DATE	LAT	LON	H	MS	K
21.02.2021 01:37:09	52.20	97.20	15	5.7	14.2
21.02.2021 01:39:04	52.21	97.21	15	5.2	13.4

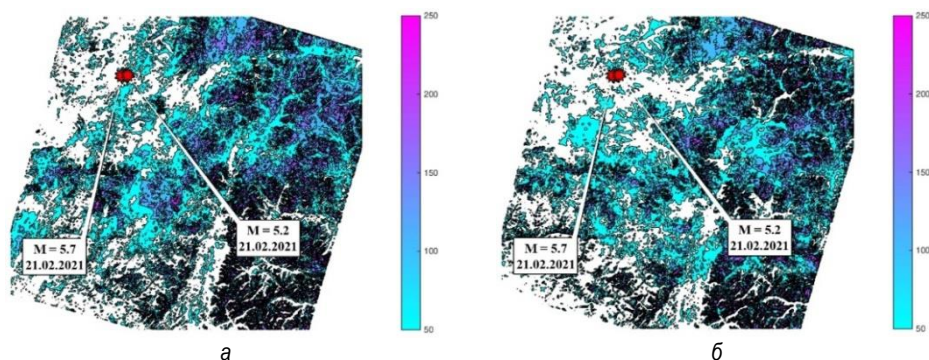


Рисунок 9. Космоснимки перед землетрясением 02.12.2020 (а) и 03.01.2021 (б)

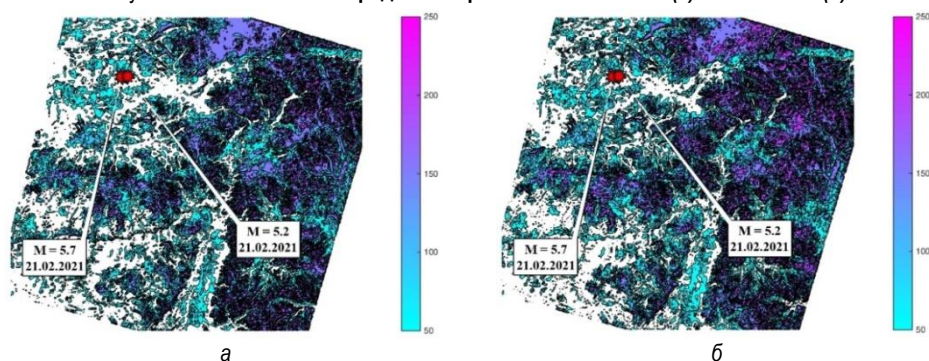


Рисунок 10. Космоснимки после землетрясения 08.03.2021 (а) и 24.03.2021 (б)

Анализируя рисунки 9 и 10 мы видим, что в районе эпицентров землетрясений до возникновения землетрясений (см. рис. 9) диапазон частот менее 50, тогда как после реализации этих землетрясений (см. рис. 10) в очаговой зоне появляется окрас диапазона частот 50–100.

ЗОНА 3

DATE	LAT	LON	H	MS	K
13.01.2021 10:06:45	51.80	98.30	15	4.0	11.2

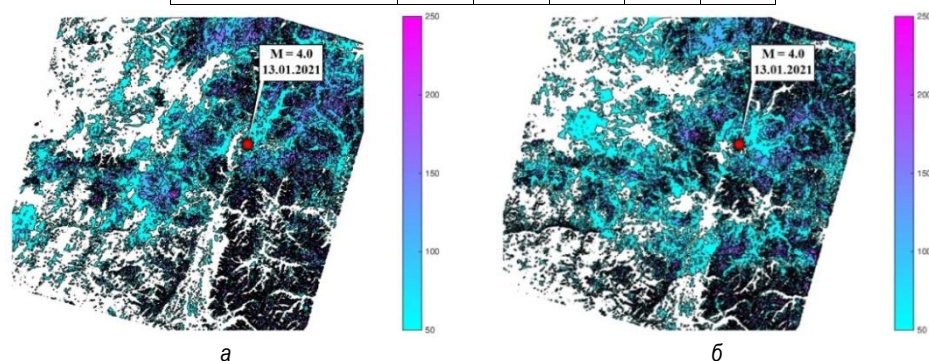


Рисунок 11. Космоснимки перед землетрясением 02.12.2020 (а) и 03.01.2021 (б)

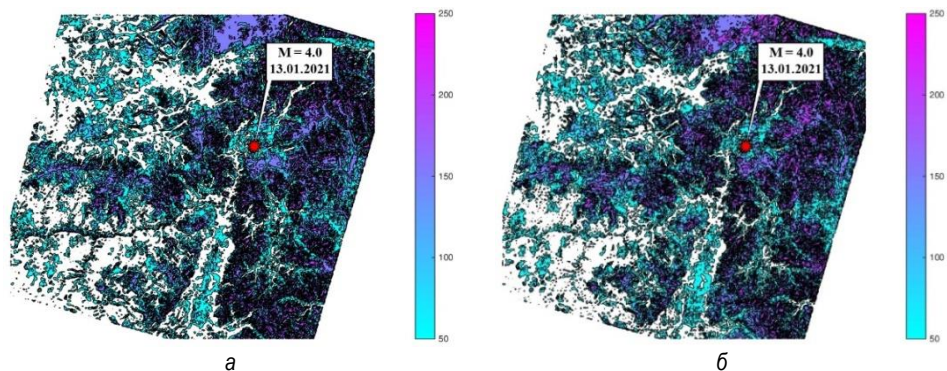


Рисунок 12. Космоснимки после землетрясения 08.03.2021 (а) и 24.03.2021 (б)

Так же, как и в предыдущем случае, на рисунках 11–12 мы видим, что в районе эпицентров землетрясений до возникновения землетрясений (см. рис. 11) диапазон частот ниже (от 50 до 100), чем после реализации землетрясений (см. рис. 12). В очаговой зоне появляется окрас диапазона частот 100–150.

Результатом исследований предвестников землетрясений является оценка возможных землетрясений, которая в т. ч. может быть представлена и в картографическом виде. Рассмотрены теоретические аспекты мониторинга землетрясений. На сегодняшний день наибольшее развитие получило картографирование произошедших землетрясений и их характеристик, долгосрочных прогнозов, а также сейсмическое районирование.

Таким образом, космические системы мониторинга открыли возможность непрерывно и оперативно наблюдать за сейсмоопасными регионами и возникающими в них аномалиями. Такие отклонения наблюдаются в различных сферах — земной коре, атмосфере и магнитном поле Земли.

На данный момент исследовано более 200 признаков, которые могут указывать на предстоящее землетрясение. Однако ни один из них не может считаться полностью надёжным. Применение различных признаков вместе иногда позволяет достичь прогнозирования землетрясений, то есть определить место, время и силу происходящего события.

В проделанной работе по сопоставлению космоснимков в красном и ИК диапазонах в период до и после землетрясений особых результатов не принёс — чётких корреляций по локальным изменениям температуры поверхности Земли в исследуемых зонах не наблюдались. Аномалии температур присутствуют, однако надёжно утверждать, что они связаны с подготовкой относительно сильных землетрясений, не получается. Наиболее глобальные (на больших территориях) изменения также присутствуют, но они, скорее всего, связаны именно с климатическими изменениями температуры приповерхностного слоя атмосферы, включая верхние поверхности Земли.

В ходе изучения после проведения описанных выше исследований, были найдены алгоритмы исключения климатических (погодных) аномалий на космоснимках, что позволит далее учитывать данный параметр и более надёжно выделять локальные аномалии температурных изменений на космоснимках.

В связи с тем, что известные сегодня предвестники землетрясений не позволяют с приемлемой точностью рассчитывать все три параметра возможного землетрясения: дату, место и магнитуду, необходим комплексный подход в их выборе для разработки оценки возможных землетрясений. Этот подход должен в комплексе учитывать предвестники различной природы — химические, деформационные, тепловые, ионосферные, облачные и др., и тем самым повышать точность оценки возможных землетрясений.

Подводя итоги проделанной работы, можно сказать, что локальные температурные аномалии по снимкам космического мониторинга (в красном и ИК диапазонах)

после обработки быстрым дискретным шиарлет-преобразованием присутствуют в явном виде. При разных событиях они отличаются друг от друга, однако они наблюдаются.

Для получения надёжного результата необходимы дальнейшие исследования с большим количеством (каталогом) ощутимых землетрясений и также с использованием других алгоритмов шиарлет-преобразований.

ЛИТЕРАТУРА

Степанов И.В. Использование дистанционного зондирования Земли для прогнозирования землетрясений // Вестн. МГУ. Серия 5: География [Электрон. ресурс]. – 2010. – № 5. – С. 19–24. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-dlya-prognozirovaniya-zemletryaseniy>; https://elibrary.ru/download/elibrary_15570456_34751870.pdf, свободный (дата обращения: 03.07.2023).

Hauser S. Fast Finite Shearlet Transform [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.org/details/axiv-1202.1773>, свободный.

REFERENCES

Stepanov I.V. Ispol'zovaniye distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya prognozirovaniya zemletryaseniy [Using remote sensing of the Earth to predict earthquakes]. *Vestnik MGU = Bulletin of Moscow State University*. Episode 5: Geography, 2010, no.5, pp.19–24. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-dlya-prognozirovaniya-zemletryaseniy>; https://elibrary.ru/download/elibrary_15570456_34751870.pdf (access date: 03.07.2023). (In Russ.)

Hauser S. Fast Finite Shearlet Transform. Available at: <https://archive.org/details/axiv-1202.1773>.