

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА С 2017 ПО 2022 гг.

© 2022 г. В. Г. Бондур^а, *, О. С. Воронова^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 26.09.2022 г.

С использованием спутниковых данных, исследованы изменения тепловых полей при подготовке и протекании землетрясений с магнитудами 4.2–4.8, произошедших на территории Северного Кавказа с 2017 по 2022 гг. Анализировались значения температур земной поверхности, приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, а также относительной влажности у поверхности, зарегистрированные из космоса. Сопоставление изменения тепловых полей при подготовке сейсмических явлений проводилось для землетрясений, эпицентры которых были расположены в зоне схожих геологических структур, таких как Складчато-глыбовые сооружения Большого Кавказа и Предкавказские краевые прогибы. Обнаружена схожесть изменения температур, относительной влажности и колебаний уходящего длинноволнового излучения для ряда землетрясений. Наибольшая схожесть характера изменений нормализованных значений уходящего длинноволнового излучения, выявленная в период подготовки всех проанализированных сейсмических событий, несмотря на разницу в местоположениях их эпицентров. Полученные результаты могут быть использованы в качестве краткосрочных предвестников сейсмических событий, регистрируемых из космоса.

Ключевые слова: природные катастрофы, землетрясения, предвестники землетрясений, тепловые аномалии, дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные

DOI: 10.31857/S0205961422060021

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения относятся к одним из наиболее опасных видов природных катастроф, мониторинг которых является актуальной и сложной задачей, имеющей важное значение (Соболев, Пономарев, 2003). Они представляют собой динамические явления, происходящие обычно из-за движений земной коры, в процессе которых высвобождается энергия, передаваемая в окружающую среду. Эта энергия воздействует на литосферу, атмосферу и ионосферу, вызывая аномальные изменения их параметров, которые могут использоваться в качестве предвестников значительных сейсмических событий (Saradjian, Akhoondzadeh, 2011). Для выявления таких аномальных, предвестниковых изменений различных геофизических параметров перспективно использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса (Бондур, Зверев, 2005; Бондур, Смирнов, 2005; Jiao et al., 2018). Спутниковые данные позволяют регистрировать различные предвестники, в том числе такие, как: геодинамические, связанные с изменением характера систем линейных элементов (Бондур, Зверев, 2005); аномалии параметров

ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Saradjian, Akhoondzadeh, 2011; Смирнов и др., 2018); вариации тепловых полей (Ouzounov et al., 2007; Бондур, Воронова, 2020; Жуков и др. 2010).

Основными преимуществами дистанционного зондирования из космоса по сравнению с традиционными геофизическими подходами к мониторингу сейсмоопасных территорий, а также с методами, основанными на использовании геомеханических моделей (Бондур и др., 2016а, 2016б) или метода сейсмической энтропии (Акопян и др., 2017) являются: большой пространственный охват, непрерывность, стабильность и доступность получаемых данных (Бондур и др., 2020).

Космические данные, полученные в тепловом ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн, являются достаточно надежным источником информации, необходимой для регистрации и изучения крупномасштабных и быстро меняющихся тепловых аномалий в сейсмоопасных регионах (Tronin et al., 2004; Бондур, Воронова, 2020). Спутниковый мониторинг позволяет достаточно

быстро фиксировать аномалии, которые содержат информацию об изменении температуры земной поверхности, связанной с движением земной коры. Более того, спутниковые данные позволяют выявить крупномасштабные линейные структуры и краткосрочные (от нескольких дней до недели) вариации тепловых аномалий на границах тектонических плит и активных разломов (Вилор, Минько, 2002; Tronin et al., 2004; Filizzola et al., 2004; Tramutoli et al., 2005; Tronin et al., 2010; Jiao et al., 2018; Бондур, Воронова, 2020)

В настоящей работе, для проведения исследований использовались такие значимые параметры тепловых полей, связанные с сейсмической активностью, как: температура земной поверхности (SST), температура приповерхностного слоя атмосферы (SAT), а также изменения относительной влажности (RHS) и уходящего длинноволнового излучения (OLR) (Бондур, Воронова, 2020; Ouzounov et al., 2007). Температура приповерхностного слоя и относительная влажность являются важными физическими величинами, которые характеризуют состояние атмосферы, прежде всего в ее пограничном слое (Pulinets et al., 2006). Регистрация изменений уходящего длинноволнового излучения позволяет выявить аномальные процессы на верхней границе облачности в период подготовки сейсмических явлений (Ouzounov et al., 2007).

Целью проведения настоящих исследований являлось выявление изменений в многолетних рядах спутниковых данных, полученных с помощью одного и того же прибора в пределах одной сейсмоопасной территории. Это позволяло исключать влияние факторов сезонности, а также погрешностей, связанных с использованием различных спутниковых приборов.

В данной работе представлены результаты исследований аномальных изменений тепловых полей, возникающих в период подготовки и протекания сейсмических событий на территории Северного Кавказа в период времени с 2017 по 2022 гг. Для исследований были выбраны землетрясения с относительно небольшими магнитудами от 4.2–4.8, наиболее часто происходящими на исследуемой территории, которые могут иметь серьезные последствия и служить причиной возникновения других опасных природных процессов, таких как: камнепады, оползни, снежные лавины, грязевые потоки и др.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Объектом исследований в данной работе была выбрана территория Северного Кавказа, которая характеризуется самой высокой сейсмичностью в европейской части России (Уломов и др., 2007; Is-

mail-Zadeh et al., 2020). Являясь частью Альпийско-Гималайского складчатого пояса, расположенного между Черным и Каспийским морями, эта территория представляет собой сложную систему альпийских складчатых сооружений с активными тектоническими движениями. Современное строение, геодинамика и сейсмичность Кавказского региона определяются субмеридиональными сокращениями, связанными с продолжающимися сближениями Аравийской и Евразийскими плитами литосферы (Рогожин и др., 2015; Dzeboev et al., 2019).

Большой Кавказ состоит из крупного складчато-надвигового сооружения в составе альпийского подвижного пояса, расположенное между его северной ветвью (дуга Малого Кавказа) и Скифской плитой на севере. Вместе с сооружениями Крыма и Копетдага оно образует крупную линейную структуру, отделяемую Закавказским средним массивом, а также плитами Черного и Каспийского морей от основных частей Альпийско-Гималайского подвижного пояса (Яковлев, 2012).

Наиболее сейсмоактивными областями восточной территории Кавказа являются сейсмоопасные зоны Дагестана, Чечни, Ингушетии и Северной Осетии (Уломов и др., 2007).

Из крупных сейсмических событий, произошедших на Кавказе следует отметить землетрясения, состоявшиеся на: территории Дагестана в 1830 г. ($M = 6.3$) и в 1970 г. ($M = 6.6$); территории Чечни – Черногорское землетрясение в 1976 г. ($M = 6.2$). В западной части региона, вблизи границы России, произошли Тебердинское (1905 г., $M = 6.4$) и Чхалтинское (1963 г., $M = 6.4$) землетрясения. Самые крупные из известных землетрясений Кавказа, ощущавшихся на территории России, происходили в Азербайджане в 1902 г. (Шемаха, $M = 6.9$), в Армении в 1988 г. (Спитак, $M = 6.9$). На смежной с Северным Кавказом Скифской плите местная сейсмичность связана со Ставропольским поднятием, частично охватывающим Адыгею, Ставропольский и Краснодарский края. Магнитуды известных землетрясений в этом регионе пока не превышали $M = 6.5$ (Уломов и др., 2007).

При этом следует отметить, что на территории Северного Кавказа чаще всего происходят землетрясения с магнитудами менее 5 (<https://earthquake.usgs.gov/>).

В табл.1 представлена информация о землетрясениях, исследуемых в настоящей работе (дата, магнитуда и координаты). Глубина залегания очага у всех выбранных сейсмических событий составляла величину порядка 10 км.

На рис. 1 приведена схематическая геологическая карта Северного Кавказа (Рогожин и др., 2015), на которой отмечены места землетрясений с магнитудами 4.2–4.8, произошедших в период времени с 2017 по 2022 гг.

Таблица 1. Список исследуемых землетрясений, произошедших на территории Кавказа с 2017 по 2022 гг.

№ п/п	Дата	Магнитуда	Координаты эпицентра (широта/долгота)
1	14.03.2022	4.5	42.655/45.335
2	24.05.2021	4.4	42.759/45.141
3	28.07.2021	4.7	42.747/46.545
4	03.09.2021	4.8	42.263/46.033
5	06.02.2020	4.3	43.400/46.054
6	12.12.2020	4.7	43.155/45.529
7	24.05.2019	4.5	43.056/47.183
8	24.04.2018	4.2	44.993/37.559
9	09.06.2018	4.3	43.040/46.219
10	24.11.2018	4.4	45.008/38.613
11	06.03.2017	4.5	43.355/45.812
12	24.08.2017	4.4	44.295/41.701

Произошедшие землетрясения (см. рис. 1) были расположены, в основном, в восточной части Северного Кавказа. При этом большая часть из них была сосредоточена в зоне Предкавказского краевого прогиба.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее вероятным физическим механизмом, ответственным за формирование тепловых аномалий, возникающих при подготовке земле-

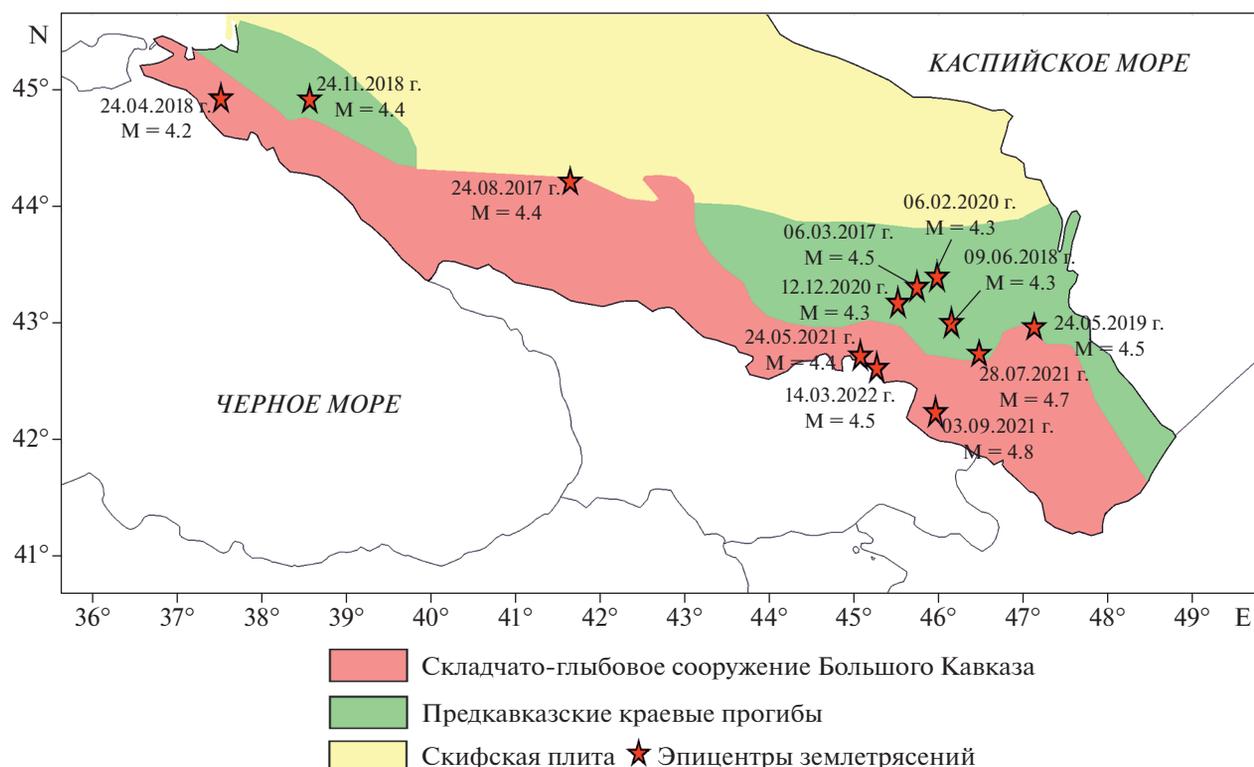


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Северного Кавказа с эпицентрами землетрясений, произошедшими с 2017 по 2020 гг., магнитуды 4.2–4.8.

трясений, является выделение скрытой теплоты испарения при конденсации паров воды на ионах, образуемых при ионизации приземного слоя воздуха (Пулинец и др., 2010, 2015). Этот процесс позволяет отслеживать пространственное распределение и динамику изменений тепловых аномалий в период подготовки и протекания сейсмических событий. При этом следует отметить, что процесс трансформации тепла, который начинается с поверхности Земли и распространяется на различные высоты атмосферы вплоть до верхней границы облаков (Ouzounov et al., 2007; Бондур, Воронова, 2020).

В период подготовки землетрясений возникают различные тепловые аномалии. К ним можно отнести: повышение температуры земной поверхности (LST) и аномальные потоки уходящего длинноволнового излучения (OLR) на высоте ~12 км (Тронин, Сараф, 2010, Ouzounov, D., Freund 2004, Бондур, Воронова, 2020; Pulinets S.A., Ouzounov 2011, Gramotoli et al., 2013, Jiao 2018). К тепловым аномалиям можно отнести также атмосферные аномалии, непосредственно связанные с изменениями температуры – изменения влажности и давления. В результате таких аномальных изменений формируются области, указывающие на эпицентр будущего землетрясения. Признаками подготовки землетрясений являются не только появление тепловых аномалий, но и их временная динамика. В частности, для ряда землетрясений была обнаружена определенная форма изменений суточного диапазона температуры воздуха и относительной влажности (Pulinets et al., 2006).

В настоящей работе исследование аномалий тепловых полей, вызванных активизацией сейсмической деятельности, основано на сборе и обработке космических изображений, полученных в ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн. Одним из условий для таких исследований является то, что эндогенная энергия в зонах сейсмической активности концентрируется в виде регионального теплового потока, определенная часть которого отчетливо фиксируется с борта космических аппаратов с помощью аппаратуры в ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн (Вилор, Минько, 2002).

В процессе проведения исследований анализировались следующие информационные продукты 3-го уровня обработки данных прибора AIRS, формировавшиеся с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$:

- температура поверхности (SST);
- температура приповерхностного слоя атмосферы (SAT);
- относительная влажность у поверхности (RHS);
- уходящее длинноволновое излучение (OLR) (Hearty et al., 2013).

Использование данных, полученных с одного прибора, позволило проанализировать многолетние изменения тепловых полей и выявить их аномальные значения, регистрируемые перед сейсмическими событиями.

В настоящей работе обработка многолетних спутниковых данных, полученных с помощью прибора AIRS (спутник Aqua), осуществлялась для выявления пространственно-временных вариаций значимых параметров тепловых полей с использованием разработанного специального программного модуля (Бондур, Воронова, 2020), а также путем пространственного и временного осреднения данных в исследуемом регионе.

В разработанном программном модуле использовался нормализованный индекс (Ni), рассчитываемый по формуле:

$$Ni = (S_d - S^*)/\sigma, \quad (1)$$

где S_d – данные за текущий день; S^* – среднее арифметическое для данных, полученных за прошлые годы; σ – стандартное отклонение.

Для сопоставления полученных результатов и применения аналитических алгоритмов осуществлялась нормализация значимых параметров тепловых полей с использованием стандартного отклонения. Это позволяло преобразовать диапазон изменения используемых значимых параметров тепловых полей, к величинам, не зависящим от единиц измерения, для сопоставления полученных результатов (Бондур, Воронова, 2020).

Проведено осреднение нормализованных значений значимых параметров тепловых полей, зарегистрированных в зоне радиуса активизации сейсмической деятельности. Для расчетов использовалась формула Добровольского (Добровольский и др., 1980):

$$R = 10^{0.43M}, \quad (2)$$

где M – магнитуда землетрясения.

Для землетрясений с магнитудами до 4.8 был выбран радиус осреднения 200 км, центром которого являлись эпицентры произошедших землетрясений.

Для анализа изменчивости тепловых полей при подготовке и протекании землетрясений, произошедших на Северном Кавказе в период с 2017 по 2022 гг., были систематизированы и обработаны космические данные, полученные прибором AIRS (спутник Aqua), в ночное время суток. Спутниковые данные были получены в периоды времени за 20 дней до главных сейсмических событий и через 3 дня после них. Для нормализации использовались данные за предшествующие годы (с 2004 г.). В результате обработки систематизированных спутниковых данных были получены нормализованные значения исследуемых значимых параметров тепловых полей (SST, SAT, RHS,

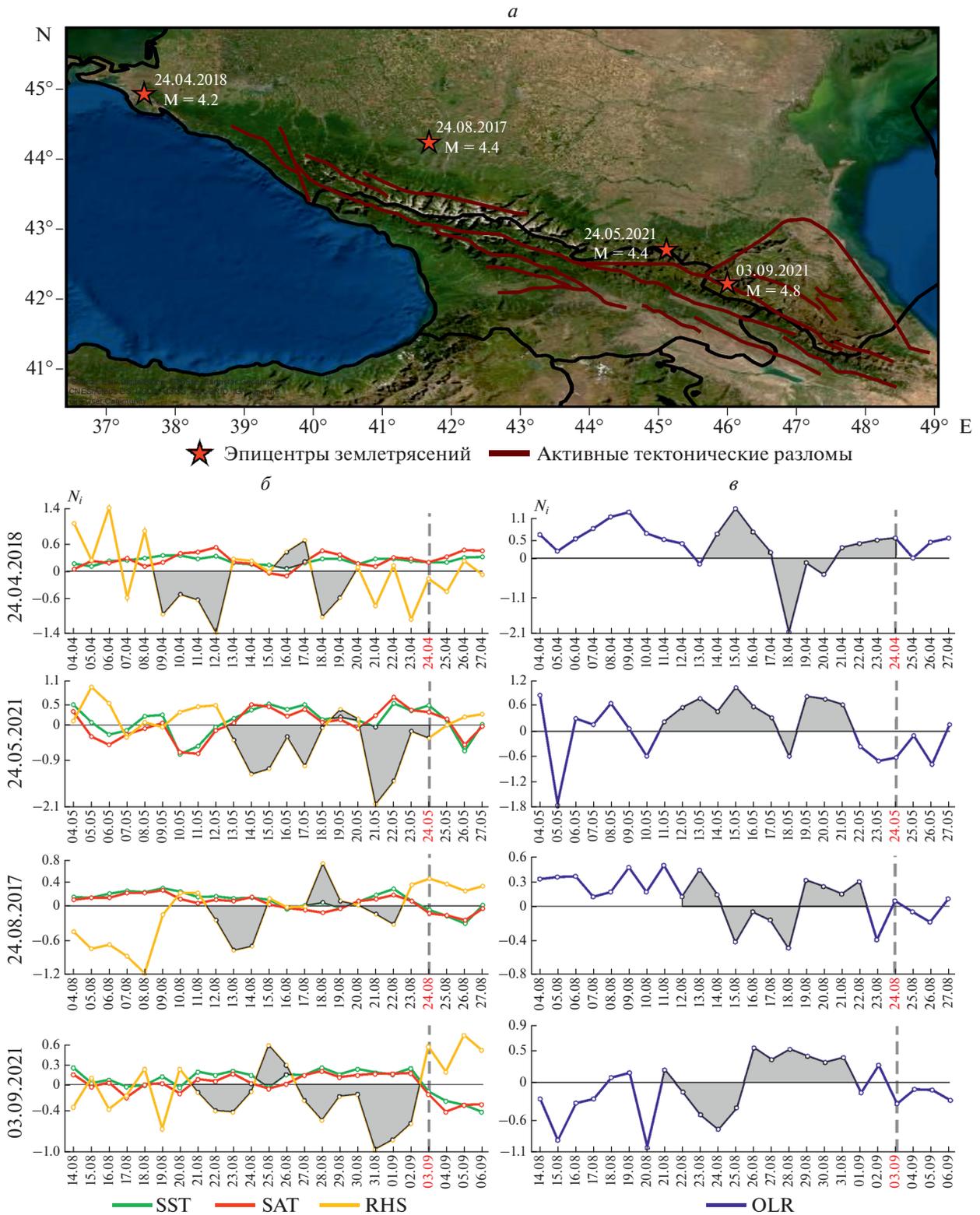


Рис. 4. Карта расположения эпицентров землетрясений, произошедших 24 апреля 2018 г. ($M = 4.2$), 24 августа 2017 г. ($M = 4.4$), 24 мая 2021 г. ($M = 4.4$) и 03 сентября 2021 г. ($M = 4.8$) (*a*) и изменения значений тепловых полей в период их подготовки: температуры земной поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и относительной влажности (*б*); уходящего длинноволнового излучения (*в*).

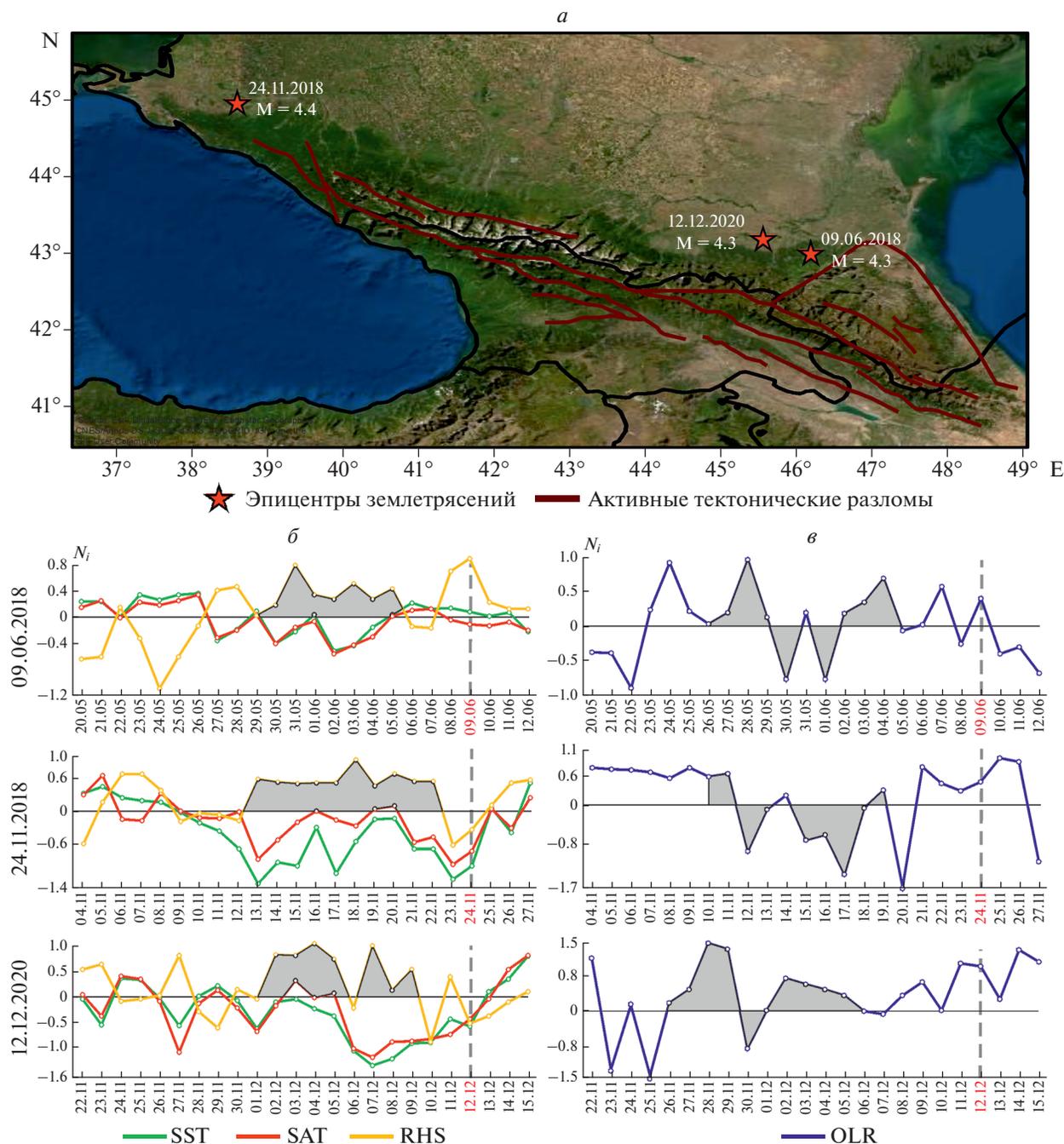


Рис. 5. Карта расположения эпицентров землетрясений, произошедших 09 июня 2018 г. ($M = 4.3$), 24 ноября 2018 г. ($M = 4.4$), 12 декабря 2020 г. ($M = 4.3$) (а) и изменения значений тепловых полей в период их подготовки: температуры земной поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и относительной влажности (б); уходящего длинноволнового излучения (в).

личин до $N_i = 1.1$). С приближением момента сейсмического удара атмосферные процессы сопровождаются противофазными колебаниями между температурой атмосферного слоя и относительной влажностью (Prasad et al., 2005; Pulinets et al., 2006). Подобный эффект был зафиксирован в пе-

риоды времени с 27 февраля по 03 марта 2022 г. и с 09 мая по 12 мая 2019 г.

Изменения уходящего длинноволнового излучения (OLR) в процессе подготовки землетрясений, произошедших 14 марта 2022 г. и 24 мая 2019 г. имели сходства в колебаниях нормализованных

значений, выделенные на рис. 2, *в*. За 14 дней (28 февраля 2022 г.) до землетрясения, произошедшего 14 марта 2022 г., было зафиксировано начало предвестникового периода изменений OLR. Значения нормализованного индекса OLR, 28 февраля 2022 г., составили $N_i = 0.8$. Схожие колебания OLR перед землетрясением, состоявшемся 24 мая 2019 г. были обнаружены за 15 дней (9 мая 2019 г.) до сейсмического события. При этом 9 мая 2019 г. значения нормализованного индекса OLR составили $N_i = 0.7$.

На рис. 3, *б*, 3, *в* представлены результаты исследований динамики тепловых полей в период подготовки землетрясений, произошедших 06 февраля 2020 г. ($M = 4.3$), 06 марта 2017 г. ($M = 4.5$) и 28 июля 2021 г. ($M = 4.7$), эпицентры (рис. 3, *а*) которых были расположены в зоне Предкавказского краевого прогиба (см. рис. 1).

Анализ вариаций тепловых полей, приведенных на рис. 3, *б*, показал, что во время подготовки сейсмических событий выявлены периоды падения относительной влажности (RHS) и рост значений температур (SST, SAT) с 21 января по 01 февраля 2020 г., с 18 февраля по 29 февраля 2017 г., а также с 11 июля по 24 июля 2021 г. Значения нормализованного индекса относительной влажности доходили до $N_i = -1.5$, а значения нормализованного индекса температур до $N_i = 1.8$.

По нормализованным значениям уходящего длинноволнового излучения (OLR) были обнаружены схожие колебания (выделенные на рис. 3, *в*) в период подготовки землетрясений: за 16 дней (21 января 2020 г.) до землетрясения, произошедшего 06 февраля 2020 г., за 14 дней (20 февраля 2017 г.) до землетрясения, состоявшегося 06 марта 2017 г. и за 15 дней (13.07.2021 г.) до сейсмического события, произошедшего 28 июля 2021 г.

Результаты обработки космических данных для исследования изменений тепловых полей в период подготовки землетрясений, состоявшихся 24 апреля 2018 г. ($M = 4.2$), 24 августа 2017 г. ($M = 4.4$), 24 мая 2021 г. ($M = 4.4$) и 03 сентября 2021 г. ($M = 4.8$), приведены на рис. 4, *б*, 4, *в*. Эпицентры произошедших землетрясений (рис. 4, *а*) располагались вдоль Складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа (см. рис. 1).

При анализе результате проведенной обработки космических данных выявлены схожие колебания нормализованных значений тепловых полей, область которых выделена на рис. 4, *б*, 4, *в* серым цветом. Изменения нормализованных значений температур (SST, SAT) и относительной влажности (RHS) в апреле (для землетрясения, произошедшего 24 апреля 2018 г.) и в мае (для землетрясения, произошедшего 24 мая 2021 г.) позволили выявить противофазные колебания в период подготовки сейсмических событий. Значения нормализованного индекса температур доходили до

$N_i = 0.7$, а значения относительной влажности до $N_i = -2$. Рост температур и падение относительной влажности представляют собой атмосферные процессы, сопровождающие подготовку сейсмического события (Prasad, et al., 2005; Pulinets et al., 2006).

Нормализованные значения SST, SAT, RHS в августе (для землетрясения, произошедшего 24 августа 2017 г.) и сентябре (для землетрясения, состоявшегося 03 сентября 2021 г.) имеют схожий характер изменения, выделенный на рис. 4, *б*.

Проведенный анализ нормализованных значений уходящего длинноволнового излучения (OLR) позволил обнаружить схожие колебания в период подготовки землетрясений (рис. 4, *в*). Аномальные изменения OLR были зафиксированы в среднем от 14–16 дней до произошедших землетрясений 24.04.2018 г. (значения нормализованного индекса до $N_i = 1.1$), 24.05.2021 г. (значения нормализованного индекса $N_i = 0.8$); 24.08.2017 г. (значения нормализованного индекса до $N_i = 0.5$), и 03.09.2021 г. (значения нормализованного индекса до $N_i = 0.5$).

Карта расположения эпицентров землетрясений, произошедших 09 июня 2018 г. ($M = 4.3$), 24 ноября 2018 г. ($M = 4.4$), 12 декабря 2020 г. ($M = 4.3$) изображена на рис. 5, *а*, графики изменений значимых параметров тепловых полей приведены на рис. 5, *б*, 5, *в*. Эпицентры этих землетрясений располагались в зоне Предкавказских краевых прогибов (см. рис. 1).

Анализ результатов обработки спутниковых данных, представленных на рис. 5, *б*, 5, *в*, позволил выявить предвестниковые изменения значимых параметров тепловых полей в период подготовки сейсмических событий, состоявшихся 09 июня 2018 г. ($M = 4.3$), 24 ноября 2018 г. ($M = 4.4$), 12 декабря 2020 г. ($M = 4.3$).

За 9–11 дней до произошедших землетрясений выявлены аномальные превышения значений нормализованного индекса (до $N_i = 1$) относительной влажности (RHS), по сравнению с прошлыми годами (начиная с 2004 г.). В эти же дни были зафиксированы падения нормализованных индексов температур (SST и SAT), которые достигали значений $N_i = -1.5$ (рис. 5, *б*). Максимальные нормализованные значения индексов уходящего длинноволнового излучения (OLR) достигали величин $N_i = 1$ (рис. 5, *в*) и были обнаружены 24 мая и 28 мая 2018 г. (за 13 и 16 дней до землетрясения, произошедшего 09 июня 2018 г.), 09 ноября 2018 г. (за 15 дней до землетрясения, произошедшего 24 ноября 2018 г.) и 28 ноября 2020 г. (за 14 дней до землетрясения, произошедшего 12 декабря 2020 г.).

Проведенные исследования вариаций тепловых полей в период подготовки землетрясений, произошедших на Северном Кавказе с 2017 по

Таблица 2. Временная последовательность появления положительных аномалий тепловых полей, обнаруженная перед землетрясениями, произошедшими на Северном Кавказе с 2017 по 2022 гг. (M от 4.2 до 4.8)

Дата землетрясения	Время появления тепловых аномалий перед землетрясениями			
	для температуры поверхности	для температуры приповерхностного слоя атмосферы	для относительной влажности у поверхности	для уходящего длинноволнового излучения
14.03.2022	за 10 дней	за 10 дней	за 14 дней	за 14 дней
24.05.2021	за 10 дней	за 10 дней	за 13 дней	за 16 дней
28.07.2021	за 8 дней	за 8 дней	за 3 дня	за 9 дней
03.09.2021	за 11 дней	за 11 дней	за 9 дней	за 15 дней
06.02.2020	за 7 дней	за 8 дней	за 4 дня	за 11 дней
12.12.2020	—	за 9 дней	за 10 дней	за 14 дней
24.05.2019	за 12 дней	за 12 дней	за 14 дней	за 15 дней
24.04.2018	за 12 дней	за 12 дней	за 7 дней	за 15 дней
09.06.2018	за 14 дней	за 14 дней	за 9 дней	за 16 дней
24.11.2018	—	—	за 11 дней	за 15 дней
06.03.2017	за 9 дней	за 9 дней	за 6 дней	за 14 дней
24.08.2017	за 10 дней	за 10 дней	за 6 дней	за 15 дней

2022 гг. (M от 4.2 до 4.8) позволили выявить временную последовательность появления положительных аномалий, которая представлена в табл. 2.

Анализ табл. 2 показал следующее: повышение нормализованных значений уходящего длинноволнового излучения происходило в среднем за 14 дней до землетрясений; положительные аномалии температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы проявлялись в среднем за 10 дней до сейсмических событий; а увеличение нормализованных значений относительной влажности проявлялись за 8 дней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе по спутниковым данным были проанализированы вариации тепловых полей в процессе подготовки и протекания землетрясений с магнитудами от 4.2 до 4.8, произошедших на территории Северного Кавказа с 2017 по 2022 гг.

Для исследуемых землетрясений, эпицентры которых располагались в зоне одинаковых геологических структур, выявлены схожие изменения тепловых полей в периоды их подготовки.

Схожие изменения тепловых полей были обнаружены для групп землетрясений, произошедших в зоне Складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа и в зоне Предкавказских краевых прогибов. Землетрясения, произошедшие в

зоне Складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа (в восточной части), отличались превышениями значений нормализованного индекса относительной влажности (до $N_i = 1.5$).

Для сейсмических событий, происходивших в зоне Предкавказских краевых прогибов (в восточной части), выявлены положительные аномалиями температур (значения нормализованного индекса достигали величин $N_i = 1.8$) и аномальные понижения относительной влажности ($N_i = -1.5$).

Эпицентры землетрясений, произошедших вдоль зоны Складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа характеризовались колебательными изменениями значений тепловых полей: нормализованные значения относительной влажности изменялись с отрицательных ($N_i = -2$) до положительных ($N_i = 1$); нормализованные значения температур от отрицательных $N_i = -0.8$ до положительных $N_i = 0.7$.

Землетрясения, произошедшие в зоне Предкавказских краевых прогибов (на западе близ Черного моря и на востоке ближе к Каспийскому морю) характеризовались превышениями нормализованных значений относительной влажности (до $N_i = 1$) и пониженными значениями температур ($N_i = -1.5$).

По мере приближения к моментам сейсмических событий атмосферные процессы сопровождались противофазными проявлениями температуры приповерхностного слоя и относитель-

ной влажности у земной поверхности. Вариации уходящего длинноволнового излучения (OLR) носили более схожий характер для всех проанализированных сейсмических событий, несмотря на разницу в местоположениях их эпицентров (значения нормализованного индекса изменялись от $N_i = -1.5$ до $N_i = 1.5$). При этом следует отметить, что каждое землетрясение имеет свои индивидуальные свойства и характеристики, поэтому наблюдаемые вариации тепловых полей не являлись полностью идентичными.

Таким образом на основании результатов анализа изменений значимых параметров тепловых полей (температур поверхности, приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, и уходящего длинноволнового излучения) были обнаружены их предвестниковые изменения в эпицентральных зонах готовящихся землетрясений. Они заключались в следующем: в повышении нормализованных значений уходящего длинноволнового излучения, которое происходило в период от 9 до 16 дней до землетрясений; в возникновении положительных аномалий температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, которые проявлялись от 7 до 14 дней до землетрясений; в увеличении нормализованных значений относительной влажности, происходивших от 3 до 14 дней до сейсмических событий.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования космических данных для регистрации тепловых предвестников, связанных с активизацией сейсмической деятельности. Результаты выполненных исследований предвестниковой изменчивости тепловых полей могут быть использованы при проведении комплексного мониторинга сейсмоопасных территорий для повышения достоверности прогноза землетрясений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта №122011800095-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // *Физика Земли*. 2016 а. № 1. С. 120–132.
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2016 б. Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // *Исслед Земли из космоса*. 2005. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Систематизация ионосферных, геодинамических и тепловых предвестников сильных землетрясений ($M \geq 6$), регистрируемых из космоса // *Исслед. Земли из космоса*. 2018. № 4. С. 3–19.
<https://doi.org/10.31857/S020596140002352-8>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 5. С. 3–24.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050036>
- Бондур В.Г., Воронова О.С., Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ($M = 6.1$) и 24 января 2020 г. ($M = 6.7$) // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 6. С. 3–16.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- Вилор Н.В., Минько Н.П. Спутниковый мониторинг инфракрасного излучения геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны // *Исслед. Земли из космоса*. 2002. № 4. С. 55–61.
- Добровольский И.А., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясения / *Моделирование предвестников землетрясений*. М.: Наука. С. 7–14. 1980.
- Жуков Б.С., Халле В., Шлотихауэр Г., Эртель Д. Пространственно-временной анализ тепловых аномалий как предвестников землетрясений // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 2. С. 333–343.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, инициируемых ионизацией // *Геомagnetизм и Аэрономия*, 2015. Т. 55. № 4. С. 1–19
<https://doi.org/10.7868/S0016794015040136>
- Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.
- Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Овсюченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // *Геотектоника*. 2015. № 2. С. 36–49.
<https://doi.org/10.7868/S0016853X15020058>

- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Цидилина М.Н., Гапонова М.В.* Сейсмоионосферные вариации во время сильных землетрясений на примере землетрясения 2010 г. в Чили // *Космические исслед.* 2018. Т. 56. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.31857/S002342060000347-9>
- Тронин А.А., Сараф А.К.* Космическая тепловая съемка Передового надвига Гималаев // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса.* 2010. Т. 7. № 2. С. 350–353.
- Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С.* К оценке опасности на Северном Кавказе // *Физика Земли,* 2007. № 76. С. 31–45.
- Яковлев Ф.Л.* Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* 2012. Вып. 19. № 1. С. 191–214.
- Dzheboev B.A., Soloviev A.A., Dzeranov B.V., Karapetyan J.K., Sergeeva N.A.* Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus, $M \geq 6.0$. Variable EPA method // *Russ. J. Earth. Sci.,* 2019, 19, ES6005, <https://doi.org/10.2205/2019ES000691>
- Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V.* Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake, *Phys. Chem. Earth,* 2004. 29. 517–527.
- Forte A., Cowgill E., Whipple K.X.* Transition from a singly vergent to doubly vergent wedge in a young orogen: The Greater Caucasus. *Tectonics,* 2014. 33. 2077–2101.
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., ... Soloviev A.* Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews,* 2020. 103222. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103222>
- Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* 2018. 18. 1013–1036. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>
- Ouzounov D., Freund F.* Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data, *Adv. Space Res.,* 2004. 33. 268–273.
- Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes. *Tectonophysics.* 2007. 431. 211–220.
- Prasad B.S.N., Nagaraja K., Chandrashekara M.S., Paramesh L., Madhava M.S.* Diurnal and seasonal variations of radioactivity and electrical conductivity near the surface for a continental location Mysore, India. *Atmospheric Research,* 2005. 76(1–4). 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.011>
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,* 31(4–9), 2006. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation. *J. Asian Earth Sciences,* 2011. 41(4–5), 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>
- Saradjian M.R., Akhoondzadeh M.* Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 2011. 11(4), 1109–1119. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1109-2011>
- Song D., Xie R., Zang L., Yin J., Qin K., Shan X., ... Wang B.* A New Algorithm for the Characterization of Thermal Infrared Anomalies in Tectonic Activities. *Remote Sensing,* 2018. 10(12), 1941. <https://doi.org/10.3390/rs10121941>
- Tan O., Taymaz T.* Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms, in Dilek Y., and Pavlides S., eds., *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper 2006,* 409. 531–578. [https://doi.org/10.1130/2006.2409\(25\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(25))
- Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., ... Kazimova S.* Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus // *J. Asian Earth Sciences,* 2019. 104108. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104108>
- Tramutoli V., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Martinelli G., Pergola N.* On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST), *Chem. Geol.,* 2013. 339. 157–168.
- Tramutoli V., Cuomo V., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C.* Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (İzmit) earthquake, August 17, 1999, *Remote Sens. Environ.,* 2005. 96. 409–426.
- Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review. *Remote Sensing,* 2(1), 2010. 124–150. <https://doi.org/10.3390/rs2010124>
- Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I.* Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area. *Phys. Chem. Earth* 29, 2004, 501–506. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.09.024>
- Tsereteli N., Tibaldi A., Alania V., Gventsadse A., Erukidze O., Varazanashvili O., Muller B.I.R.* Active tectonics of central-western Caucasus, Georgia. *Tectonophysics.* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.025> S0040-1951(16)30478-4

Registering From Space Anomalous Variations of Thermal Fields during Seismic Events in the Northern Caucasus Region in 2017-2022

V. G. Bondur¹ and O. S. Voronova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Changes in thermal fields during preparation and occurrence of earthquakes (4.2–4.8 magnitudes) in the Northern Caucasus region between 2017–2022 were studied using satellite data. Values of temperatures of the surface and near-surface air, outgoing longwave radiation, as well as relative humidity near the surface registered from space, were analyzed. Comparison of changes in thermal fields during the preparation of seismic events was carried out for the earthquakes with epicenters located in the zone of similar geological structures such as Fold-block structures of the Greater Caucasus and Pre-Caucasian foreland basin. A similarity in temperature changes, relative humidity, and fluctuations of outgoing longwave radiation was revealed for a number of earthquakes. The greatest similarity in the nature of changes in the normalized values of outgoing longwave radiation was revealed during the preparation of all analyzed seismic events, despite the difference in the locations of their epicenters. The results obtained can be used as short-term precursors of seismic events that can be registered from space.

Keywords: natural disasters, strong earthquakes, earthquake precursors, thermal anomalies, remote sensing, satellite data

REFERENCES

- Akopian S.Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A.* Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. <https://doi.org/10.1134/S1069351317010025>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. P. 183–186. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V.* The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016. V. 52. № 1. P. 117–128. <https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>
- Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Joint Analysis of Anomalies of Different Geophysical Fields, Recorded from Space during Precursors of Strong Earthquakes in California // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020. V. 56. № 12. P. 1502–1519. <https://doi.org/10.1134/S000143382012035X>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Systematization of Ionospheric, Geodynamic, and Thermal Precursors of Strong ($M \geq 6$) Earthquakes Detected from Space // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018. V. 54. № 9. P. 1172–1185. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090475>
- Bondur V.G., Voronova O.S.* Study of Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey on March 8, 2010 ($M = 6.1$), and January 24, 2020 ($M = 6.7$) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 991–1002. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Kosmicheskiy metod prognoza zemletryaseny na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov (A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005b. № 3. P. 37–52. (In Russian).
- Dobrovolskiy I.A., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Ob otsenke razmerov zony proyavleniya predvestnikov zemletryaseniya (On the assessment of the size of the zone of earthquake precursor manifestation)/*Modelirovaniye predvestnikov zemletryaseny*. Moscow: Nauka. P. 7–14. 1980. (In Russian).
- Dzheboev B.A., Soloviev A.A., Dzeranov B.V., Karapetyan J.K., Sergeeva N.A.* Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus, $M \geq 6.0$. Variable EPA method, *Russ. J. Earth. Sci.*, 2019, 19, ES6005. <https://doi.org/10.2205/2019ES000691>
- Filizola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V.* Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake, *Phys. Chem. Earth*, 2004. 29. 517–527.
- Forte A., Cowgill E., Whipple K.X.* Transition from a singly vergent to doubly vergent wedge in a young orogen: The Greater Caucasus. *Tectonics*, 2014. 33. 2077–2101.
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.*, Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., ... Soloviev A.* Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*, 2020. 103222. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103222>
- Jiao Z.-H., Zhao J., Shan X.* Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2018. 18, 1013–1036. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>

- Khain V.Ye., Limonov A.F.* Regionalnaya geotektonika (Tektonika kontinentov i okeanov) (Regional geotectonics (Tectonics of continents and oceans). Textbook. 2004. 272 p. ISBN 5-88942-036-4. (In Russian).
- Ouzounov D., Freund F.* Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data, *Adv. Space Res.*, 2004. 33. 268–273.
- Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes. *Tectonophysics*. 2007. 431. 211–220.
- Prasad B.S.N., Nagaraja K., Chandrashekara M.S., Paramesh L., Madhava M.S.* Diurnal and seasonal variations of radioactivity and electrical conductivity near the surface for a continental location Mysore, India. *Atmospheric Research*, 2005. 76(1–4). 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.011>
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50. № 2. P. 231–242. <https://doi.org/10.1134/S0016793210020118>.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelina A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4–9), 2006. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>.
- Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sciences*, 2011. 41(4–5). 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>
- Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Y.V.* The structural framework and recent geodynamics of the greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on its deep structure // *Geotectonics*. 2015. T. 49. № 2. C. 123–134. <https://doi.org/10.1134/S0016852115020053>
- Saradjian M.R., Akhoondzadeh M.* Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011. 11(4). 1109–1119. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1109-2011>
- Smirnov V.M., Smirnova E.V., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Seismo-Ionospheric Variations during Strong Earthquakes Based on the Example of the 2010 Earthquake in Chile // *Cosmic Research*, 2018. V. 56. № 4. P. 310–318. <https://doi.org/10.1134/S0010952518040068>.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseni i predvestniki (Earthquake physics and precursors). Moscow: Nauka, 2003. P. 270 p. (In Russian).
- Song D., Xie R., Zang L., Yin J., Qin K., Shan X., ... Wang B.* A New Algorithm for the Characterization of Thermal Infrared Anomalies in Tectonic Activities. *Remote Sensing*, 2018. 10(12), 1941. <https://doi.org/10.3390/rs10121941>
- Tan O., Taymaz T.* Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms, in Dilek, Y., and Pavlides, S., eds., *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper 2006*. 409, 531–578. [https://doi.org/10.1130/2006.2409\(25\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(25))
- Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., ... Kazimova, S.* (2019). Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus // *J. Asian Earth Sciences*, 104108. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104108>
- Tramutoli V., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Martinelli G., Pergola N.* On the possible origin of the thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST), *Chem. Geol.*, 2013. 339. 157–168.
- Tramutoli V., Cuomo V., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C.*: Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (İzmit) earthquake, August 17, 1999, *Remote Sens. Environ.*, 2005. 96. 409–426.
- Tronin A.A., Saraf A.K.* Satellite thermal survey of Himalayan Frontal Thrust // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010. V. 7. № 2. P. 350–353.
- Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review. *Remote Sensing*, 2(1), 2010. 124–150. <https://doi.org/10.3390/rs2010124>
- Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I.* Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area. *Phys. Chem. Earth* 29, 2004. 501–506. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.09.024>
- Tsereteli N., Tibaldi A., Alania V., Gventsadse A., Enukidze O., Varazanashvili O., B.I.R. Muller* Active tectonics of central-western Caucasus, Georgia. *Tectonophysics*. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.025> S0040-1951(16)30478-4
- Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S.* Assessment of seismic hazard in the north Caucasus // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2007. T. 43. № 7. C. 559–572. <https://doi.org/10.1134/S1069351307070051>.
- Vilor N.V., Minko N.P.* Sputnikovyy monitoring infrakrasnogo izlucheniya geologo-strukturnykh elementov Sayano-Baykalo-Patomskoy gornoy oblasti i Baykalskoy riftovoy zony (Satellite monitoring of infrared radiation of geological and structural elements of the Sayano-Baikal-Patom mountainous region and the Baikal rift zone) // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2002. № 4. P. 55–61. (In Russian).
- Yakovlev F.L.* Opyt postroyeniya sbalansirovannoy struktury vostochnoy chasti alpiyskogo Bolshogo Kavkaza po dannym kolichestvennykh issledovaniy lineynoy skladchatosti (Reconstruction of the balanced structure of the eastern part of alpine greater Caucasus using data from quantitative analysis of linear folding – case study) // *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”*. *Earth Sciences*. 2012. Is. 19. № 1. P. 191–214. (In Russian).
- Zhukov B.S., Halle W., Schlotzhauer G., Oertel D.* Spatial and temporal analysis of thermal anomalies as earthquake precursors // *Sovr. Probl. DZZ Kosm.* 2010. V. 7. № 2. P. 333–343. (In Russian).