

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНОМАЛИИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ, ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОТЕКАНИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ В 2008–2022 гг.

© 2023 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 31.07.2023 г.

С использованием космических данных исследованы многолетние изменения тепловых полей до и во время сильных землетрясений с магнитудами от 5.1 до 5.6, произошедших в районе Байкальской рифтовой зоны в 2008–2022 гг. Для анализа использовались значения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, а также относительной влажности, зарегистрированные с помощью прибора AIRS, установленного на спутнике Aqua. В периоды подготовки и протекания этих сейсмических событий обнаружены аномальные вариации зарегистрированных из космоса параметров тепловых полей, которые превышали средние многолетние значения: для температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы на 5–10%, для уходящего длинноволнового излучения на 11–15%, а для относительной влажности на 6–10%. Выявлены значительная отрицательная корреляционная связь между изменениями температуры приповерхностного слоя атмосферы и относительной влажностью (коэффициент корреляции -0.75), а также противофазные колебания между значениями уходящего длинноволнового излучения и относительной влажности. Полученные результаты могут быть использованы для изучения предвестниковой изменчивости тепловых полей при мониторинге сейсмоопасных территорий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, природные катастрофы, землетрясения, тепловые аномалии, Байкальская рифтовая зона

DOI: 10.31857/S0205961423060027, EDN: ZAPTGE

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые методы и технологии являются перспективным и подходящим инструментом для изучения аномалий различных геофизических полей, возникающих перед землетрясениями, благодаря широкому охвату, оперативности и более низким затратам по сравнению с наземными данными (Бондур и др., 2021, 2022, 2023; Смирнов и др., 2018; Ouzounov et al., 2007). Некоторые из этих аномалий могут быть использованы в качестве предвестников землетрясений (Соболев, Пonomarev, 2003).

В последние годы установлены связи между аномалиями различных геофизических полей, регистрировавшихся по спутниковым данным, и динамикой литосферных и атмосферных процессов в периоды сильных и катастрофических землетрясений, происходивших в различных регионах Земли, например, в Турции (Бондур и др., 2023; Бондур, Воронова 2020; Akhoondzadeh, Marchetti, 2023; Barbot et al., 2023), на Суматре

(Бондур и др., 2007; Elshin and Tronin, 2020), в Японии (Имашев, Свердлик 2015; в Калифорнии (Pavlidou et al., 2018; Гапонова и др., 2019) в Чили (Смирнов и др., 2018), а также значительных сейсмических событий на территории России, происходивших, например, на Северном Кавказе (Бондур, Воронова, 2022), в республике Тува (Кашкин и др., 2012), в районе озера Байкал (Бондур и др., 2021, 2022) и в других регионах.

В периоды подготовки и протекания таких сейсмических событий с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса могут регистрироваться аномалии различных геофизических полей, в том числе такие, как: геодинамические, связанные с динамикой блоково-разломной структуры (Бондур и др., 2021), с изменением характера систем линейментов (Гапонова и др., 2019); аномалии параметров ионосферы (Бондур и др., 2007; Пулинец и др., 2010; Saradjian, Akhoondzadeh, 2011; Смирнов и др., 2018); вариации тепловых полей (Жуков и др., 2010; Ouzounov

et al., 2007; Tronin, 2020; Genzano et al., 2021; Бондур, Воронова, 2020, 2022) и др.

Эффективность спутниковых методов существенно повышается при комплексном анализе различных геофизических полей, регистрируемых из космоса (Бондур и др., 2022, 2023; Pulinets et al., 2015), а также с результатами, полученными с использованием наземных методов (Мельникова и др., 2013, 2014), методов, основанных на использовании геомеханических моделей для анализа изменений напряженно-деформированного состояния земной коры (Бондур и др., 2010, 2016а, 2016б), метода сейсмической энтропии для мониторинга и прогнозирования землетрясений (Акопян и др., 2017) и др.

Регистрируемые из космоса аномалии различных геофизических полей могут использоваться при разработке методов и осуществлении прогнозов землетрясений, происходящих в различных сейсмоопасных регионах (Keilis-Borok et al., 1990).

Перспективным направлением исследования проявлений сейсмической активности является регистрация из космоса аномальных вариаций тепловых полей в периоды подготовки и протекания сильных землетрясений (Ouzounov et al., 2007; Tronin, 2020; Бондур, Воронова, 2020, 2022).

Одним из наиболее сейсмоопасных районов России является Байкальская рифтовая зона, где часто происходят сильные землетрясения с магнитудами более 5 (Мельникова и др., 2014; Середкина, 2021). Поэтому космический мониторинг этой сейсмоопасной территории является актуальным.

Целью проведения настоящих исследований являлось выявление аномальных изменений параметров тепловых полей, связанных с землетрясениями, путем обработки и анализа многолетних временных рядов спутниковых данных, полученных с помощью одного прибора в пределах одной сейсмоопасной области (в районе озера Байкал) для исключения влияния факторов сезонности, погрешностей алгоритмов восстановления данных спутниковых приборов и других факторов.

В данной работе представлена методика и результаты ретроспективного анализа спутниковых данных, которые позволили выявить аномальные вариации тепловых полей в периоды подготовки и протекания сильных землетрясений, произошедших на территории Байкальской рифтовой зоны 20 мая 2008 г., 16 июля 2011 г., 23 мая 2014 г., 21 сентября 2020 г., 31 августа 2021 г. и 8 июня 2022 г. Для исследований были выбраны землетрясения с магнитудами 5.1–5.6 наиболее часто происходящие на данной территории, которые могут создавать дополнительное напряжение и служить триггерами к возникновению сейсмических событий с магнитудами более 6.

ОСОБЕННОСТИ РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Байкальский рифт простирается более чем на 2500 км из Северо-Западной Монголии через горные сооружения Восточной Сибири до Южной Якутии (Логачев, 2003; Середкина, 2021). Его юго-западное окончание совпадает с двумя крупными межгорными впадинами меридионального простирания: Дархатской и Хубсугульской, ориентированными практически под прямым углом к западному флангу рифтовой системы. Восточный фланг, состоящий также из субширотного простирающихся структурных элементов, достигает западной части Станового нагорья (Логачев, 2003).

Существуют разные мнения о возрасте рифтовой зоны, а также о геодинамических процессах, приведших к образованию и развитию рифта (Мац и др., 2014; San'kov et al., 2011; Buslov, 2012; Petit, Déverchère, 2006). Однако общепризнано, что современные процессы рифтогенеза и раскрытия бассейна оз. Байкал обусловлены юго-восточным движением Амурской плиты относительно Евразийской плиты (Середкина, 2021; Radziminovich et al., 2022). Общее структурное положение и развитие Байкальского рифта определяется, в первую очередь, его связью с зоной сочленения двух главных литосферных плит Восточной Сибири, имеющих контрастные термомеханические свойства: докембрийской Сибирской платформы и Саяно-Байкальского подвижного пояса (Логачев, 2003).

Район Байкальской рифтовой зоны традиционно считается высокосейсмичным и характеризуется более повышенной концентрацией эпицентров землетрясений в районе оз. Байкал (Мельникова и др., 2013). По историческим данным, за последние 160 лет в этом районе произошло четыре катастрофических землетрясения в 1862, 1885, 1903 и в 1959 гг. (<http://www.gsras.ru>; <https://earthquake.usgs.gov>). При наиболее сильном землетрясении – Цаганском с магнитудой $M = 7.6$ (1862 г.) – образовался залив Провал и было затоплено 220 км² суши. К этой крупнейшей сейсмодислокации приурочено Кударинское землетрясение, произошедшее 09 декабря 2020 г. с магнитудой $M = 5.4$. Среднебайкальское землетрясение, состоявшееся 29 августа 1959 г. с магнитудой $M = 6.8$, является одним из сильнейших, начиная с 50-х гг. XX в. (Тубанов и др., 2021). В районе юго-западного замыкания оз. Байкал 27 августа 2008 г. произошло Култукское землетрясение с магнитудой $M = 6.3$ (рис. 1). Оно стало весьма заметным и важным сейсмическим событием для Южного Прибайкалья за более чем полувековой период инструментальных наблюдений (Мельникова и др., 2014).

В настоящей работе с использованием космических данных были исследованы землетрясения,

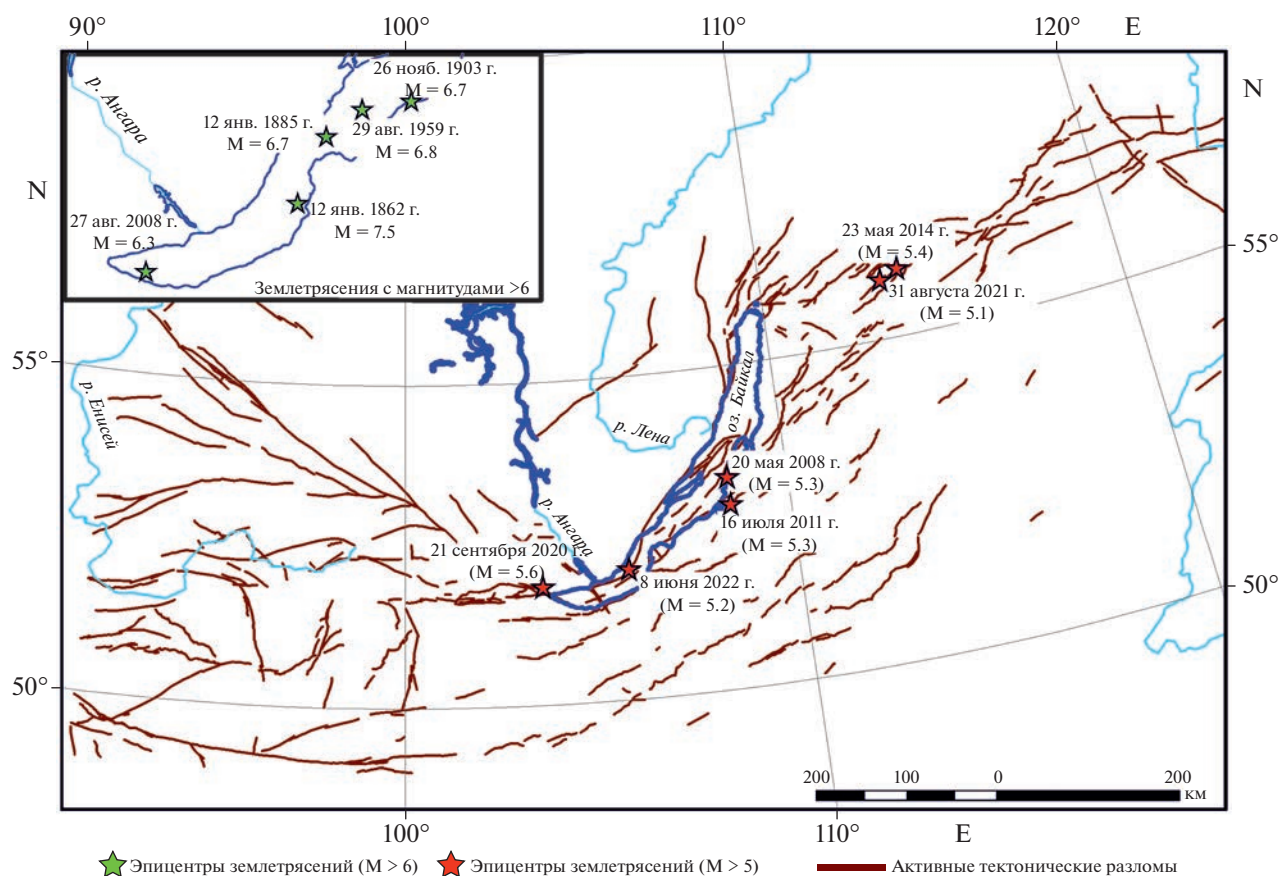


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений, произошедших вблизи оз. Байкал. В основной части рисунка представлены исследуемые землетрясения 20 мая 2008 г. ($M = 5.3$), 16 июля 2011 г. ($M = 5.3$), 23 мая 2014 г. ($M = 5.4$), 21 сентября 2020 г. ($M = 5.6$), 31 августа 2021 г. ($M = 5.1$) и 8 июня 2022 г. ($M = 5.2$) с нанесенными на карту активными тектоническими разломами Байкальской рифтовой зоны. На вставке изображены эпицентры землетрясений с магнитудами $M > 6$.

произошедшие на территории Байкальской рифтовой зоны 20 мая 2008 г. ($M = 5.3$), 16 июля 2011 г. ($M = 5.3$), 23 мая 2014 г. ($M = 5.4$), 21 сентября 2020 г. ($M = 5.6$), 31 августа 2021 г. ($M = 5.1$) и 8 июня 2022 г. ($M = 5.2$), эпицентры которых приведены на рис. 1. На рис.1 нанесены также активные тектонические разломы Байкальской рифтовой зоны (Гладков, Лунина 2014; Гладков и др., 2013). На вставке этого рисунка изображены эпицентры землетрясений с магнитудами $M > 6$. Глубина очагов исследуемых сейсмических событий не превышала 20 км.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИХ ОБРАБОТКИ

В настоящей работе использовались временные ряды данных, получаемые, начиная с 2004 г., с помощью прибора AIRS (спутник Aqua), которые позволяли анализировать вариации тепловых полей на различных уровнях (от поверхности

Земли, до верхней границы облаков). Преимуществом этого спутникового прибора являлась возможность получать ежедневные карты глобальных распределений значимых параметров тепловых полей, как в дневное, так и в ночное время (Susskind et al., 2012).

Для проведенных исследований были выбраны такие параметры тепловых полей, связанные с сейсмической активностью, как (Бондур, Воронова, 2020, 2022): температура земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), изменения уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительной влажности (RHS).

Используемый подход к выявлению аномалий значимых параметров тепловых полей, основывался на статистическом анализе ночных спутниковых данных с использованием интервала среднеквадратического отклонения данных от среднегодовых, зарегистрированных в предыдущие годы (начиная с 2004 г.). Для анализа изменчивости этих параметров, регистрируемых из космоса,

в период подготовки и протекания сильных землетрясений, произошедших на территории Байкальской рифтовой зоны, применялась методика, основанная на использовании интервала стандартного отклонения анализируемых данных ($\mu \pm \sigma$) от среднеарифметических значений (μ) за период времени с 2004 по 2022 гг. В качестве зоны исследований использовалась область, радиусом 300 км, включающая территорию, где располагались эпицентры сейсмических событий.

Для анализа изменчивости исследуемых параметров проводилось также сравнение их значений, полученных в периоды сейсмической активности и сейсмических затиший (фоновая обстановка), когда на исследуемой территории землетрясений не происходило. Результаты представлялись в виде графиков изменения текущих значений этих параметров и их колебаний относительно среднегодовых и фоновых значений. Также рассчитывался коэффициент корреляции значимых параметров, регистрируемых из космоса.

Для выявления пространственно-временных вариаций этих исследуемых параметров тепловых полей осуществлялась обработка данных с применением разработанного программного модуля (Бондур, Воронова, 2020). В этом программном модуле использовался нормализованный индекс (N_i), рассчитываемый по формуле:

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

где S_d — данные за текущий день; S^* — среднее арифметическое прошлых лет; σ — стандартное отклонение.

Нормализация значений тепловых полей позволяла преобразовать диапазон изменения числовых значений значимых параметров, не зависящих от единиц измерения, для обеспечения возможностей сопоставления полученных результатов и применения аналитических алгоритмов (Бондур, Воронова, 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Анализ аномалий тепловых полей для землетрясений, произошедших 23 мая 2014 г. ($M = 5.4$) и 31 августа 2021 г. ($M = 5.1$). На рис. 2 представлены изменения исследуемых параметров (температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения) в процессе подготовки и протекания землетрясений, произошедших 23 мая 2014 г. ($M = 5.4$) и 31 августа 2021 г. ($M = 5.1$) на территории северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны. Эпицентры этих землетрясений располагались на небольшом расстоянии (37 км) друг от друга (см. рис. 1).

Анализ рис. 2 показал, что изменения фоновых значений выбранных значимых параметров тепловых полей (графики в виде точек) носили умеренный характер, без резких перепадов и практически не выходили за пределы среднеквадратических отклонений (см. рис. 2).

Землетрясение в Муяканском хребте произошло 23 мая 2014 г. ($M = 5.4$) на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны (рис. 1). Анализ изменений значений исследуемых параметров тепловых полей, приведенных на рис. 2, а для этого сейсмического события, позволил обнаружить следующие особенности:

- с 6 по 10 мая 2014 г. (за 14–17 дней до землетрясения) аномально высокие значения уходящего длинноволнового излучения (OLR), достигавшее величины до 236 Вт/м², рост значений температур (SST и SAT) на 3–4°C, превышающие среднеквадратические отклонения, а также понижение относительной влажности (RHS) до 70%, ниже среднеквадратического отклонения;

- с 10 по 13 мая 2014 г. (за 9–14 дней до землетрясения) резкое падение значений уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 47 Вт/м², снижение значений температур на 7–11°C, повышение относительной влажности (RHS) на 16%;

- с 13 по 19 мая 2014 г. (за 4–9 дней до землетрясения) рост значений температур (SST и SAT) на 7–11°C, с 13 по 18 мая рост уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 42 Вт/м², а с 15 по 18 мая понижение относительной влажности (RHS) на 13%;

- с 19 по 21 мая 2014 г. (за 1–3 дня до землетрясения) понижение значений температур (SST и SAT) на 5–8°C, а с 18 по 22 мая снижение значений уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 9 Вт/м² и повышение значений относительной влажности (RHS) на 18%.

Землетрясение с магнитудой $M = 5.1$ произошло 31 августа 2021 г. в 24 километрах от села Улюнхан (рис. 1). На рис. 2, б представлены результаты исследования изменений значимых параметров тепловых полей в период подготовки и протекания этого сейсмического события.

Анализ изменений значений исследуемых параметров тепловых полей, приведенных на рис. 2, б, позволил обнаружить следующие их особенности для этого сейсмического события:

- с 13 по 16 августа 2021 г. (за 15–18 дней до землетрясения) аномально высокие значения температур (SST, SAT) до 12°C и уходящего длинноволнового излучения (OLR) до 261 Вт/м², значения которых превышали интервал среднеквадратического отклонения;

- 16–18 августа 2021 г. (за 12–15 дней до землетрясения) наблюдалось сильное падение значений уходящего длинноволнового излучения (OLR)

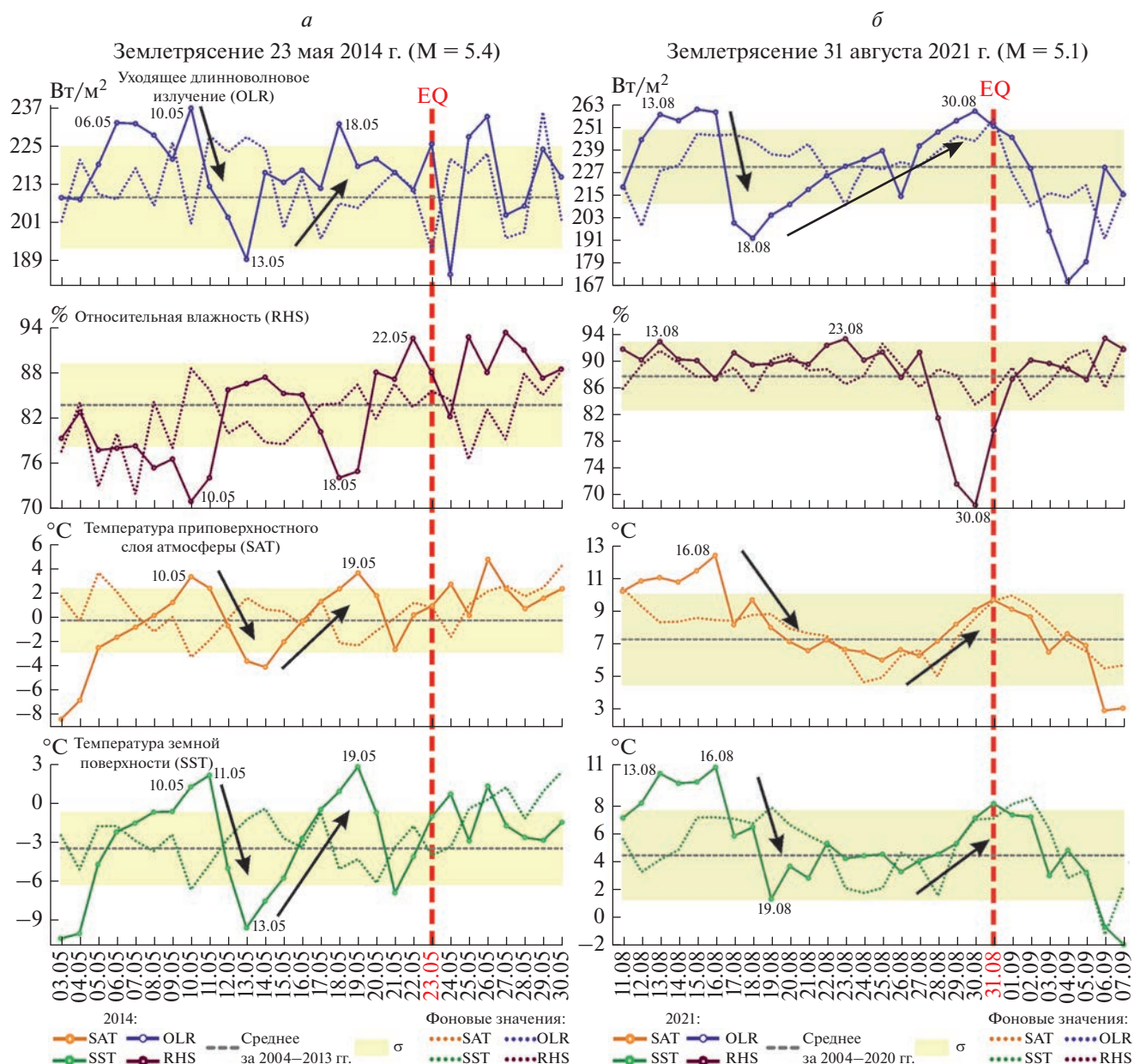


Рис. 2. Изменения значений исследуемых параметров тепловых полей в процессе подготовки и протекания землетрясений, произошедших в районе Байкальской рифтовой зоны: *а* – 23 мая 2014 г. ($M = 5.4$); *б* – 31 августа 2021 г. ($M = 5.1$).

на 69 Вт/м², а (с 16 по 19 августа 2021 г.) снижение значений температур (SST, SAT) на 5–9°C;

– с 18 по 30 августа 2021 г. (за 1–13 дней до землетрясения) была обнаружена тенденция к повышению значений OLR с 192 до 260 Вт/м² и небольшое падение этих значений 26 августа 2021 г. на 25 Вт/м²;

– с 27 по 31 августа 2021 г. (от 4 дней до землетрясения до самого землетрясения), выявлено повышение температур (SST, SAT) на 4–5°C

(рис. 2, *б*), которое сопровождалось резким падением относительной влажности (RHS) на 23%.

Анализ аномалий тепловых полей для землетрясений, произошедших 8 июня 2022 г. ($M = 5.2$) и 21 сентября 2020 г. ($M = 5.6$). Эпицентры этих землетрясений находились в юго-западной области оз. Байкал, на расстоянии 152 км друг от друга.

Землетрясение 8 июня 2022 г. произошло в акватории оз. Байкал (рис. 1). Его эпицентр находился в 17 км от поселка Большое Голоустное. Анализ изменений значений исследуемых пара-

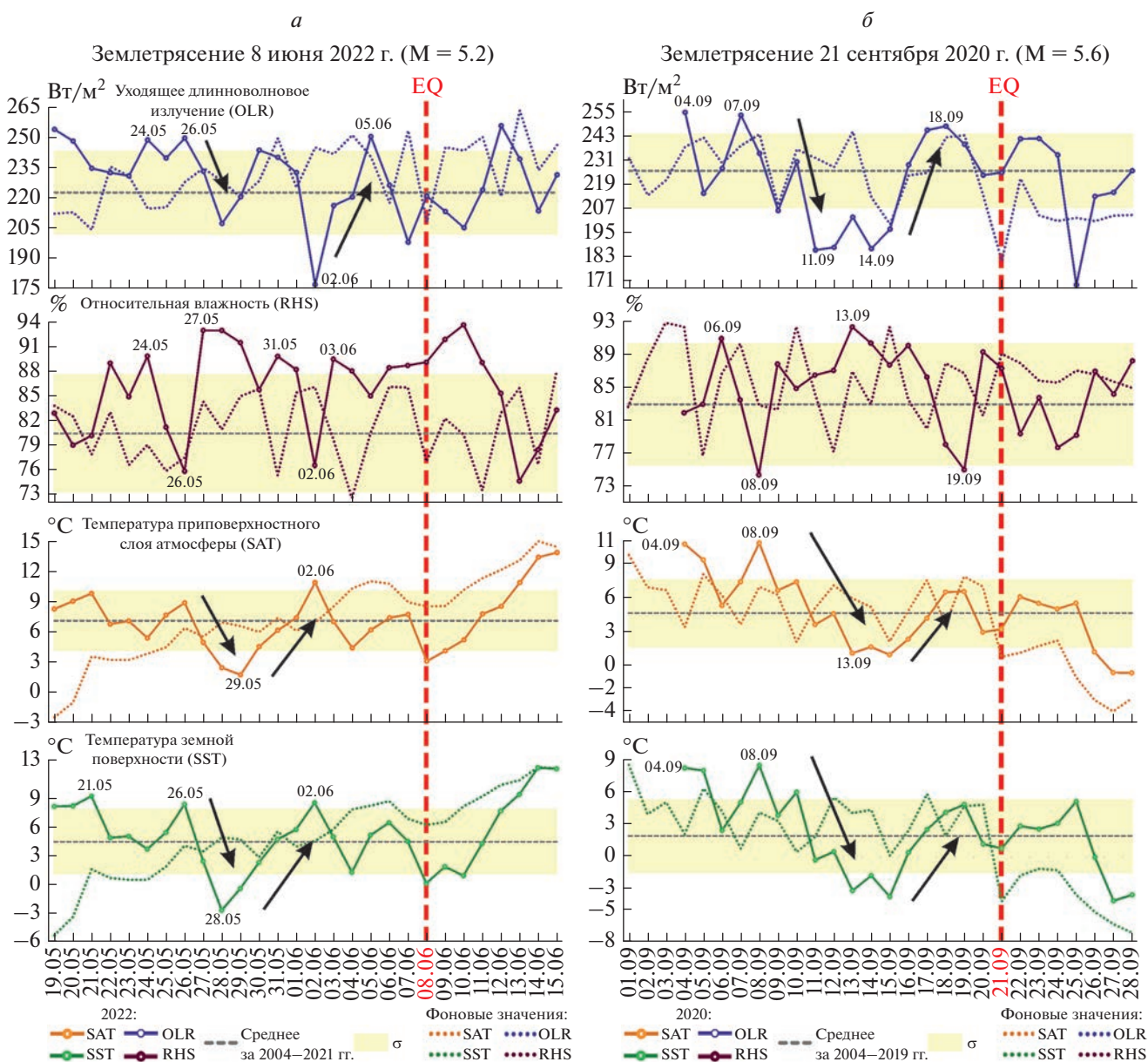


Рис. 3. Изменения значений исследуемых параметров тепловых полей до и во время землетрясений, произошедших в районе Байкальской рифтовой зоны: а – 8 июня 2022 г. ($M = 5.2$); б – 21 сентября 2020 г. ($M = 5.6$).

метров тепловых полей, приведенных на рис. 3, а для этого сейсмического события, позволил обнаружить следующие особенности:

– 24 и 26 мая 2022 г. (за 13–15 дней до землетрясения) превышение значений уходящего длинноволнового излучения на 26 Вт/м², по сравнению с средними многолетними значениями (с 2004 г. по 2021 г.), превышающие среднеквадратическое отклонение;

– с 26 по 28 мая 2022 г. (за 11–13 дней до землетрясения) падение значений температур (SST и SAT) на 6–10°C и понижение OLR на 43 Вт/м², в

то время как значения относительной влажности повысились (RHS) на 18%;

– с 28 мая по 2 июня 2022 г. (за 6–11 дней до землетрясения) рост температур (SST и SAT) на 10–11°C, значительное понижение значений уходящего длинноволнового излучения (на 67 Вт/м²), а с 31 мая по 2 июня 2022 г. снижение относительной влажности (на 14%);

– с 2 до 4 июня 2022 г. (за 3–4 дня до землетрясения) противофазные изменения тепловых полей, когда значения температур (SST и SAT) снизились на 6–7°C, а значения уходящего длинноволнового излучения (OLR) повысились на 18 Вт/м².

волнового излучения с 2 по 5 июня 2022 г. повысились на 74 Вт/м^2 ;

– с 5 по 7 июня 2022 г. (за 1–3 дня до землетрясения) понижение уходящего длинноволнового излучения 53 Вт/м^2 , повышение значений относительной влажности на 5%, а с 6 по 8 июня 2022 г. понижение температур (SST и SAT) $4\text{--}6^\circ\text{C}$.

Быстринское землетрясение магнитудой $M = 5.6$ произошло 21 сентября 2020 г. (рис. 1) в 18:04 UTC (22 сентября в 2:04 по местному времени). Эпицентр землетрясения находится в 20 км к северо-западу от южной оконечности оз. Байкал в зоне Главного Саянского разлома.

Анализ изменений значений исследуемых параметров тепловых полей, приведенных на рис. 3, б для этого сейсмического события, позволил обнаружить следующие особенности:

– 4 и 7 сентября 2020 г. (за 14, 17 дней до землетрясения) аномальные значения уходящего длинноволнового излучения (до 254 Вт/м^2), в промежутке дат которых (с 4 по 5 сентября 2020 г.) происходило снижение значений OLR на 40 Вт/м^2 , а также уменьшение значений температур SST и SAT приблизительно на 5°C ;

– с 6 по 8 сентября 2020 г. (за 13–15 дней до землетрясения) рост значений температур SST и SAT на $5\text{--}6^\circ\text{C}$, которые выходили за пределы интервала среднеквадратического отклонения, а также рост уходящего длинноволнового излучения повысились на 46 Вт/м^2 и снижение значения относительной влажности (RHS) на 16%;

– с 8 по 15 сентября 2020 г. (за 6–13 дней до землетрясения) происходили общие снижения значений температур SST и SAT на $10\text{--}11^\circ\text{C}$ и уходящего длинноволнового излучения OLR на 68 Вт/м^2 (с 7 по 13 сентября 2020 г.), которые сопровождалось повышением относительной влажности на 18%;

– с 15 по 19 сентября 2020 г. (за 2–6 дней до землетрясения) рост значений температур SST и SAT на $6\text{--}7^\circ\text{C}$, понижение влажности RHS на 24% при росте значений уходящего длинноволнового излучения OLR на 61 Вт/м^2 , которое происходило с 14 по 19 сентября 2020 г.

Анализ аномалий тепловых полей для землетрясений, произошедших 20 мая 2008 г. ($M = 5.3$) и 16.07.2011 г. ($M = 5.3$). Эпицентры этих землетрясений располагались на небольшом расстоянии (47 км) друг от друга (см. рис. 1).

Землетрясение с магнитудой $M = 5.3$ произошло 20 мая 2008 г. на юго-восточном борту оз. Байкал вблизи мыса Крестовый (рис. 1). По ближайшему населенному пункту землетрясение названо Максимихинским (Гилёва и др., 2014).

Анализ изменений значений исследуемых параметров тепловых полей, приведенных на рис. 4,

а для этого сейсмического события, позволил выявить следующие особенности:

– с 30 апреля по 10 мая 2008 г. (за 11–20 дней до сейсмического события) были обнаружены аномально низкие значения температур земной поверхности ($-4\text{...}-7^\circ\text{C}$) и приповерхностного слоя атмосферы ($-4\text{...}-7^\circ\text{C}$), выходящие за пределы нижней границы интервала среднеквадратического отклонения данных;

– с 4 по 5 мая 2008 г. (за 15–16 дней до землетрясения) наблюдалось резкое падение значений уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 45 Вт/м^2 , а также незначительное снижение относительной влажности;

– с 5 по 7 мая 2008 г. (за 13–15 дней до землетрясения) был зафиксирован рост значений уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 42 Вт/м^2 и значений относительной влажности на 11%;

– с 7 по 12 мая 2008 г. (за 8–13 дней до землетрясения) было выявлено, что изменения значений температур (SST, SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR) находились в противофазе к вариациям относительной влажности (RHS), при этом происходил рост значений SST, SAT на $6\text{--}7^\circ\text{C}$, а OLR на 18 Вт/м^2 , а также снижение значений RHS на 21%;

– с 12 по 16 мая 2008 г. (за 4–8 дней до землетрясения) происходило общее падение значений температур SST, SAT на $5\text{--}6^\circ\text{C}$, рост значений относительной влажности RHS на 23%, резкое снижение значений OLR, происходившее 12 и 13 мая и последующий рост OLR на 40 Вт/м^2 , происходивший 13–14 мая 2008 г.;

– с 16 по 19 мая 2008 г. (за 1–4 дня до землетрясения) происходило повышение температур SST, SAT на $6\text{--}7^\circ\text{C}$, аномальное падение значений уходящего длинноволнового излучения на 59 Вт/м^2 , в то же время с 16 по 18 мая 2008 г. было зафиксировано падение значений относительной влажности на 22% (рис. 4, а);

Рассматривая Максимихинское землетрясение, нельзя не отметить, что район Среднего Байкала, где в 2008 г. произошло данное событие, традиционно считается высокосейсмичным (Гилёва и др., 2014). В пределах акватории оз. Байкал наблюдается повышенная концентрация эпицентров землетрясений, в то время как в его горном обрамлении сейсмическая активность резко падает. Исключением можно считать Туркинское землетрясение с $M = 5.3$, произошедшее 16 июля 2011 г. (рис. 1), в горных отрогах хребта Улан-Бургасы (Мельникова и др., 2013). Очаг землетрясения находился на территории Республики Бурятия на глубине 15 км, в 67 км к юго-западу от Усть-Баргузина. До главного сейсмического события были зафиксированы форшоки с магнитудами, не превышающими 3 (<http://www.gsras.ru/>).

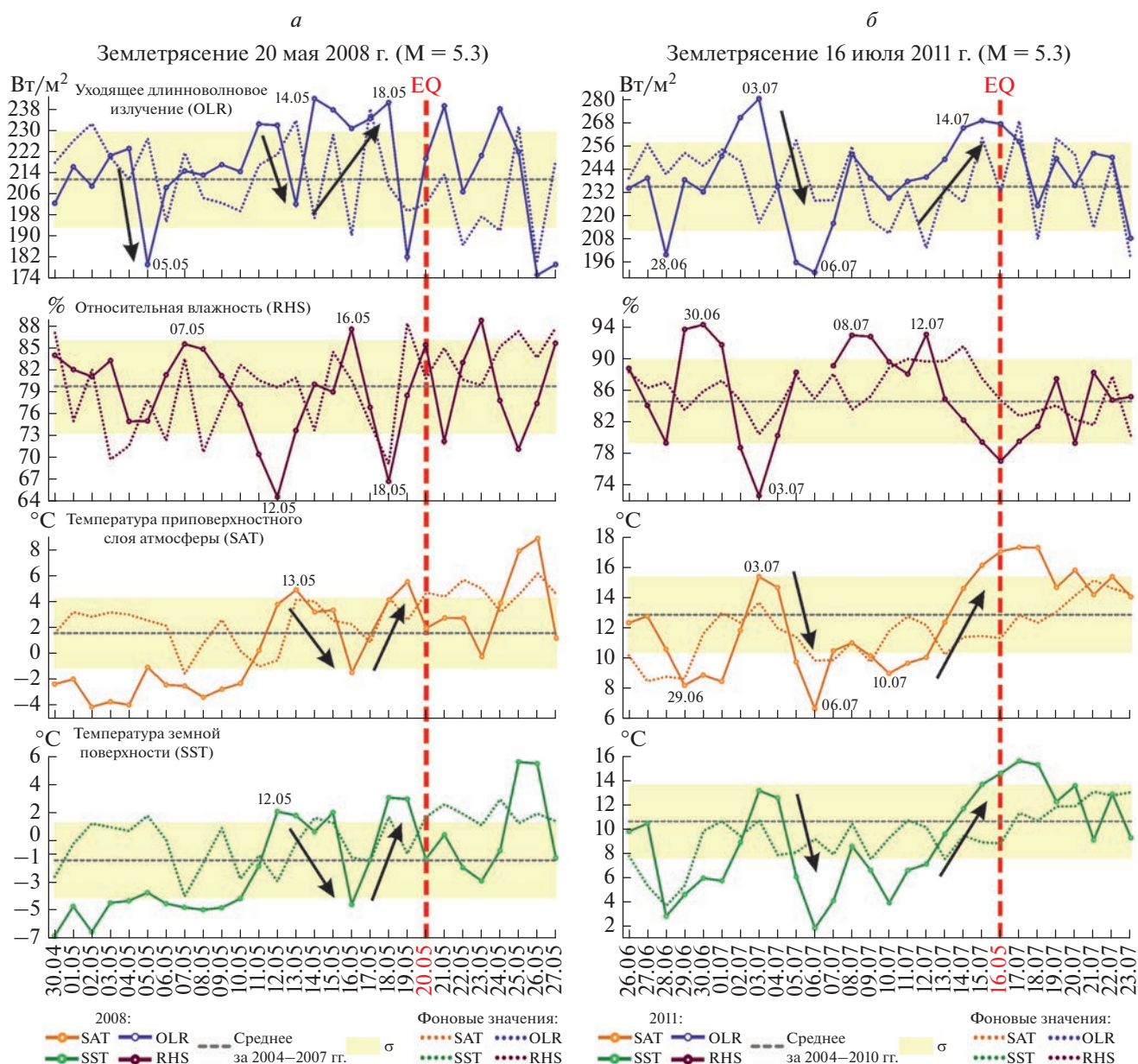


Рис. 4. Изменения значений исследуемых параметров тепловых полей до и во время землетрясений, произошедших в районе Байкальской рифтовой зоны: *а* – 20 мая 2008 г. ($M = 5.2$); *б* – 16 июля 2011 г. ($M = 5.6$).

Анализ изменений значений исследуемых параметров тепловых полей в процессе подготовки и протекания Туркинского землетрясения, приведенных на рис. 4, *б*, позволил выявить следующие особенности:

– с 26 по 28 июня 2011 г. (за 18–20 дней до землетрясения) происходило понижение всех исследуемых параметров, при котором значения температур (SST, SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR), выходили за пределы нижней границы интервала среднеквадратического отклонения;

– с 28–29 июня по 3 июля 2011 г. (за 13–17, 18 дней до землетрясения) происходил рост температур (SST, SAT) на 7–11°C и уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 81 Вт/м², в то время как относительная влажность (RHS) понижалась на 22%;

– с 3 по 6 июля 2011 г. (за 10–13 дней до землетрясения) происходили аномальные понижения температур (SST, SAT) на 9–12°C и уходящего длинноволнового излучения (OLR) на 90 Вт/м² с одновременным повышением относительной влажности (RHS) на 16%;

– с 6 по 8 июля 2011 г. (за 8–10 дней до землетрясения) происходило повышение значений всех исследуемых параметров SST, SAT на 5–7°C, OLR на 60 Вт/м², а RHS на ~6%;

– с 8 по 10 июля 2011 г. (за 6–8 дней до землетрясения) происходило незначительное снижение всех исследуемых параметров;

– с 10 по 16 июля 2011 г., (от 6 дней до землетрясения до самого землетрясения) происходило повышение значений температур SST и SAT на 9–12°C, уходящего длинноволнового излучения OLR на 41 Вт/м², а также понижение значений RHS на 17%.

Анализ пространственных распределений нормализованных значений тепловых полей для землетрясений, произошедших 20 мая 2008 г. (M = 5.3) и 16 июля 2011 г. (M = 5.3). Оценка механизмов очагов Максимихинского (20 мая 2008 г.) и Туркинского (16 июля 2011 г.) землетрясений, проведенная в работе (Мельникова и др., 2013), показала, что первое сейсмическое событие произошло в обстановке сдвига с небольшой сбросовой компонентой. Землетрясения с подобными фокальными механизмами широко распространены в локальных сейсмоактивных районах рифтовой зоны. Очаг Туркинского землетрясения сформировался в обстановке практически чистого растяжения, хотя находился он в горном массиве.

Для более детального анализа пространственных распределений тепловых полей были выбраны землетрясения, произошедшие 20 мая 2008 г. (M = 5.2) и 16 июля 2011 г. (M = 5.6), эпицентры которых располагались в непосредственной близости друг от друга (47 км). Исследования вариаций пространственных распределений значимых параметров тепловых полей, зарегистрированных из космоса в периоды подготовки этих сейсмических событий, были проведены с использованием функции нормализации этих параметров для выявления их аномалий в период подготовки сейсмических событий (см. рис. 5 и 6).

Пространственные распределения аномальных изменений нормализованных величин исследуемых значимых параметров тепловых полей (OLR, SAT и SST) для Максимихинского землетрясения (20 мая 2008 г., M = 5.2), приведены на рис. 5, а, 5, б, 5, в. Анализ пространственных распределений параметров тепловых полей, представленных на этих рисунках, позволил выявить положительные аномалии их нормализованных индексов. При этом, как следует из анализа рис. 5, а, 3 мая 2008 г. были обнаружены аномалии уходящего длинноволнового излучения OLR (значения нормализованного индекса доходили до $N_i = 2.1$), располагавшиеся в северной и южной частях исследуемой области. В дни 12, 15 и 18 мая 2008 г. наиболее интенсивные положительные аномалии уходящего длинноволно-

вого излучения ($N_i = 2.5$) были обнаружены в эпицентральной области готовящегося землетрясения (см. рис. 5, а).

Практически в эти же дни 13, 14, 18 мая 2008 г. были зафиксированы аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT) (см. рис. 5, б), а 12, 13 и 18 мая 2008 г. были зафиксированы аномалии температуры земной поверхности (SST) (см. рис. 5, в), которые располагались в эпицентральной области исследуемого землетрясения, над активными тектоническими разломами (рис. 1). Максимально высокие значения нормализованных индексов для температуры земной поверхности были зафиксированы 12 мая 2008 г., которые доходили до $N_i = 1.5$ (см. рис. 5, в), а для температуры приповерхностного слоя атмосферы были обнаружены 13 мая и доходили до $N_i = 1.8$ (см. рис. 5, б). В дни 13, 18 мая (рис. 5, в) и 14, 18 мая (рис. 5, б) интенсивность аномалий этих температур снизилась и не превышала максимальные значения.

Пространственные распределения аномальных изменений нормализованных величин исследуемых значимых параметров тепловых полей (OLR, SAT и SST), зарегистрированных из космоса в период подготовки Туркинского землетрясения, произошедшего 16 июля 2011 г. с M = 5.3, приведены на рис. 6, а, 6, б, 6, в.

Из анализа рис. 6, а следует, что за 13 дней до главного землетрясения (3 июля 2011 г.) была обнаружена аномалия уходящего длинноволнового излучения в эпицентральной области готовящегося сейсмического события, а также южнее, над зоной активных тектонических разломов. Значения нормализованного индекса для уходящего длинноволнового излучения (OLR) в этот день доходили до максимальных ($N_i = 2$).

Из анализа рис. 6, б, 6, в следует, что в этот же день 3 июля 2011 г. были выявлены аномалии нормализованных индексов для температур земной поверхности (до $N_i = 0.8$) и приповерхностного слоя атмосферы (до $N_i = 0.9$), располагавшиеся на удалении до 300 км от эпицентральной области готовящегося землетрясения. Выявленные аномалии могут быть связаны с происходившей серией толчков вдоль оз. Байкал, которые регистрировали сейсмостанции в области исследования с 4 по 15 июля 2011 г. (<http://eqru.gsras.ru/>; Мельникова и др., 2013).

4 июля 2011 г. аномалии нормализованных индексов для температуры земной поверхности (до $N_i = 1$) были обнаружены на северо-востоке и на юге от эпицентра готовящегося землетрясения (см. рис. 6, в). Расположение этих аномалий подобны тем, которые были обнаружены 3 мая 2008 г. для уходящего длинноволнового излучения, перед землетрясением, состоявшемся 20 мая 2008 г. (рис. 5, а).

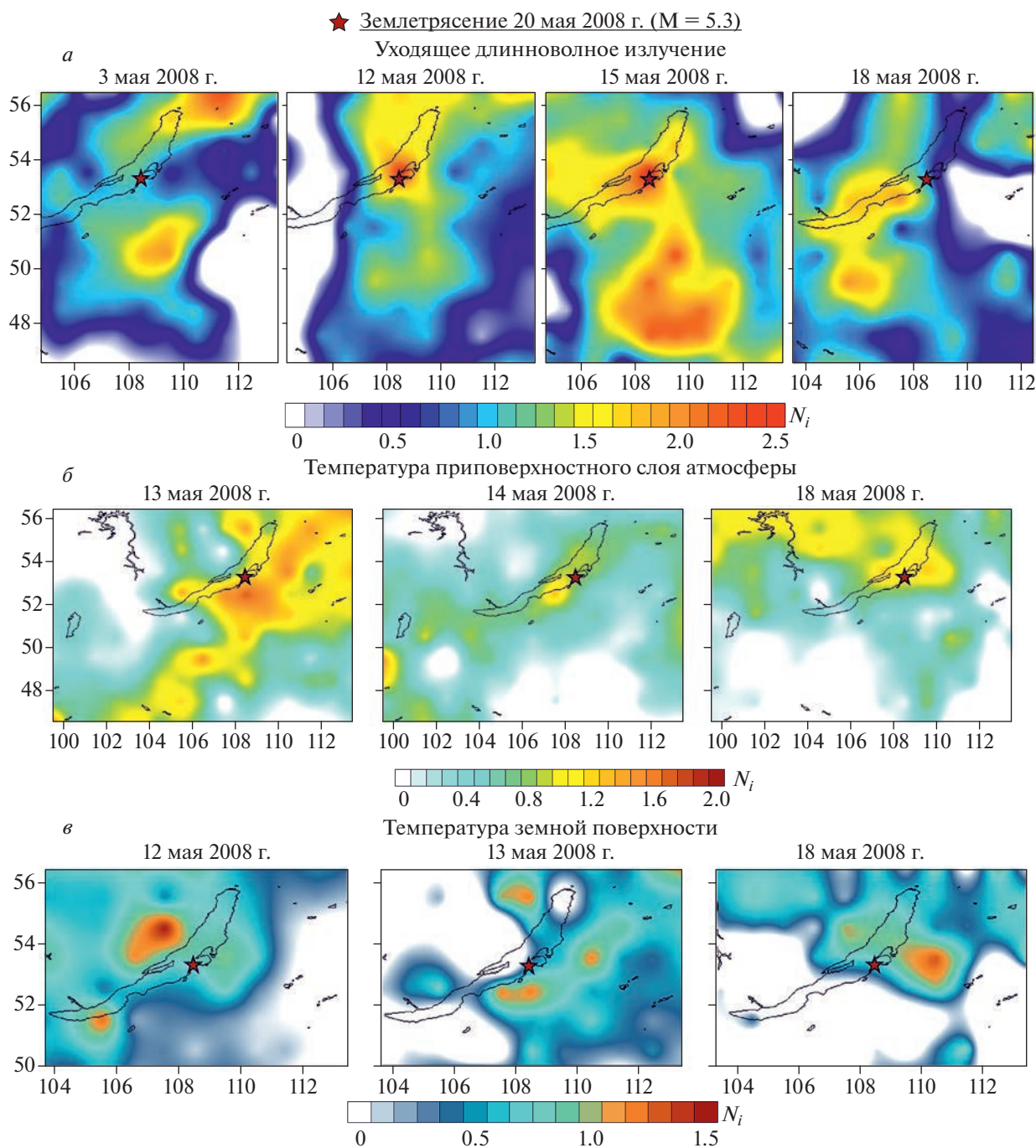


Рис. 5. Пространственные распределения аномалии значимых параметров тепловых полей, зарегистрированных из космоса в период подготовки землетрясения, происходившего 20 мая 2008 г. ($M = 5.3$): *a* – уходящего длинноволнового излучения (OLR); *б* – температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT); *в* – температуры земной поверхности (SST).

Анализ рис. 6, *a*, *б*, *в*, показал, что за день до землетрясения, произошедшего 16 июля 2011 г. были выявлены аномалии нормализованных индексов для всех трех исследуемых значимых параметров тепловых полей: температуры земной по-

верхности (до $N_i = 1$), температуры приповерхностного слоя атмосферы (до $N_i = 0.9$) и уходящего длинноволнового излучения (до $N_i = 2$).

Аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы были выявлены также и 16 июля

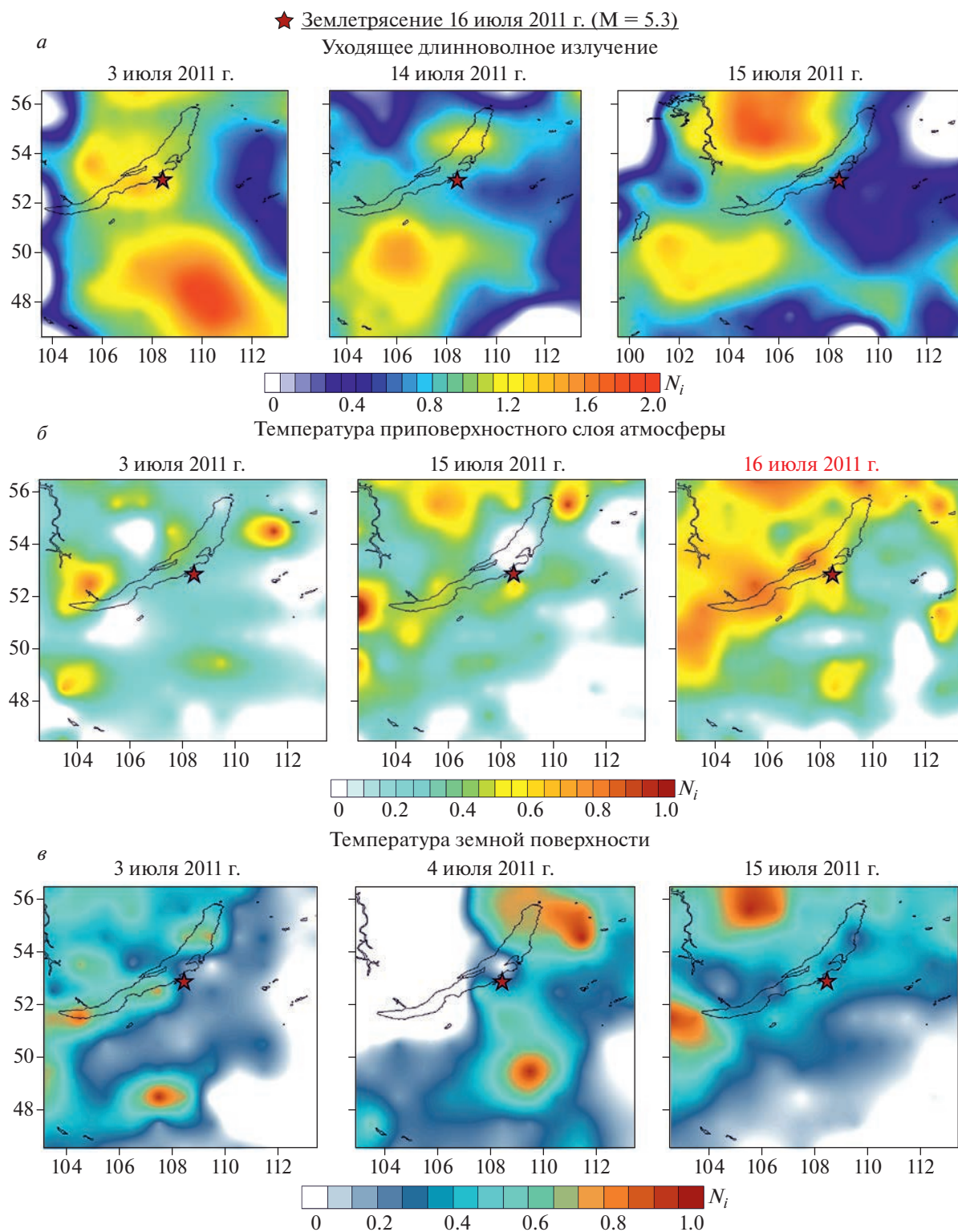


Рис. 6. Пространственные распределения аномалии значимых параметров тепловых полей, зарегистрированных из космоса в период подготовки землетрясения, происходившего 16 июля 2011 г.: *a* – уходящего длинноволнового излучения (OLR); *б* – температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT); *в* – температуры земной поверхности (SST).

2011 г в день свершившегося землетрясения (см. рис. 5, б), когда значения нормализованного индекса этого параметра достигали максимальных значений ($N_i = 1$). Расположение этих аномалий практически совпадало с областями, где регистрировались афтершоки, последовавшие после главного землетрясения (<http://eqru.gsras.ru/>; Мельникова и др., 2013).

Проведенные исследования вариаций значимых параметров тепловых полей, зарегистрированных из космоса в период подготовки землетрясений, произошедших на территории Байкальской рифтовой зоны с 2008 по 2022 г. с магнитудами 5.1–5.6, позволили выявить временную последовательность появления аномалий тепловых полей. Некоторые различия в сценариях проявления аномалий тепловых полей вероятно связаны, в том числе, и с геолого-структурными особенностями районов, где происходили проанализированные сейсмические события.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе с использованием долговременных рядов спутниковых данных проанализированы аномалии тепловых полей в периоды подготовки и протекания сильных землетрясений, происходивших 20 мая 2008 г., 16 июля 2011 г., 23 мая 2014 г., 21 сентября 2020 г., 31 августа 2021 г. и 8 июня 2022 г. с магнитудами 5.1–5.6 на территории Байкальской рифтовой зоны.

В периоды подготовки этих землетрясений выявлен интенсивный характер изменений температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволновое излучение (OLR), а также относительной влажности (RHS) с резкими перепадами значений этих параметров, по сравнению с фоновыми (в периоды без заметных сейсмических событий, которые практически не выходили за пределы интервала стандартного отклонения данных).

Анализ изменчивости исследуемых параметров позволил выявить характер их аномальных изменений перед землетрясениями, происходившими на территории Байкальской рифтовой зоны. Показано, что первые проявления аномалий значимых параметров тепловых полей относительно средних многолетних значений (начиная с 2004 г.) были зарегистрированы по спутниковым данным:

- для уходящего длинноволнового излучения за 13–18 дней до проанализированных сейсмических событий (рост на величину $\sim 30 \text{ Вт/м}^2$);

- для полей температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы за 12–15 дней до землетрясений (возрастание на величины $\sim 3\text{--}7^\circ\text{C}$);

- для относительной влажности за 10–16 дней до этих землетрясений (рост на величину $\sim 6\text{--}13\%$).

По результатам проведенного анализа изменений характеристик тепловых полей и относительной влажности, зарегистрированных из космоса в период подготовки и протекания сейсмических событий, произошедших в районе Байкальской рифтовой зоны, была выявлена отрицательная корреляционная связь между температурой приповерхностного слоя атмосферы и относительной влажностью (коэффициент корреляции до -0.75). Это подтверждается и результатами, полученными в работах (Prasad et al., 2005; Pulinet et al., 2006; Бондур и др., 2023).

С приближением момента сейсмического удара атмосферные процессы сопровождались противофазными колебаниями (коэффициент корреляции до -0.4) между значениями уходящего длинноволнового излучения и относительной влажностью. Влияние относительной влажности на поток уходящего длинноволнового излучения подтверждается и результатами исследований, изложенными в работах (Ruzmaikin et al. 2014; Бондур и др., 2023).

Более детальный анализ пространственных распределений тепловых полей для землетрясений, произошедших 20 мая 2008 г. ($M = 5.3$) и 16 июля 2011 г. ($M = 5.3$) позволил обнаружить положительные аномалии значений нормализованного индекса, располагающиеся в эпицентральной области готовящегося сейсмического события. Максимальные превышения нормализованных значений тепловых полей были выявлены за 7–8 дней до землетрясения 20 мая 2008 г. ($M = 5.3$), а также за 12–13 дней до сейсмического события, произошедшего 16 июля 2011 г. ($M = 5.3$).

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования космических данных для регистрации аномальных изменений тепловых полей, связанных с активизацией сейсмической деятельности.

Выявленные аномальные вариации тепловых полей в периоды подготовки и протекания сильных землетрясений с магнитудами более 5, происходивших на территории Байкальской рифтовой зоны с 2008 по 2022 гг., могут быть использованы для поиска предвестников таких сейсмических событий, а также при космическом мониторинге сейсмоопасных территорий для предупреждения этих опасных природных процессов.

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., Воронова О.С. Регистрация из космоса аномальных вариаций тепловых полей при сейсмических событиях на территории Северного Кавказа с 2017 по 2022 гг. // *Исслед. Земли из космоса*. 2022. № 6. С. 13–26.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422060021>
- 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>
- 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*. 2016а. № 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 // *Доклады академии наук*. 2016б. Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // *Докл. АН*. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномальных вариаций различных геофизических полей по космическим данным при подготовке землетрясения в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$) // *Исслед. Земли из космоса*. 2022. № 5. С. 3–19.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422050049>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С., Гапонова М.В., Феоктистова Н.В., Зима А.Л. Регистрация из космоса аномалий различных геофизических полей при подготовке разрушительных землетрясений в Турции в феврале 2023 г. // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 4. С. 3–25.
<https://doi.org/10.31857/S0205961423340018>
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиointерферометрии // *Докл. Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 499. № 2. С. 144–150.
<https://doi.org/10.31857/S268673972108003X>
- Гапонова Е.В., Зверев А.Т., Цидилина М.Н. Выявление аномалий линеаментных систем по космическим изображениям во время сильных землетрясений в Калифорнии с магнитудами 6.4 и 7.1 // *Исслед. Земли из космоса*. 2019. № 6. С. 36–47.
- Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с $KP = 14.3$, $M_w = 5.3$, $I_0 = 7$ (Центральный Байкал) // *Землетрясения Северной Евразии*, 2008 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 337–345.
- Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б. Муяканское-II землетрясение 23 мая 2014 г. с $KP = 14.3$, $M_w = 5.5$, $I_0 = 7-8$ (Северное Прибайкалье) // *Землетрясения Северной Евразии*. Вып. 23 (2014 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 323–333.
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.33>
- Гладков А.А., Лунина О.В. Разработка интерактивной информационной системы для построения моделей композитных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 9. С. 17–24.
- Гладков А.А., Лунина О.В., Андреев А.В. Некоторые аспекты разработки информационной системы для интегрирования данных по активной тектонике // *Геоинформатика*. 2013. № 4. С. 6–14.
- Жуков Б.С., Халле В., Шлотцхауэр 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.
- Имашев С.А., Свердлик Л.Г. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. *Наука, новые технологии и инновации*, 2015, 1, 15–19.
- Кашкин В.Б., Романов А.А., Григорьев А.С., Баскова А.А. Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников Земли. *Журн. СФУ. Техника и технологии*, 2012, 5(2), 220–228.
- Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // *Геология и геофизика*. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.
- Мац В.Д., Гранина Л.З., Ефимова И.М. Байкальский рифт: на пути к океану / В.Д. Мац, Л.З. Гранина, И.М. Ефимова // *Природа: ежемесячный естественнонаучный журн*. 2014. № 2. С. 28–38.
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А. Особенности сейсмических активизаций среднего Байкала в 2008–2011 гг. // *Докл. АН*. 2013. Т. 453. № 6. С. 680–685.
<https://doi.org/10.7868/S086956521336019X>
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_w = 6.3$, $I_0 = 8-9$ (Южный Байкал) // *Землетрясения Северной Евразии* в 2008 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 386–407.
- 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. // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.
- Середкина А.И. Современное состояние исследований глубинного строения земной коры и мантии Байкальского рифта по сейсмологическим данным // *Физика*

- Земли. 2021. № 2. С. 46–70.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721020113>
- 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 исследования. 2018. Т. 56. № 4. С. 21–30.
<https://doi.org/10.31857/S002342060000347-9>
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р., Санжиева Д.П.-Д., Радзиминович Н.А., Базаров А.Д. Результаты и перспективы сейсмологических наблюдений в центральной части Байкальского рифта // Российский сейсмологический журн. 2021. Т. 3. № 4. С. 38–57.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.03>
- Akhoondzadeh M., Marchetti D. Study of the Preparation Phase of Turkey's Powerful Earthquake (6 February 2023) by a Geophysical MultiParametric Fuzzy Inference System. Remote Sens. 2023. V. 15. P. 2224.
<https://doi.org/10.3390/rs15092224>
- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G. (2023). Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone. Seismica, 2(3).
<https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.502>
- Buslov M.M. (2012) Geodynamic nature of the Baikal Rift Zone and its sedimentary filling in the Cretaceous–Cenozoic: the effect of the far-range impact of the Mongolo-Okhotsk and Indo-Eurasian collisions. Russ Geol Geophys 53:955–962.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.07.010>
- Chen Y.-I., Huang C.-S., Liu J.-Y. Statistical Evidences of Seismo-Ionospheric Precursors Applying Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve on the GPS Total Electron Content in China. J. Asian Earth Sci. 2015, 114, 393–402.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.028>
- De Santis A., Marchetti D., Pavón-Carrasco F.J., Cianchini G., Perrone L., Abbattista C., Alfonsi L., Campuzano S.A., Carbone M. et al. Precursory Worldwide Signatures of Earthquake Occurrences on Swarm Satellite Data. Sci. Rep. 2019, 9, 20287.
<https://doi.org/10.3390/atmos10070371>
- Elshin O., Tronin A. (2020) Global Earthquake Prediction Systems. Open J. Earthquake Research, 9, 170–180.
<https://doi.org/10.4236/ojer.2020.92010>
- Genzano N., Filizzola C., Hattori K., Pergola N., Tramutoli V. Statistical Correlation Analysis between Thermal Infrared Anomalies Observed From MTSATs and Large Earthquakes Occurred in Japan (2005–2015). J. Geophys. Res. Solid Earth 2021, 126, e2020JB020108.
<https://doi.org/10.1029/2020JB020108>
- Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Kossobokov V.G., Rotvain I.M. Intermediate term prediction in advance of the Loma Prieta earthquake // Geophys. Res. Letters. 1990. V. 17. № 9. P. 1461–1464.
- Marchetti D., De Santis A., Campuzano S.A., Zhu K., Soldani M., D'Arcangelo S., Orlando M., Wang T., Cianchini G., Di Mauro D. et al. Worldwide Statistical Correlation of Eight Years of Swarm Satellite Data with M5.5+ Earthquakes: New Hints about the Preseismic Phenomena from Space. Remote Sens. 2022, 14, 2649.
<https://doi.org/10.3390/rs14112649>
- 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.
- Pavlidou E., van der Meijde M., van der Werff H., Hecker, C. (2018). Time Series Analysis of Land Surface Temperatures in 20 Earthquake Cases Worldwide. Remote Sensing, 11(1), 61.
<https://doi.org/10.3390/rs11010061>
- Petit C., Déverchère J. (2006) Structure and evolution of the Baikal rift: a synthesis. Geochem Geophys Geosyst 7: Q11016.
<https://doi.org/10.1029/2006GC001265>
- Prasad B.S.N., Nagaraja K., Chandrashekara M.S., Paramesh L., Madhava M.S. (2005). Diurnal and seasonal variations of radioactivity and electrical conductivity near the surface for a continental location Mysore, India. Atmospheric Research, 76(1–4). 65–77.
- 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.A., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V., Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere System, Geomagnetism and Aeronomy, 55. № 4, 540–558, 2015.
- Radziminovich Y.B., Gileva N.A., Tubanov T.A., Lukhneva O.F., Novopashina A.V., Tsydypova L.R., The December 9, 2020, Mw 5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): Internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis, Bull. Earthquake Eng., 2022. V. 20. № 3. P. 1297–1324.
<https://doi.org/10.1007/s10518-021-01305-8>
- Ruzmaikin A., Aumann H. H., AND Manning E. M. Relative Humidity in the Troposphere with AIRS // J. atmospheric sciences. 2014. 2516–2533.
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0363.1>
- San'kov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V. (2011) Late Cenozoic geodynamics and mechanical coupling of crustal and upper mantle deformations in the Mongolia-Siberia mobile area. Geotectonics 45: 378–393.
<https://doi.org/10.1134/S0016852111050049>
- 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>
- Susskind J., Barnet C.D., Blaisdell J.M. (2003). Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2), 390–409.
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.808236>
- Tronin A.A. Thermal satellite data for earthquake research. IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120).
<https://doi.org/10.1109/igarss.2000.859687>

Anomalies of Thermal Fields Revealed by Satellite Data during Preparation and Occurrence of Strong Earthquakes in the Region of the Baikal Rift Zone in 2008–2022

V. G. Bondur¹ and O. S. Voronova¹

¹*Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow, Russia*

Long-term changes in thermal fields were studied before and during strong earthquakes with magnitudes from 5.1 to 5.6 that occurred in the region of the Baikal rift zone in 2008–2022. Satellite data were used for these studies. For the analysis we used the values of land surface temperature, temperature of the near-surface layer of the atmosphere, outgoing long-wave radiation, and relative humidity recorded using the AIRS instrument mounted on the Aqua satellite. During the periods of preparation and occurrence of these seismic events, anomalous variations in the parameters of thermal fields registered with satellite were revealed. They exceeded the average long-term values: for land surface temperature and temperature of the near-surface layer of the atmosphere by 5–10%, for outgoing long-wave radiation by 11–15%, and for relative humidity by 6–10%. A strong negative correlation was found between changes in the temperature of the near-surface layer of the atmosphere and relative humidity (correlation coefficient of -0.75), as well as antiphase oscillations between the values of the outgoing long-wave radiation and relative humidity. The obtained results can be used for studies of the precursor variability of thermal fields during monitoring of seismic hazard zones.

Keywords: remote sensing, satellite data, natural disasters, earthquakes, thermal anomalies, Baikal rift zone

REFERENCES

- Akhoondzadeh M., Marchetti D. Study of the Preparation Phase of Turkey's Powerful Earthquake (6 February 2023) by a Geophysical MultiParametric Fuzzy Inference System. *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 2224. <https://doi.org/10.3390/rs15092224>
- 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>
- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G. (2023). Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone. *Seismica*, 2(3). <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.502>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S., Gaponova M.V., Feoktistova N.V., Zima A.L. Satellite Registration of Anomalies of Various Geophysical Fields during the Preparation of Destructive Earthquakes in Turkey in February 2023 // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2023. № 4, 3–25. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961423340018>
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 near Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*, 2021. V. 499. Part 2. P. 648–653. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21080031>
- Bondur V.G., Gaponova Ye.V. Remotely Registering Anomalous Variations in Lineament Systems of the Baikal Rift Zone during the M = 5.6 Earthquake of September 21, 2020 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 1012–1020. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090437>
- 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*. 2016b. V. 466. № 2, P. 183–186. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040381>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Connection between variations of the stress-strain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10010320>
- 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*. 2016a. V. 52. № 1. P. 117–128. <https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Combined Analysis of Anomalous Variations in Various Geophysical Fields during Preparation of the M5.6 Earthquake near Lake Baikal on September 22, 2020, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, V. 58. № 12. P. 1532–1545. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120052>
- 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., Voronova O.S., Feoktistova N.V.* A Study from Space of Anomalous Variations of Various Geophysical Fields during the Preparation of a Series of Strong Earthquakes in Italy in 2016–2017 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 12. P. 1590–1606.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821120057>
- Bondur V.G., Voronova O.S.* Detection from Space of Anomalous Variations in Thermal Fields during Seismic Events in the Northern Caucasus in 2017–2022. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 58, 1546–1556 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S0001433822120064>
- 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 ($M = 6.7$). *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 57, 991–1002 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>
- Buslov M.M.* (2012) Geodynamic nature of the Baikal Rift Zone and its sedimentary filling in the Cretaceous–Cenozoic: the effect of the far-range impact of the Mongolo–Okhotsk and Indo–Eurasian collisions. *Russ Geol Geophys* 53:955–962.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.07.010>
- Chen Y.-I., Huang C.-S., Liu J.-Y.* Statistical Evidences of Seismo-Ionospheric Precursors Applying Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve on the GPS Total Electron Content in China. *J. Asian Earth Sci.* 2015, 114, 393–402.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.028>
- De Santis A., Marchetti D., Pavón-Carrasco F.J., Cianchini G., Perrone L., Abbattista C., Alfonsi L., Amoroso L., Campuzano S.A., Carbone M. et al.* Precursory Worldwide Signatures of Earthquake Occurrences on Swarm Satellite Data. *Sci. Rep.* 2019, 9, 20287.
<https://doi.org/10.3390/atmos10070371>
- Elshin O., Tronin A.* (2020) Global Earthquake Prediction Systems. *Open J. Earthquake Research*, 9, 170–180.
<https://doi.org/10.4236/ojer.2020.92010>
- Gaponova E.V., Zverev A.T., Tsidilina M.N.* Detecting Lineament System Anomalies during Strong 6.4 and 7.1 Earthquakes in California from Satellite Imagery. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 56, 1062–1071 (2020).
<https://doi.org/10.1134/S000143382009011X>
- Genzano N., Filizzola C., Hattori K., Pergola N., Tramutoli V.* Statistical Correlation Analysis between Thermal Infrared Anomalies Observed From MTSATs and Large Earthquakes Occurred in Japan (2005–2015). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2021, 126, e2020JB020108.
<https://doi.org/10.1029/2020JB020108>
- Gileva N.A., Melnikova V.I., Serechkina A.I., Radziminovich Ya.B.* Muyakan-ii earthquake on MAY 23, 2014 with $K_p = 14.3$, $M_w = 5.5$, $I_0 = 7–8$ (Northern Baikal region). *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 323–333. (In Russian).
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.33>
- Gileva N.A., Melnikova V.I., Radziminovich Y.B., Serechkina A.I.* Maksimikha earthquake (Central Baikal) with $K_r = 14.3$, $M_w = 5.3$, $I_0 = 7$ on 20 May 2008 // *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii*, 2008 [Earthquakes of Northern Eurasia, 2008] Obninsk: GS RAN, 2014. P. 337–345. (In Russian).
- Gladkov A.A., Lunina O.V.* Development of an interactive information system for building models of composite seismogenic sources in the south of Eastern Siberia // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2014. № 9. P. 17–24. (In Russian).
- Gladkov A.A., Lunina O.V.* Web-oriented GIS “ActiveTectonics” as a data bank of information on active tectonics in the south of Eastern Siberia // *Sovremennyye metody otsenki seysmicheskoy opasnosti i prognoza zemletryaseni: tezisy dokladov II vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Modern methods for assessing seismic hazard and earthquake prediction: abstracts of the II All-Russian conference with international participation] 29–30 September 2021 Moscow: ITPZ RAN, 2021. P. 36–37. (In Russian).
- Gladkov A.A., Lunina O.V., Andreev A.V.* Some aspects of the development of an information system for the integration of data on active tectonics // *Geoinformatika* [Geoinformatics]. 2013. № 4. P. 6–14. (In Russian).
- Imashev S.A., Sverdlik L.G.* Atmospheric temperature variations during high seismic activity in Japan in 2011. *Nauka, novyye tekhnologii i innovatsii* [Science, New Technologies and Innovations], 2015, 1, P. 15–19. (In Russian).
- Kashkin V.B., Romanov A.A., Grigoriev A.S., Baskova A.A.* Troposphere Effects of Tuva Earthquakes Detected with Space Technology. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2012, 5(2), 220–228. (In Russian)
- Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Kossobokov V.G., Rotvain I.M.* Intermediate term prediction in advance of the Loma Prieta earthquake // *Geophys. Res. Letters*. 1990. V. 17. № 9. P. 1461–1464.
- Logachev N.A.* History and Geodynamics of the Baikal Rift // *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. 2003. V. 44. № 5. P. 391–406. (In Russian).
- Marchetti D., De Santis A., Campuzano S.A., Zhu K., Soldani M., D’Arcangelo S., Orlando M., Wang T., Cianchini G., Di Mauro D. et al.* Worldwide Statistical Correlation of Eight Years of Swarm Satellite Data with $M_{5.5+}$ Earthquakes: New Hints about the Preseismic Phenomena from Space. *Remote Sens.* 2022, 14, 2649.
<https://doi.org/10.3390/rs14112649>
- Mats V.D., Granina L.Z., Yefimova I.M.* Evolyutsiya kontinental’nogo rifta: ot prosto vpadiny do slozhnoy struktury okeanicheskogo dna [The evolution of the continental rift: from simple troughs to complex structures of the ocean floor] // *Priroda*. 2014. № 2. P. 28–38. (In Russian).
- Mel’nikova V.I., Gileva N.A., Imaev V.S., Radziminovich Ya.B., Tubanov Ts.A.* Features of Seismic Activation of the Middle Baikal Region, 2008–2011 // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 453. Part 2. P. 1282–1287.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X13120210>
- Mel’nikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Serechkina A.I.* Kultuk earthquake of August 27, 2008, $M_w = 6.3$, $I_0 = 8–9$ (Southern Baikal), *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii*, 2008 god (Earthquakes of the Northern Eur-asia in 2008), Obninsk: Geofiz. Sluzhba Ross. Akad. Nauk, 2014. P. 386–407. (In Russian).
- 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.
- Pavlidou E., van der Meijde M., van der Werff H., Hecker C.* (2018). Time Series Analysis of Land Surface Temperatures in 20 Earthquake Cases Worldwide. *Remote Sensing*, 11(1), 61.
<https://doi.org/10.3390/rs11010061>

- Petit C., Déverchère J.* (2006) Structure and evolution of the Baikal rift: a synthesis. *Geochem Geophys Geosyst* 7:Q11016. <https://doi.org/10.1029/2006GC001265>
- Prasad B.S.N., Nagaraja K., Chandrashekara M.S., Paramesh L., Madhava M.S.* (2005). Diurnal and seasonal variations of radioactivity and electrical conductivity near the surface for a continental location Mysore, India. *Atmospheric Research*, 76(1–4). 65–77.
- 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., 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>
- Radziminovich Y.B., Gileva N.A., Tubanov T.A., Lukhneva O.F., Novopashina A.V., Tsydypova, L.R.*, The December 9, 2020, Mw 5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): Internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis, *Bull. Earthquake Eng.*, 2022. V. 20. № 3. P. 1297–1324. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01305-8>
- Ruzmaikin A., Aumann H.H., AND Manning E. M.* Relative Humidity in the Troposphere with AIRS // *J. atmospheric sciences*. 2014. 2516–2533. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0363.1>
- San'kov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V.* (2011) Late Cenozoic geodynamics and mechanical coupling of crustal and upper mantle deformations in the Mongolia-Siberia mobile area. *Geotectonics* 45: 378–393. <https://doi.org/10.1134/S0016852111050049>
- 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>
- Seredkina A.I.* The State of the Art in Studying the Deep Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle beneath the Baikal Rift from Seismological Data. *Izv., Phys. Solid Earth* 57, 180–202 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1069351321020117>
- 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 zemletryaseniy i predvestniki* [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 2003. P. 270. (In Russian).
- Susskind J., Barnet C.D., Blaisdell J.M.* (2003). Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AM-SU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 390–409. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.808236>
- Tronin A.A.* Thermal satellite data for earthquake research. IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120). <https://doi.org/10.1109/igarss.2000.859687>
- Tubanov Ts.A., Predein P.A., Tsydypova L.R., Sanzhieva D.P.-D., Radziminovich N.A., Bazarov A.D.* (2021). [Results and prospects of seismological observations in the central part of the Baikal rift]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 38–57. (In Russian). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.03>
- 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).