Расчёт тепловых аномалий по данным Landsat на территории разработки месторождения алмазов им. Гриба (Архангельская область)

Е. В. Полякова, А. Л. Минеев, Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, И. Н. Болотова

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, 163020, Россия
E-mail: lenpo26@yandex.ru

Представлена методика расчёта тепловых аномалий на основе данных спутников Landsat с применением статистического метода стандартной оценки (*англ.* Z-Score) на территории разработки месторождения алмазов им. Гриба. Данный метод показывает, на сколько стандартных отклонений температура в данном пикселе смещается от среднего фонового значения, что позволяет перевести абсолютные значения температуры в универсальную шкалу статистической значимости. В результате обработки многолетних данных (2014–2023) выявлено, что устойчивые максимальные положительные тепловые аномалии пространственно приурочены к контуру самого карьера месторождения алмазов им. Гриба. Средние показатели характеризуют общий уровень теплового воздействия на всю буферную зону, а минимальные значения соответствуют наименее нагретым участкам, которые в отдельные годы могут демонстрировать отрицательные значения, что, вероятнее всего, связано с локальными особенностями снежного покрова и затенением рельефа. Таким образом, анализ данных о температуре земной поверхности подтвердил наличие устойчивых тепловых аномалий, связанных не только с естественными (природными) причинами, но и с горнодобывающей деятельностью. Предложенный в статье подход выделения статистически значимых тепловых аномалий методом стандартной Z-оценки ($Z > 2$) в сочетании с данными дистанционного зондирования (LST (*англ.* Land Surface Temperature) Landsat) может быть применён в качестве экспресс-метода оценки теплового режима других месторождений Архангельской алмазоносной провинции. Перспективным представляется совместный анализ спутниковых тепловых аномалий с наземными измерениями конвективного теплового потока и данными о выделении радона. Это позволит уточнить вклад эндогенных процессов в формирование температурного поля и повысить достоверность мониторинга геодинамической безопасности горнодобывающих районов Арктической зоны РФ.

Ключевые слова: тепловые аномалии, Landsat, конвективный тепловой поток, метод Z-Score, месторождение алмазов, Архангельская область

Одобрена к печати: 13.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-258-270

Введение

Температура земной поверхности LST (*англ.* Land Surface Temperature) формируется при тепловом взаимодействии с атмосферой и приходящей солнечной радиацией, а также с нижележащими горными породами и мантийным веществом. Подробно тепловой баланс Земли и образование теплового поля верхней части литосферы описано в работе (Хуторской, 1996). С тепловыми аномалиями связано большое количество объектов и явлений на земной поверхности как естественного, так и антропогенного происхождения. К естественным причинам проявления аномального температурного поля относятся зоны активной вулканической (Грищенко, Устюхина, 2019; Coppola et al., 2019), сейсмической (Бондур, Воронова, 2023; Тронин, 2005) и гидротермальной природной деятельности (Горный и др., 2016; Гурулев и др., 2024). То есть здесь наблюдается проявление эндогенного (внутреннего) тепла Земли на дневной поверхности, которое фиксируется радиометрической аппаратурой, установленной на ряде искусственных спутников Земли, с использованием теплового инфракрасного диапазона (длины волн — от 8 до 14 мкм). К антропогенным причинам возникновения тепловых аномалий на поверхности можно отнести городскую среду (Горный и др., 2022; Курлов и др.,

2025; Мамаш и др., 2022; Стручкова и др., 2023), объекты транспортной (Иванова, Балдина, 2018) и промышленной (Корниенко, 2020) инфраструктуры, лесные и торфяные пожары (Беляев и др., 2005; Лупян и др., 2021; Медведева и др., 2023) и пр.

В работе (Фазылов и др., 2026) отмечается, что разработка месторождений полезных ископаемых приводит к возникновению положительных и отрицательных температурных аномалий, определяемых геотермическими условиями самих районов расположения месторождений полезных ископаемых, а также природными температурными аномалиями, например, водоносными горизонтами термальных вод или вод с температурой более низкой, чем температура окружающих пород. В результате кондуктивного теплообмена вокруг территории разработки месторождения формируется температурное поле, обуславливающее различные температуры поверхностей обнажения выработок.

В Архангельской области в настоящее время карьерным способом разрабатываются три месторождения: одно — бокситов (Иксинское) и два — алмазов (им. Ломоносова и им. Гриба). Месторождение бокситов приурочено к юго-восточному склону Балтийского щита с маломощным осадочным чехлом и имеет осадочный генезис. Подток эндогенного тепла здесь маловероятен, учитывая условия формирования самого месторождения и нехарактерное для региона геологическое строение. Первое месторождение алмазов в Архангельской области было открыто в феврале 1980 г. (им. Ломоносова), а в 1996 г. — второе (им. Гриба). Месторождения приурочены к Зимнебережному району Архангельской алмазоносной провинции, которая представлена трубками, дайками и силлами кимберлитов, оливиновых мелилититов и толеитовых базальтов. Месторождение им. Ломоносова представляет собой куст трубок. Окружающее его пространство претерпело существенную антропогенную трансформацию, что усложняет заложение буферной зоны. В то же время месторождение им. Гриба представлено одной трубкой и оптимально подходит для расчёта тепловых аномалий в условиях проведения горнодобывающих работ.

Методологическая основа настоящего исследования базируется на современных возможностях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Использование данных спутниковой съёмки Landsat для оценки температурных аномалий доказало свою эффективность в многочисленных исследованиях. Как показано в работах (Weng et al., 2004; Zhao et al., 2019), данные о температуре земной поверхности LST позволяют надёжно выявлять тепловые аномалии техногенного и естественного происхождения.

Цель исследования заключается в анализе пространственно-временной динамики тепловых аномалий в окрестностях разработки месторождения алмазов им. Гриба. Для этого необходимо определить зоны устойчивых температурных аномалий (в данном случае методом стандартной оценки (Z-оценки, *англ.* Z-Score)), а также оценить межгодовую изменчивость теплового воздействия на близлежащие в окрестности карьера территории.

Объект исследования

Известно, что на 5–10 % территории Европейского Севера отмечается высокий конвективный тепловой поток, достигающий десятков Ватт на метр квадратны. Конвективный тепловой поток — это поток тепла, поступающий к земной поверхности при подъёме подземных флюидов по разломам земной коры (Горный, Теплякова, 2001). Величина этого потока зависит от строения земной коры — мощности осадочного чехла, наличия разломов, где проявляется неоднородность многих геофизических параметров (Горный и др., 1993).

В тектоническом отношении месторождение алмазов им. Гриба находится в зоне структурного сочленения Балтийского щита и Мезенской синеклизы. В геологическом разрезе района чётко обособляются два структурных этажа: архей-нижнепротерозойский кристаллический фундамент и фанерозойский осадочный чехол, сложенный карбонатно-терригенными осадками палеозоя и мезозоя и перекрытый четвертичными отложениями. Мощность осадочного чехла во впадинах кристаллического фундамента достигает 3–4 км, на выступах уменьшается до 0,5–1,2 км. Современный структурный план кристаллического основания

представляет собой чередование рифейских палеорифтовых грабенов и выступов (Пенделяк и др., 2014). В составе основных тектонических элементов выделяются Архангельский, Ручьёвский выступы, Полтинско-Ежугское поднятие и разделяющие их Керецкий и Лешуконский грабены (Березовский и др., 1993). Само месторождение локализуется в пределах Ручьёвского выступа кристаллического фундамента (Пенделяк и др., 2014) и располагается на периферии Зимнебережного тектонического узла (*рис. 1*), где отмечается зона повышенных значений конвективного теплового потока.

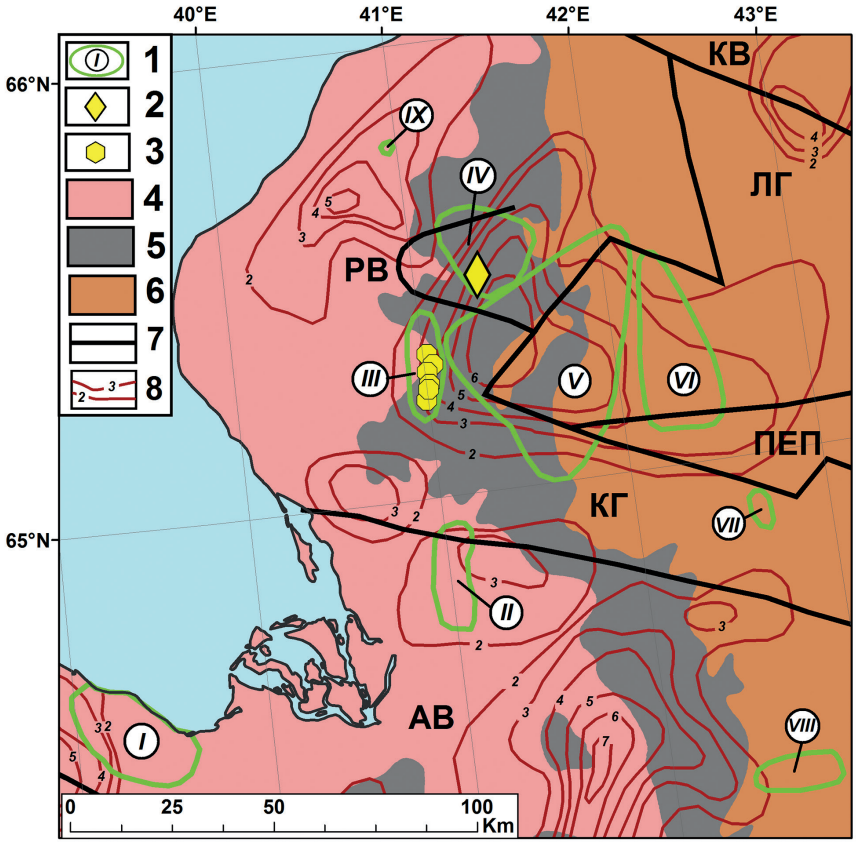


Рис. 1. Местоположение месторождения алмазов им. Гриба в составе Архангельской алмазоносной провинции: 1 — поля локализации щелочно-ультраосновных магматитов по работе (Гаранин и др., 2007): I — Ненокское, II — Чидвинское, III — Золотицкое, IV — Верхотинское, V — Кепинское, VI — Турьинское, VII — Полтинское, VIII — Пинежское, IX — Мельское; 2 — месторождение алмазов им. Гриба; 3 — трубки месторождения алмазов им. Ломоносова; 4–6 — отложения осадочного чехла: 4 — вендские, 5 — каменноугольные, 6 — пермские; 7 — основные структуры фундамента по публикации (Березовский и др., 1993): АВ — Архангельский выступ, КГ — Керецкий грабен, ПЕП — Полтинско-Ежугское поднятие, РВ — Ручьёвский выступ, ЛГ — Лешуконский грабен, КВ — Кулойский выступ; 8 — изолинии количества пересекающихся тектонических нарушений по исследованию (Кутинов, Чистова, 2004)

Под тектоническими узлами авторы подразумевают участки пересечения тектонических нарушений (двух и более). Методика построения тектонических узлов неоднократно приводилась авторами в научных публикациях, в частности в работах (Кутинов, 2005; Кутинов, Чистова, 2004). Следует отметить, что практически все трубки взрыва Архангельской алмазоносной провинции, не только алмазоносные, приурочены к локальным тектоническим узлам, которые являются каналами энерго-тепло-массопереноса (Кутинов, Чистова, 2004). Подток глубинных газов подтверждается пространственным распределением радионуклидов по контуру трубок взрыва (Киселев и др., 2016). Более подробно влияние узлов на природную среду, включая геологическую, рассмотрено в работах авторов (Кутинов и др., 2020, 2022).

Материалы и методика работ

В качестве первичных данных использовались стандартные продукты спутников Landsat-8 и Landsat-9 уровня обработки L2SP (*англ.* Level-2 Science Product), загруженные с портала Геологической службы США USGS (*англ.* United States Geological Survey) USGS EarthExplorer, за период с 2014 по 2023 г. (за исключением 2016 и 2019 гг., отсутствующих по технической причине). Для каждого года рассчитан медианный композит LST по всем снимкам марта, данные сведены в *табл. 1.*

Таблица 1. Используемые материалы

Год	Дата съёмки	Количество снимков	Год	Дата съёмки	Количество снимков
2014	02.03.2014	1	2020	04.03.2020	2
	09.03.2014	1		09.03.2020	1
	13.03.2014	2		20.03.2020	2
	18.03.2014	2		27.03.2020	2
	20.03.2014	2		29.03.2020	2
	25.03.2014	1			
	27.03.2014	2			
	29.03.2014	1			
2015	12.03.2015	1	2021	05.03.2021	2
	14.03.2015	1		07.03.2021	2
	16.03.2015	1		12.03.2021	1
	21.03.2015	2		14.03.2021	1
	23.03.2015	2		23.03.2021	2
2017	12.03.2017	2	2022	08.03.2022	2
	17.03.2017	1		10.03.2022	2
	28.03.2017	1		15.03.2022	1
				17.03.2022	2
				26.03.2022	1
				31.03.2022	1
2018	04.03.2018	1	2023	04.03.2023	2
	06.03.2018	2		06.03.2023	1
	08.03.2018	2		11.03.2023	2
	20.03.2018	1		18.03.2023	1
	22.03.2018	2		22.03.2023	2
	24.03.2018	2		27.03.2023	2
	29.03.2018	1		29.03.2023	2
	31.03.2018	2			

Медианный композит представляет собой объединение всех сцен коллекции, в котором результирующее значение пикселя вычисляется как медиана всех доступных наблюдений за заданный временной интервал. В дальнейших расчётах для выявления тепловых аномалий конкретного года использовался мартовский медианный композит этого года. Все проанализированные в исследовании сцены Landsat являются дневными (время съёмки 09:00–10:00 по местному времени).

Тепловые аномалии лучше детектируются на фоне низкой фоновой температуры. Для исследуемого района наиболее репрезентативными оказались данные, полученные за март каждого года по следующим причинам:

- наличие полного набора снимков за все годы наблюдений, что позволяет строить статистически значимые временные ряды и корректно рассчитывать Z-оценку;
- стабильный снежный покров в марте продолжает обеспечивать максимальный контраст (холодный снежный фон контрольной зоны против тёплой нарушенной поверхности карьера). Разница в температуре поверхности между техногенной зоной

и естественным заснеженным ландшафтом в марте всё ещё велика и пригодна для детектирования аномалий;

- март характеризуется минимальной межгодовой изменчивостью альбедо и теплового баланса по сравнению с другими сезонами. Снежный покров выступает в роли стабилизирующего фактора: его отражательная способность меняется незначительно от года к году, в отличие от бесснежного периода, где вариации температуры, влажности почвы и типа растительности создают высокий «шум» (естественную пространственную вариабельность значений температуры земной поверхности).

В начале исследования производилась предобработка входящих данных. Поскольку данные Landsat предоставляют информацию о LST, которая измеряется дистанционно по тепловому излучению и характеризует температуру самого верхнего слоя почвы, растительности или воды, то эта величина физически отличается от температуры воздуха, измеряемой метеостанциями на высоте 2 м и используемой в прогнозах погоды. Температура поверхности может значительно (на 10–20 °C и более) превышать температуру воздуха в солнечный день и быстрее на неё реагировать (Li et al., 2013). Однако, поскольку цель исследования заключается в выявлении относительных различий в температуре между зоной месторождения и контрольной территорией, данное различие не может служить препятствием для анализа и не влияет на достоверность результатов.

Предобработка данных включала в себя:

1. Конвертацию единиц измерения температуры. Исходные данные о температуре земной поверхности в продукте L2SP хранятся в виде целочисленных значений DN (*англ.* Digital Numbers). Для преобразования в градусы Цельсия была применена формула, рекомендованная USGS:

$$\mathrm{LST}\,(^{\circ}\mathrm{C}) = \left(0{,}00341802\mathrm{DN}\right) + 149 - 273{,}15,$$

где LST (°C) — температура земной поверхности в градусах Цельсия; DN — целочисленное представление температуры в Кельвинах; 0,00341802 — масштабный коэффициент; 149 — аддитивное смещение; 273,15 — конвертация значения из градусов Кельвина в градусы Цельсия.

2. Обрезку (клиппинг) данных. Все растровые данные были обрезаны по границам заранее подготовленного полигона, охватывающего всю область исследования, включая буферные и контрольные зоны. Это позволило сократить объём обрабатываемых данных и повысить скорость вычислений.

Обе процедуры выполнялись средствами программного обеспечения SAGA (*англ.* System for Automated Geoscientific Analyses) GIS (*англ.* Geographic Information Systems).

Далее для выявления статистически значимых тепловых аномалий, связанных с горнодобывающей деятельностью (разработкой месторождения алмазов открытым карьерным способом), был применён метод Z-Score, позволяющий количественно оценить отклонение температуры в каждом пикселе буферной зоны от фоновых значений в контрольной зоне, согласно формуле (1) (см. ниже). Подобный подход был успешно апробирован в работах В. И. Горного с соавторами при анализе особенностей пространственно-временной динамики температуры подстилающей поверхности Северной Евразии (Горный и др., 2021), а также при мониторинге промышленных объектов (Gorny et al., 1999).

Процедура расчёта проводилась в следующей последовательности:

1. Определение зон интереса. Вокруг территории месторождения была создана круговая буферная зона диаметром 10 км. Данный диаметр выбран эмпирически, чтобы охватить потенциальную зону непосредственного теплового влияния, превышающую территорию самого месторождения, но при этом оставаться в пределах разумного расстояния до точечного источника (карьера). Контрольная (фоновая) зона такого же диаметра расположена за пределами тектонического узла (*рис. 2*).

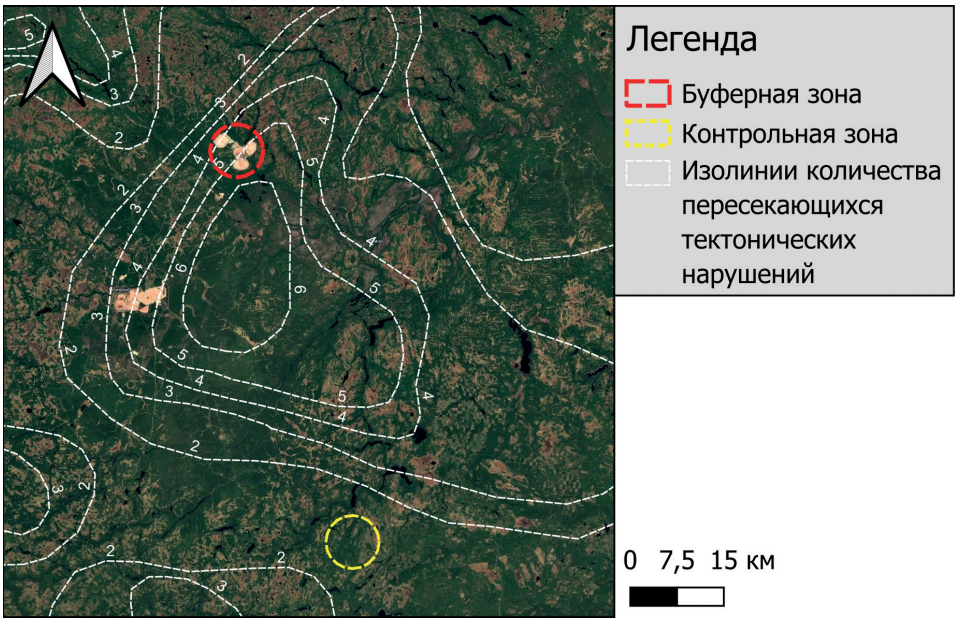


Рис. 2. Месторасположение зон интересов

2. Расчёт показателя *Z*. Для всех мартовских снимков рассчитывался показатель *Z* для каждого пикселя в буферной зоне по формуле:

$$Z = \frac{T_p - \mu_c}{\sigma_c}, \quad (1)$$

где T_p — температура в конкретном пикселе буферной зоны; μ_c — средняя температура в контрольной зоне; σ_c — стандартное отклонение температуры в контрольной зоне, характеризующее естественную пространственную вариабельность фоновой температуры.

Данная процедура выполнялась средствами SAGA GIS.

3. Интерпретация результатов. Пиксели со значением показателя $Z > 2$ классифицировались как статистически значимые положительные тепловые аномалии. Порог $Z > 2$ был выбран в соответствии с общепринятыми статистическими критериями. В нормальном распределении данных значение *Z*, превышающее 2, соответствует области, где находится примерно 5 % наиболее маловероятных значений. Таким образом, принятие данного порога означает, что с уверенностью 95 % можно утверждать, что температура в пикселях со значениями $Z > 2$ не является частью фонового распределения и представляет собой аномалию. Уровень значимости в 5 % ($p < 0{,}05$) считается стандартным для большинства научных и прикладных исследований в области экологии (Kato, Yamaguchi, 2005).

Результаты работ и обсуждения

Непосредственно само исследование по выявлению тепловых аномалий в районе разработки месторождения алмазов проводилось в два этапа: визуальная оценка необработанных данных и их последующая статистическая верификация методом Z-Score.

Визуальная оценка карт температуры поверхности для репрезентативных лет позволяет напрямую идентифицировать участки с повышенной температурой, чётко приуроченные к территории карьера. Выделяются также участки с тепловыми аномалиями, отнесённые к периферии тектонических узлов (*рис. 3*). Однако такой подход не позволяет объективно оценить статистическую значимость этих аномалий и отделить их от естественной простран-

ственной вариабельности фоновой температуры. Поэтому был проведён статистический анализ с применением метода Z-Score для количественной оценки значимости выявленных аномалий. Здесь следует пояснить, что под **тепловой аномалией** в данном исследовании понимается участок (пиксель, группа пикселей) в буферной зоне месторождения, для которого значение температуры земной поверхности статистически значимо превышает фоновые значения контрольной зоны. Критерием аномальности является значение показателя Z более двух стандартных отклонений. Такой порог соответствует вероятности менее 5 % ($p < 0{,}05$) того, что наблюдаемое превышение вызвано естественной межгодовой или пространственной изменчивостью.

Суть метода Z-Score заключается в том, что он показывает, на сколько стандартных отклонений температура в данном пикселе смещается от среднего фонового значения. Это позволяет перевести абсолютные значения температуры в универсальную шкалу статистической значимости.

На *рис. 4* представлено пространственное распределение расчётных значений показателя Z для всех лет наблюдений. Можно отчётливо наблюдать тепловые аномалии за пределами карьера, причём только в отдельные годы (с периодом три года). Наличие такой периодичности говорит о вкладе природной составляющей в данный процесс. Так, например, известно, что периодичность деформационной волны от Атлантической зоны спрединга составляет 10, 7, 4 и 2 года, а для слабых землетрясений фиксируются 1,5-, 0,9- и 0,5-летние циклы (Юдахин и др., 2008).

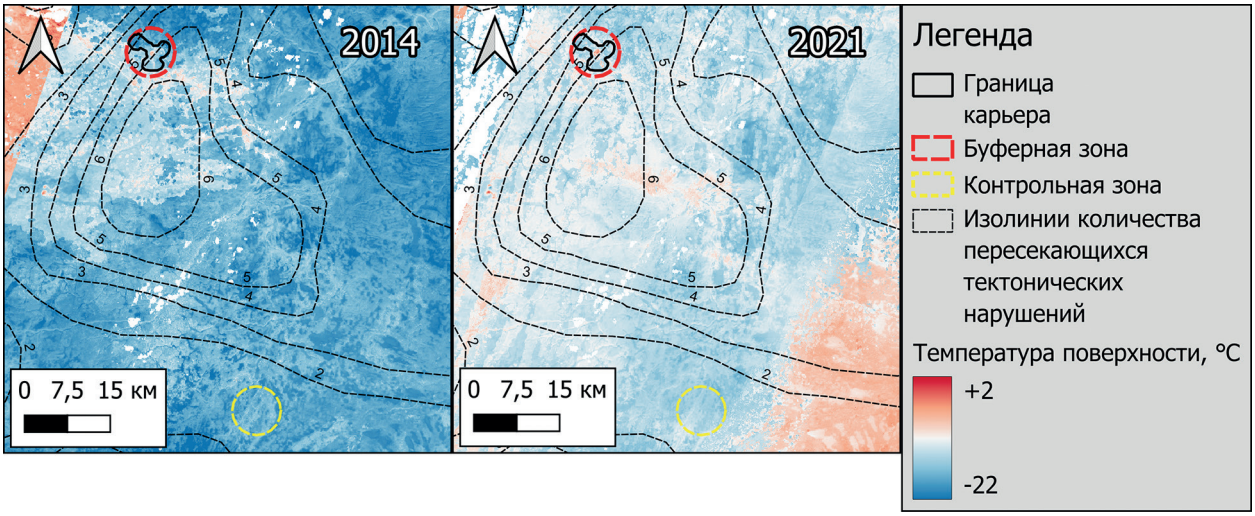


Рис. 3. Пространственное распределение температуры земной поверхности в районе расположения месторождения. Примеры медианных композитов за 2014 и 2021 гг.

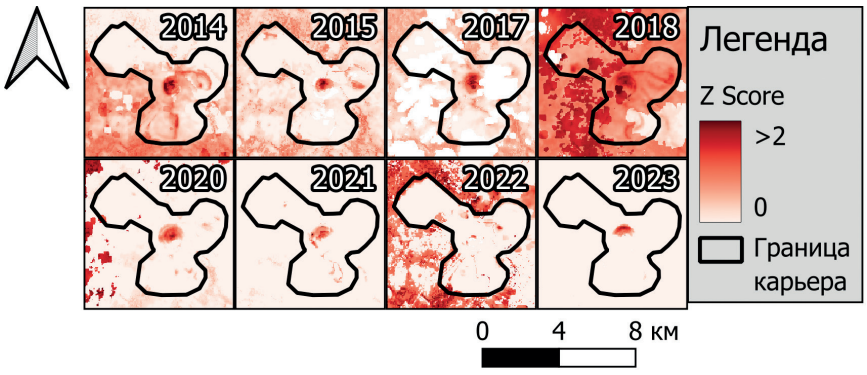


Рис. 4. Пространственное распределение статистически значимых тепловых аномалий в районе расположения месторождения за 2014–2023 гг.



Рис. 5. Максимальная интенсивность тепловых аномалий на территории месторождения по годам

Количественная оценка интенсивности аномалий была проведена по максимальному значению показателя *Z*, зафиксированному на территории разработки месторождения в каждый год наблюдений (*рис. 5*).

Для более детальной количественной характеристики тепловых аномалий в пределах 10-километровой буферной зоны вокруг месторождения были рассчитаны минимальные, средние и максимальные значения показателя *Z* для каждого года наблюдений, данные приведены в *табл. 2.*

Минимальные значения показателя *Z* соответствуют наименее нагретым участкам, которые в отдельные годы могут демонстрировать отрицательные значения ($Z < 0$), что, вероятнее всего, связано с локальными особенностями снежного покрова, затенением рельефа или различиями в теплофизических свойствах подстилающей поверхности. Средние показатели характеризуют общий уровень теплового воздействия на всю буферную зону, а максимальные — демонстрируют пиковую интенсивность аномалий, приуроченных, как правило, к территории самого карьера.

Таблица 2. Значения Z для буферной зоны месторождения

Год	Значения *Z*		
	минимальные	средние	максимальные
2014	–2,40	0,76	6,75
2015	–13,13	0,08	5,30
2017	–1,64	1,08	8,72
2018	–2,51	6,48	15,57
2020	–5,02	–0,29	6,65
2021	–5,77	–2,21	6,92
2022	–19,79	–4,85	4,74
2023	–13,81	–4,95	5,55

Полученные данные демонстрируют наличие межгодовой изменчивости интенсивности тепловых показателей. Анализ *табл. 2* позволяет не только констатировать максимальные, средние и минимальные значения показателя *Z*, но и выдвигать предположения о природе наблюдаемых тепловых аномалий. Высокие показатели 2018 г. вряд ли объясняются только технологическим режимом карьера, который относительно стабилен. Вероятно, здесь произошло наложение антропогенного фактора на специфические метеорологические условия марта, способствовавшие максимальному контрасту между показателями на месторождении и фоновой территории. Смена знака средних значений в 2020–2023 гг. формально указывает на то, что буферная зона стала холоднее контрольного участка. Однако это не обязательно означает реальное похолодание территории месторождения, это может быть вызвано постепенным потеплением контрольной зоны вследствие изменений характера распределения снежного покрова, его мощности. Экстремально низкие минимальные значения 2015, 2022 и 2023 гг. могут быть связаны с наличием локальных участков с аномально низкой темпера-

турой — глубоких снежных отложений в замкнутых низинах и/или зон разгрузки холодных грунтовых вод. При этом даже в эти годы максимальные значения сохраняются на уровне $Z > 2$, что свидетельствует об устойчивой локальной тепловой аномалии в пределах самого карьера, фиксируемой независимо от фоновых колебаний температуры.

Таким образом, анализ данных о температуре земной поверхности подтвердил наличие устойчивых тепловых аномалий, связанных не только с естественными (природными) причинами, но и с горнодобывающей деятельностью.

Выводы

В ходе исследования разработана и апробирована методика выявления тепловых аномалий на основе данных спутников Landsat с применением статистического метода Z-Score. Установлено, что использование мартовских снимков (период устойчивого снежного покрова и низкой фоновой температуры) в буферной зоне вокруг карьера (территории разработки месторождения алмазов) в паре с контрольной зоной, расположенной за пределами объекта исследования, позволяет минимизировать влияние сезонных и метеорологических факторов.

В результате обработки многолетних данных (2014–2023) выявлено, что устойчивые положительные тепловые аномалии ($Z > 2$) пространственно приурочены к контуру самого карьера месторождения алмазов им. Гриба. Количественный анализ максимальных значений показателя Z в пределах буферной зоны месторождения выявил значительную межгодовую изменчивость. Наиболее низкие значения зафиксированы в 2015 и 2022 гг., тогда как экстремальный всплеск интенсивности тепловой аномалии отмечен в 2018 г. Такая динамика не может быть объяснена исключительно технологическим режимом разработки карьера. Предположительно, выявленная периодичность (с характерными интервалами в три года) отражает наложение антропогенного теплового воздействия на природные ритмы геодинамической активности, что требует дальнейшего сопоставления с данными о сейсмичности и деформационных волнах региона.

В качестве ограничения настоящего исследования можно отметить использование снимков Landsat как единственного источника о температуре поверхности. Абсолютные значения температуры поверхности LST чувствительны к метеоусловиям в момент съёмки, поэтому в будущем целесообразно результаты дополнять анализом Z-Score анализом временных рядов с учётом облачности и влажности атмосферы.

Предложенный нами подход выделения статистически значимых тепловых аномалий методом стандартной Z-оценки ($Z > 2$) в сочетании с данными дистанционного зондирования (LST Landsat) может быть применён в качестве экспресс-метода оценки теплового режима других месторождений Архангельской алмазоносной провинции. Перспективным представляется совместный анализ спутниковых тепловых аномалий с наземными измерениями конвективного теплового потока и данными о выделении радона. Это позволит уточнить вклад эндогенных процессов в формирование температурного поля и повысить достоверность мониторинга геодинамической безопасности горнодобывающих районов Арктической зоны РФ.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН) № гос. регистрации № 125022502869-4.

Литература

1. *Беляев А. И.*, *Коровин Г. Н.*, *Лупян Е. А.* Использование спутниковых данных в системе дистанционного мониторинга лесных пожаров МПР РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 1. С. 20–29.

2. *Березовский В.З.*, *Губайдуллин М.Г.*, *Егоркин А.В.*, *Койфман Л.И.*, *Кореневич К.А.* Комплексная плотностная модель земной коры Архангельской области // Строение литосферы Балтийского щита. М.: Изд-во РАН, 1993. С. 109–116.
3. *Бондур В.Г.*, *Воронова О.С.* Аномалии тепловых полей, выявленные по космическим данным, при подготовке и протекании сильных землетрясений в районе Байкальской рифтовой зоны в 2008–2022 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 3–19. DOI: 10.31857/S0205961423060027.
4. *Гаранин В.К.*, *Вержак В.В.*, *Гаранин К.В.* Проблемы поиска алмазных месторождений на территории Зимнего берега Архангельской алмазоносной провинции и пути решения // Изв. высш. учеб. заведений. Геология и разведка. 2007. № 6. С. 42–48.
5. *Горный В.И.*, *Теплякова Т.Е.* О влиянии эндогенного тепла земли на формирование в бореальной зоне локальных ареалов неморальной растительности // Докл. Акад. наук. 2001. Т. 378. № 5. С. 679–680.
6. *Горный В.И.*, *Шилин Б.В.*, *Ясинский Г.И.* Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Изд-во «Недра», 1993. 220 с.
7. *Горный В.И.*, *Селезнев Г.А.*, *Тронин А.А.* Применение тепловой космической съемки для поисков слаботермальных вод // Разведка и охрана недр. 2016. № 1. С. 49–56.
8. *Горный В.И.*, *Киселев А.В.*, *Крицук С.Г. и др.* Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 155–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
9. *Горный В.И.*, *Крицук С.Г.*, *Латыпов И.Ш. и др.* Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 23–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
10. *Грищенко М.Ю.*, *Устюхина А.В.* Дешифрирование и картографирование проявлений вулканической и поствулканической активности по тепловым космическим снимкам высокого пространственного разрешения // Геодезия и картография. 2019. Т. 80. № 11. С. 56–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-953-11-56-64.
11. *Гурулев А.А.*, *Замана Л.В.*, *Куклин А.П.*, *Казанцев В.А.* Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 131–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140.
12. *Иванова А.А.*, *Балдина Е.А.* Исследование и картографирование теплового воздействия объектов железнодорожных транспортных узлов на окружающую среду по данным дистанционного зондирования // Материалы Международ. конф. «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2018. Т. 24(2). С. 27–39. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-27-39.
13. *Киселев Г.П.*, *Яковлев Е.Ю.*, *Дружинин С.В.* Неравновесный уран в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 117–125.
14. *Корниенко С.Г.* Использование тепловых снимков со спутника Landsat 7 при картографировании тундровых ландшафтов на примере участка газопровода «Бованенково – Байдарацкая губа» // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 3. № 30. С. 51–63. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6.
15. *Курлов А.В.*, *Квасов Р.С.*, *Ахметова Д.Р.*, *Юрченко Д.А.*, *Белова П.В.*, *Егорова П.Г.* Оценка температуры по спутниковым данным на наличие тепловых аномалий в Омске, Перми и Ставрополе // Изв. ин-та инженерной физики. 2025. № 2(76). С. 63–68.
16. *Кутинов Ю.Г.* Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 388 с.
17. *Кутинов Ю.Г.*, *Чистова З.Б.* Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: Правда Севера, 2004. 283 с.
18. *Кутинов Ю.Г.*, *Чистова З.Б.*, *Неверов Н.А.* Новые данные о влиянии тектонических узлов на состояние окружающей среды на севере Русской плиты // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 5. С. 12–24.
19. *Кутинов Ю.Г.*, *Чистова З.Б.*, *Минеев А.Л. и др.* Результаты мониторинговых исследований процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах севера Русской плиты // Динамические процессы в геосферах. 2022. Т. 14. № 2. С. 10–24. DOI: 10.26006/29490995_2022_14_2_10.
20. *Лупян Е.А.*, *Стыценко Ф.В.*, *Сенько К.С. и др.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.

21. *Мамаш Е. А.*, *Пестунов И. А.*, *Синявский Ю. Н.* Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8 // Вычисл. технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 95–111. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.008.
22. *Медведева М. А.*, *Иткин В. Ю.*, *Сирин А. А.* Анализ показателей температурных аномалий для выявления торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 92–116. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116.
23. *Пенделяк Р. Н.*, *Веричев Е. М.*, *Головин Н. Н.* Месторождение им. В. Гриба: геологическое строение и алмазоносность // Горный журн. 2014. № 3. С. 16–21.
24. *Стручкова Г. П.*, *Крупнова Т. Г.*, *Ракова О. В. и др.* Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28(3). С. 415–424. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424.
25. *Тронин А. А.* Возможность применения космической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 86–96.
26. *Фазылов И. Р.*, *Гендлер С. Г.*, *Прохорова Е. А.* Особенности тепловых расчетов горных выработок в условиях искусственных температурных аномалий // Горный информационно-аналит. бюл. 2026. № 2. С. 86–100.
27. *Хуторской М. Д.* Введение в геотермию. М.: РУДН, 1996. 117 с.
28. *Юдахин Ф. Н.*, *Капустян Н. К.*, *Шахова Е. В.* Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 128 с.
29. *Coppola D.*, *Laiolo M.*, *Cigolini C. et al.* Thermal remote sensing for global volcano monitoring: Experiences from the MIROVA system // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. Article 362. 21 p. DOI: 10.3389/feart.2019.00362.
30. *Gorny V. I.*, *Kritsuk S. G.*, *Latypov I. Sh. et al.* Estimating the heat losses of nuclear power stations from space-based thermal imaging data // J. Optical Technology. 1999. V. 66(8). P. 676–681. DOI: 10.1364/jot.66.000676.
31. *Kato S.*, *Yamaguchi Y.* Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 99(1–2). P. 44–54. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.026.
32. *Li Z.-L.*, *Tang B.-H.*, *Wu H. et al.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 131. P. 14–37. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
33. *Weng Q.*, *Lu D.*, *Schubring J.* Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89(4). P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
34. *Zhao J.*, *Yu L.*, *Xu Y. et al.* Exploring the addition of Landsat 8 thermal band in land-cover mapping // Intern. J. Remote Sensing. 2019. V. 40(12). P. 4544–4559. DOI: 10.1080/01431161.2019.1569281.

Calculation of thermal anomalies in the Grib diamond deposit development area (Arkhangelsk Region) based on Landsat data

E. V. Polyakova, A. L. Mineev, Yu. G. Kutinov, Z. B. Chistova, I. N. Bolotova

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS
Arkhangelsk 163020, Russia
E-mail: lenpo26@yandex.ru

The article presents a methodology for calculating thermal anomalies based on Landsat satellite data using the Z-Score statistical method (standard estimation method) for the Grib diamond deposit mining area. This method measures the standard deviation by which the temperature in a given pixel shifts from the average background value, allowing absolute temperature values to be converted to a universal scale of statistical significance. Processing long-term data (2014–2023) revealed that persistent maximum positive thermal anomalies are spatially confined to the Grib diamond deposit quarry boundary. Average values characterize the overall level of thermal impact on the entire buffer zone, while minimum values correspond to the least heated areas, which in some years can exhibit negative values, most likely due to local snow cover characteristics and terrain shading. Thus, analysis of surface temperature data confirmed the presence of persistent thermal anomalies associated not only with natural causes

but also with mining activities. The proposed approach to identifying statistically significant thermal anomalies using the standard Z-score (Z > 2) in combination with remote sensing data (Land Surface Temperature (LST) Landsat) can be applied as a rapid method for assessing the thermal regime of other deposits in the Arkhangelsk diamond province. A joint analysis of satellite thermal anomalies with ground-based measurements of convective heat flow and radon emission data appears promising. This will allow for a more precise understanding of the contribution of endogenous processes to the formation of the temperature field and improve the reliability of geodynamic safety monitoring in mining areas of the Russian Arctic zone.

Keywords: thermal anomalies, Landsat, convective heat flow, Z-Score method, diamond deposit, Arkhangelsk region

Accepted: 13.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-258-270

References

1. Belyaev A. I., Korovin G. N., Loupian E. A., Use of satellite data in the remote monitoring system of forest fires of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Iss. 2, V. 1, pp. 20–29 (in Russian).
2. Berezovskii V. Z., Gubaidullin M. G., Egorkin A. V., Koifman L. I., Korenevich K. A., Complex density model of the Earth's crust in the Arkhangelsk region, In: *Stroenie litosfery Baltiiskogo shchita* (Lithospheric structure of the Baltic Shield), Moscow: Izd. RAN, 1993, pp. 109–116 (in Russian).
3. Bondur V. G., Voronova O. S., Anomalies of thermal fields revealed by satellite data during preparatio n and occurrence of strong earthquakes in the region of the Baikal rift zone in 2008–2022, *Earth Research from Space*, 2023, No. 6, pp. 3–19 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423060027.
4. Garanin V. K., Verzhak V. V., Garanin K. V., Problems of diamond deposit exploration in the Winter Coast of the Arkhangelsk diamondiferous province and solutions, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*, 2007, No. 6, pp. 42–48 (in Russian).
5. Gornyy V. I., Teplyakova T. E., On the influence of endogenous heat of the Earth on the formation of local areas of nemoral vegetation in the boreal zone, *Doklady Akademii nauk*, 2001, V. 378, No. 5, pp. 679–680 (in Russian).
6. Gornyy V. I., Shilin B. V., Yasinskii G. I., *Teplovaya aehrokosmicheskaya s"emka* (Thermal aerospace imaging), Moscow: Izd. "Nedra", 1993, 220 p. (in Russian).
7. Gornyy V. I., Seleznev G. A., Tronin A. A., Application of infrared-thermal satellite flown survey on the low temperature thermal water exploration, *Prospect and protection of mineral resources*, 2016, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
8. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G. et al., Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
9. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. et al., Satellite risk mapping of urban air overheating (by the example of Helsinki, Finland), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 23–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
10. Grishchenko M. Yu., Ustyukhina A. V., Mapping the volcanic and postvolcanic activity and its revealing on thermal infrared satellite images of high spatial resolution, *Geodesy and Cartography*, 2019, V. 80, No. 11, pp. 56–64 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2019-953-11-56-64.
11. Gurulev A. A., Zamana L. V., Kuklin A. P., Kazantsev V. A., Identification of thermal springs using space research, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 131–140 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140.
12. Ivanova A. A., Baldina E. A., The research and mapping of the thermal impact of railway transport nodes on the environment from remote sensing data, *Proc. Intern. Conf. "InterCarto. InterGIS"*, 2018, V. 24(2), pp. 27–39 (in Russian), DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-27-39.
13. Kiselev G. P., Yakovlev E. Yu., Druzhinin S. V., Nonequilibrium uranium in the near-pipe space of kimberlite bodies of the Zolotitskoye field of the Arkhangelsk diamondiferous province, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No. 9, pp. 117–125 (in Russian).
14. Kornienko S. G., Using thermal images from the Landsat 7 satellite for mapping tundra landscapes: the case of the Bovanenkovo – Baydaratskaya Bay gas pipeline section, *Actual Problems of Oil and Gas*, 2020, Iss. 3, No. 30, pp. 51–63 (in Russian), DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art6.
15. Kurlov A. V., Kvasov R. S., Akhmetova D. R., Yurchenko D. A., Belova P. V., Egorova P. G., Assessment of the impact of satellite data based temperature detection onto the thermal anomalies of Omsk, Perm and Stavropol cities, *Izvestiya instituta inzhenernoi fiziki*, 2025, No. 2(76), pp. 63–68 (in Russian).

16. Kutinov Yu. G., *Ehkogeodinamika Arkticheskogo segmenta zemnoi kory* (Ecogeodynamics of the Arctic segment of the Earth's crust), Ekaterinburg: UrO RAN, 2005, 388 p. (in Russian).
17. Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., *Ierarkhicheskii ryad proyavlenii shchelochno-ul'traosnovnogo magmatizma Arkhangel'skoi almazonosnoi provintsii. Ikh otrazhenie v geologo-geofizicheskikh materialakh* (Hierarchical sequence of alkaline-ultramafic magmatism manifestations in the Arkhangelsk diamondiferous province. Their reflection in geological and geophysical data), Arkhangel'sk: Pravda Severa, 2004, 283 p. (in Russian).
18. Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Neverov N. A., New data on the impact of tectonic nodes on the state of the environment at the North of the Russian plate, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta*, *Ser. 5: Geografiya*, 2020, No. 5, pp. 12–24 (in Russian).
19. Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L. et al., Results of monitoring studies of the processes of intergeospheric interaction in the tectonic nodes of the North of the Russian plate, *Dynamic Processes in Geospheres*, 2022, V. 14, No. 2, pp. 10–24 (in Russian), DOI: 10.26006/29490995_2022_14_2_10.
20. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S. et al., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
21. Mamash E. A., Pestunov I. A., Sinyavskii Yu. N., Analysis of patterns in the distribution of the temperature fields for large industrial cities of Siberia according to Landsat-8 data, *Computational technologies*, 2022, V. 27, No. 3, pp. 95–111 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.008.
22. Medvedeva M. A., Itkin V. Yu., Sirin A. A., Analysis of temperature anomaly indicators to identify peat fires, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 92–116 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116.
23. Pendelyak R. N., Verichev E. M., Golovin N. N., Grib deposit: geological structure and diamond content, *Gornyi zhurnal*, 2014, No. 3, pp. 16–21 (in Russian).
24. Struchkova G. P., Krupnova T. G., Rakova O. V. et al., Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data, *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2023, V. 28(3), pp. 415–424 (in Russian), DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424.
25. Tronin A. A., The possibility of using space thermal imaging for earthquake research, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 4, pp. 86–96 (in Russian).
26. Fazylov I. R., Gendler S. G., Prokhorova E. A., Peculiarities of thermal design of mine openings in case of induced temperature anomalies, *Mining Informational and Analytical Bull.*, 2026, No. 2, pp. 86–100 (in Russian).
27. Khutorskoi M. D., *Vvedenie v geotermiyu* (Introduction to Geothermy), Moscow: RUDN, 1996, 117 p. (in Russian).
28. Yudakhin F. N., Kapustyan N. K., Shakhova E. V., *Issledovaniya aktivnosti platformennykh territorii s ispol'zovaniem microseism* (Research of platform area activity using microseisms), Ekaterinburg: UrO RAN, 2008, 128 p. (in Russian).
29. Coppola D., Laiolo M., Cigolini C. et al., Thermal remote sensing for global volcano monitoring: Experiences from the MIROVA system, *Frontiers in Earth Science*, 2019, V. 7, Article 362, 21 p., DOI: 10.3389/feart.2019.00362.
30. Gorny V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. et al., Estimating the heat losses of nuclear power stations from space-based thermal imaging data, *J. Optical Technology*, 1999, V. 66(8), pp. 676–681, DOI: 10.1364/jot.66.000676.
31. Kato S., Yamaguchi Y., Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux, *Remote Sensing of Environment*, 2005, V. 99(1–2), pp. 44–54, DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.026.
32. Li Z.-L., Tang B.-H., Wu H. et al., Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 2013, V. 131, pp. 14–37, DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
33. Weng Q., Lu D., Schubring J., Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, V. 89(4), pp. 467–483, DOI: 10.1016/J.RSE.2003.11.005.
34. Zhao J., Yu L., Xu Y. et al., Exploring the addition of Landsat 8 thermal band in land-cover mapping, *Intern. J. Remote Sensing*, 2019, V. 40(12), pp. 4544–4559, DOI: 10.1080/01431161.2019.1569281.