

Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований

А. А. Гурулев, Л. В. Замана, А. П. Куклин, В. А. Казанцев

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Чита, 672014, Россия*

E-mails: sansang@mail.ru, l.v.zamana@mail.ru, kap0@mail.ru, slava11545@gmail.com

В настоящее время широкое распространение для практических целей получил метод космического обнаружения мест с повышенной температурой поверхности на планете Земля в тепловом инфракрасном диапазоне. С его помощью выявляют места техногенных и природных пожаров, оценивают тепловое загрязнение водных объектов. Термальные аномалии естественного происхождения формируются в том числе и термальными источниками, но не все термальные источники имеют координатную привязку, а для некоторых известны только их названия. Объектами исследования стали термальные аномалии Баунтовской котловины в пределах Байкальской рифтовой зоны. Цель настоящей работы — определить места выхода термальных минеральных источников по собственному тепловому излучению объекта в тепловом инфракрасном диапазоне в интервале длин волн 10,60–11,19 мкм. В задачи исследования входило выявление оптимального времени года и мешающих факторов для определения мест выхода термальных источников по собственному тепловому излучению в тепловом инфракрасном диапазоне, а также апробация данного метода для известных исследуемых объектов. Проведена пространственно-временная оценка площадей термальных аномалий, фиксируемых с космического аппарата Landsat-8. Установлено около 150 термальных аномалий. На базе известных термальных источников разработан алгоритм оценки температурных аномалий и выявления самых перспективных мест для обнаружения гидротерм. Определено семь наиболее доступных в транспортном отношении участков термальных аномалий. Полученная информация позволяет проводить мониторинг термальных источников с использованием дистанционных методов зондирования данных объектов и оценивать их влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: термальные источники, тепловой инфракрасный диапазон, космические снимки, Landsat-8, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 10.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140

Введение

Развитие дистанционных методов мониторинга Земли из космоса привело к оперативному выявлению происходящих на Земле чрезвычайных ситуаций, связанных с выделением тепла. Ярким примером тому может служить решение задач по выявлению мест техногенных и природных пожаров (Беляев и др., 2005; Zheng et al., 2023) с использованием теплового инфракрасного диапазона (ТИД), длины волн которого лежат в интервале от 8 до 14 мкм. Другим примером использования теплового инфракрасного канала служит оценка теплового загрязнения водных объектов, которое может привести к негативным экологическим последствиям (Gurulev, Kazantsev, 2022a, b), а также обнаружение с использованием радиометрической аппаратуры, установленной на искусственных спутниках Земли, повышения температуры воздуха городской среды (Горный и др., 2022). Съёмкой в инфракрасном диапазоне выявляется также тепловое загрязнение очистными станциями (Тронин, Шилин, 2008).

Существуют и другие термальные точки на планете, причиной образования которых стало не техногенное влияние человека, а естественное поступление тепла из недр Земли, например из термальных источников. В Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), которая протянулась почти на 2500 км от оз. Хубсугул в Монголии до р. Олёкмы и Южной Якутии, известно более 60 азотных термальных источников. Все они связаны с активными тектоническими разломами, а выходы их приурочены к эрозионному врезу, наиболее часто — к речным долинам

и руслам рек, иногда термы разгружаются в озёра. Многие термальные источники хорошо известны и периодически исследуются (Оргильянов и др., 2021; Шварцев и др., 2020; Wan, 2012), тогда как точное местоположение некоторых, даже ранее изучавшихся, неизвестно. Не исключено к тому же существование невыявленных выходов терм. В плане обнаружения новых проявлений термальных источников как гидротермального ресурса в первую очередь перспективна территория малонаселённого и во многих местах труднодоступного северо-восточного фланга БРЗ. Возможность выявления тепловых аномалий на поверхности методами дистанционного зондирования в широком диапазоне электромагнитных волн, включая и ТИД, позволяет существенно облегчить поиск участков разгрузки терм.

Активное использование теплового инфракрасного диапазона при дистанционном зондировании Земли из космоса с достаточно высоким пространственным разрешением позволяет определять термодинамическую температуру поверхностного слоя исследуемой среды толщиной порядка сотни микрометров. Кроме того, регулярное получение данных с различных космических аппаратов даёт возможность проводить непрерывный мониторинг объекта и его динамики в течение длительного промежутка времени. Также важны оперативность получаемых данных с космических аппаратов и высокая скорость их обработки. Сопоставление космоснимков в видимом и инфракрасном диапазонах позволяет получать дополнительную информацию о термальных источниках.

Исследование термальных точек естественного происхождения с использованием космических снимков видимого и инфракрасного диапазонов представляется актуальной задачей в области поиска гидротермальных ресурсов, разработки научной основы организации геоэкологического мониторинга природных систем и разработки средств контроля состояния окружающей среды.

Объекты исследования и методика исследований

Территория исследований находится в бассейне р. Ципы, левого притока р. Витим, и в геолого-структурном отношении представлена Баунтовской (Ципинской) межгорной впадиной, образованной кайнозойскими терригенными осадками мощностью 300–400 м, и её ближайшим горным обрамлением, сложенным преимущественно гранитоидами палеозоя. Географически территория относится к Байкало-Становому нагорью. В среднем за год здесь выпадает около 400 мм осадков, а в отдельные годы — свыше 600 мм. Более половины их приходится на июль и август. В холодный период года, с октября по апрель, осадков немного более 10 % годовой суммы. Средняя годовая температура воздуха в среднем составляет $-5,5^{\circ}\text{C}$ и меняется по годам от $-7,6$ до $-3,7^{\circ}\text{C}$. Средняя месячная температура января находится в пределах от $-37,2$ до $-21,7^{\circ}\text{C}$, а июля — от $13,1$ до $18,4^{\circ}\text{C}$ (Vakhnina, Zamana, 2021).

По геокриологическим условиям территория входит в область сплошного распространения криолитозоны мощностью до 500 м и с температурой до $-10\text{...}-12^{\circ}\text{C}$ (Некрасов, 1976), которая прорывается небольшими по площади гидрогенными, в том числе гидротермальными, и более крупными подозёрными таликами. Контрастные температурные характеристики между замороженными и талыми породами создают предпосылки для выявления аномалий теплового поля дистанционными методами.

В последние полтора десятка лет на рассматриваемой территории выполнено гидрогеохимическое опробование шести термальных источников (Баунтовский, Баунтовский грязевой, Бусанский, Могойский, Точинский, Шуриндинский), которые объединены в Баунтовскую группу (Замана, 2011; Замана, Аскарлов, 2010; Kuklin, Zamana, 2023). Местоположение четырёх из них показано на *рис. 1* (см. с. 133). Баунтовский грязевый источник описан и опробован впервые. Могойский источник — наиболее высокотемпературный в БРЗ: в одном из выходов температура воды была $83,7^{\circ}\text{C}$, максимальная температура других источников находилась в диапазоне $53,1-70,6^{\circ}\text{C}$.

В работах предшествующих исследователей (Албагачиева, 1965; Ломоносов, 1974; Ткачук и др., 1957) сообщается о существовании на данной территории ещё восьми термальных

источников, из них для четырёх приведены данные по температуре и гидрохимии, по остальным даны только названия. Мелкомасштабность схем положения, отсутствие координат или детальной орографической привязки затрудняют поиск этих источников, особенно с учётом плохой проходимости местности. Для наземного транспорта проезд на источники, за исключением Баунтовских, возможен только в зимнее и ранневесеннее время.

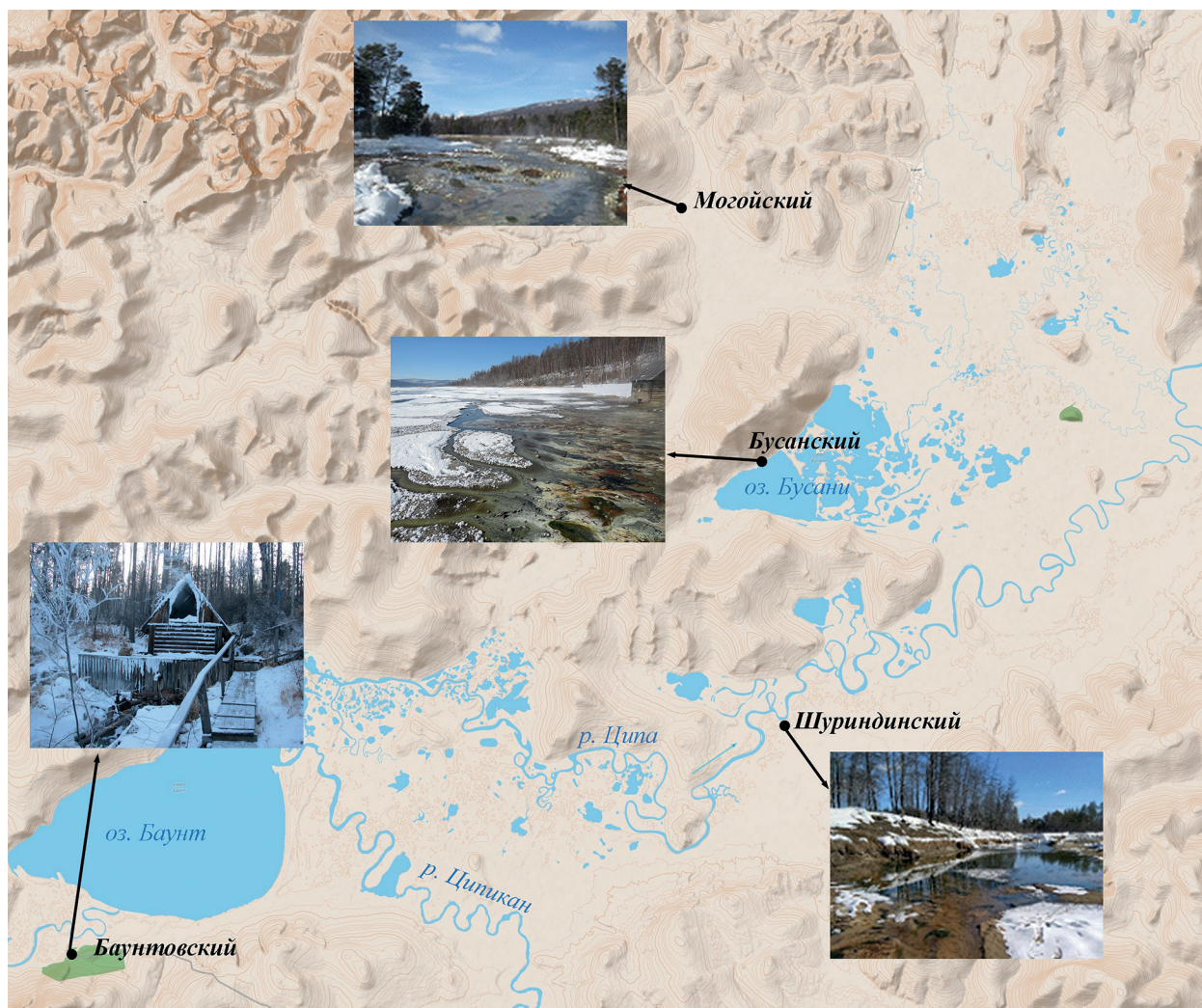


Рис. 1. Карта-схема термальных источников в Баунтовской (Ципинской) межгорной впадине. Фото А. П. Кулина

Для выявления аномалий теплового поля были проанализированы данные, полученные с искусственных спутников Земли Landsat-8 и Landsat-9. С этой целью использовались космические снимки 10-го канала, который принимает тепловое излучение на длинах волн в диапазоне 10,60–11,19 мкм (тепловой инфракрасный диапазон). С методикой обработки и получения космоснимков можно ознакомиться в работе (Матузко, Якубайлик, 2018). Кроме теплового инфракрасного диапазона использовался и видимый диапазон. Разрешение изображений составляло 30 м для видимого диапазона и 100 м — для инфракрасного.

Тепловой инфракрасный диапазон позволяет определять температуру поверхности излучающей среды. Толщина слоя, в котором формируется излучение среды, достигает 100 мкм и зависит от её вида и физико-химических свойств. Для воды данный слой не превышает 20 мкм. Кроме того, все природные среды не являются абсолютно чёрными телами, и поэтому следует учитывать коэффициент излучения среды, значение которого меньше единицы. Для

воды он равен 0,96. Данные по температуре поверхности Земли, получаемые с веб-сервиса Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov>) в автоматическом режиме, учитывают атмосферную коррекцию. В результате поступающие с космического аппарата данные температуры поверхности имеют достаточно высокую точность (0,1–0,4 °С) (Sekertekin, Bonafoni, 2020). Для выявления термальных аномалий на поверхности Земли и лучшего определения температурных контрастов следует рассматривать относительные измерения температуры поверхности на космических снимках, так как относительная погрешность измерений при этом, как правило, выше.

Основной объём информации, получаемой с космических аппаратов при дистанционном зондировании, приходится на дневное время суток. Ночные космоснимки земной поверхности существуют, но они практически отсутствуют в открытом доступе, в связи с чем не нашли широкого применения. В дневное время существуют различные внешние факторы (режим инсоляции, скорость ветра, температура воздуха, тепловая инерция поверхности и т.п.), которые дают температурный контраст в несколько градусов.

Прогрев грунта на большой площади (в зависимости от физических параметров термального источника) будет наблюдаться за счёт потока тёплых вод вблизи их выхода. Выбор оптимального времени года для регистрации тепловой аномалии по космическому снимку в тепловом инфракрасном диапазоне для каждого региона будет своим. В работе (Горный и др., 2016) для слаботермальных вод Южного Урала указаны периоды осенней и весенней инверсии переменных температурных контрастов. Для регионов с небольшой толщиной снежного покрова априори оптимальным временем будет зимний период, когда нагретый грунт будет нагревать поверхность снежного покрова. Влияние снега на выявление теплового контраста при небольшой его толщине в районе термальных минеральных источников будет незначительным. По данным Гидрометцентра России, высота снежного покрова в районе исследований на 20 февраля 2024 г. не превышала 10 см (<https://meteoinfo.ru/mapsynop>). Поэтому оптимальным временем для регистрации тепловых аномалий в малоснежном регионе считаем зимний период времени. Также в этот период отсутствует вегетационная зелёная масса, которая является мешающим фактором для выявления аномальных мест с повышенным значением температуры поверхности. Кроме того, следует учитывать особенности рельефа и микро-рельефа исследуемой территории.

На толщину слоя, формирующего излучение в инфракрасной области спектра, которая составляет несколько десятков микрометров, влияют внешние факторы, в частности ветровое воздействие, оказывающее охлаждающий эффект. При больших длинах волн (микроволновый диапазон) толщина формирования излучения среды больше и в зимнее время в случае отсутствия жидкой фазы воды в ней может достигать значений порядка 1 м. Поэтому для обнаружения термальных источников данный диапазон предпочтительней, но его разрешающая способность с искусственных спутников Земли невысокая.

Полученные результаты и их обсуждение

На *рис. 2* (см. с. 135) представлено распределение термодинамической температуры рассматриваемой территории, полученной с использованием теплового инфракрасного диапазона за 23.01.2024, на котором выявлено около 150 температурных аномалий общей площадью 19 178 500 м². Под аномалиями будем понимать повышенную температуру поверхности в исследуемой местности. Критерием служит термальный источник с известной температурой. На *рис. 2* это Бусанский источник с температурой –21 °С. В разные даты число аномалий может различаться, возможно смещение их местоположения, что может определяться миграцией выходов терм, изменением их дебита и температуры, однако в целом картина пространственного распределения температурных аномалий сохраняется. Нетрудно заметить, что тепловые аномалии в большинстве своём имеют линейное расположение, а это можно рассматривать как отражение приуроченности их к линейно вытянутым тектоническим разломам.

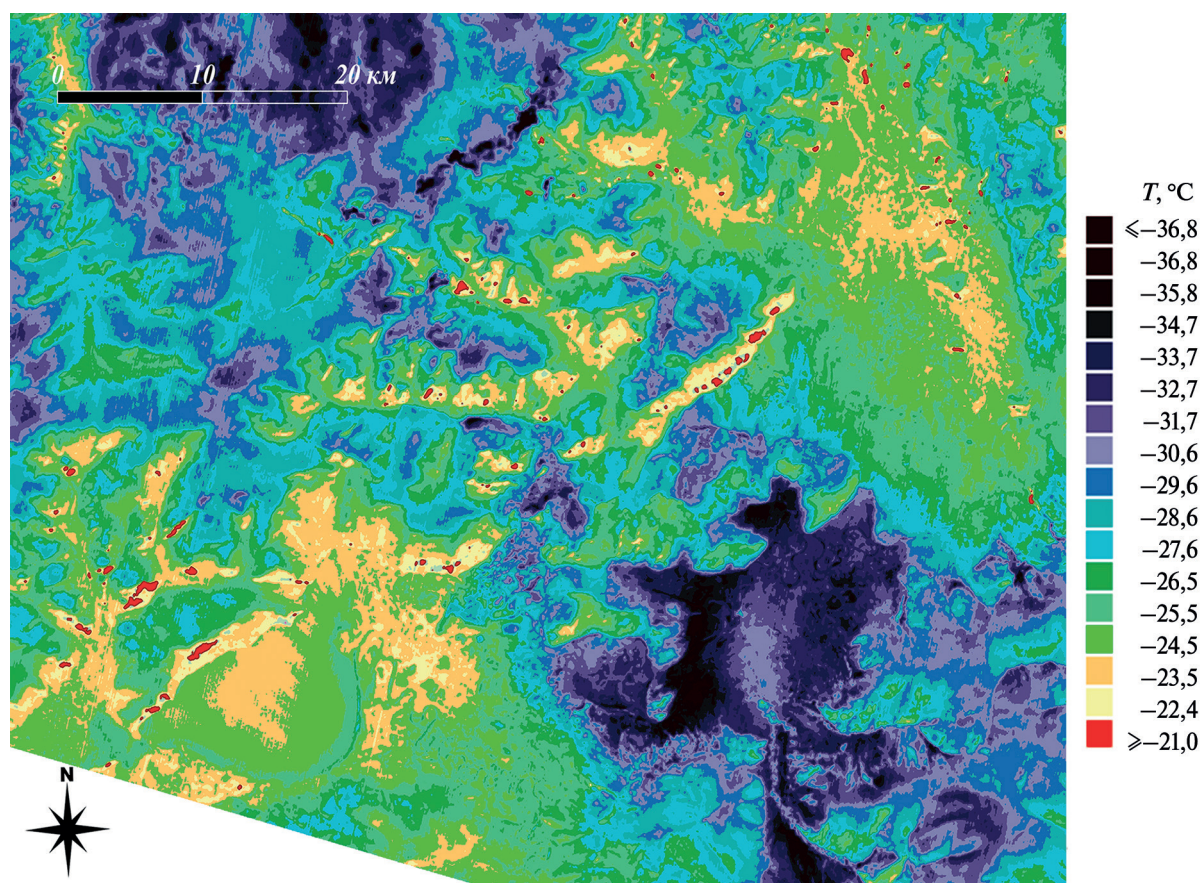


Рис. 2. Термодинамическая температура в Баунтовской (Ципинской) межгорной впадине. Термальные аномалии с $T > -21$ °C выделены красным

Для выявления в общей массе температурных аномалий собственно термальных источников были проанализированы характеристики известных в исследуемом районе терм, которые хорошо фиксируются по космическим изображениям в зимний период, а Могойский источник, из-за значительной площади и большого числа выходов подземных вод с высокой температурой, — и круглогодично. Для Баунтовского термального источника при анализе спутниковых данных установлено, что тепловые аномалии регистрируются на разных снимках в различных местах на удалении около 1 км друг от друга, а также в прибрежье одноимённого озера, что определяется динамикой теплового излучения термопроявлений в этих точках.

При поиске термальных выходов вод дистанционными методами исследования в дневное время необходимо учитывать рельеф местности. На рис. 3 (см. с. 136) представлены примеры исследования участков земной поверхности с повышенным значением температуры. Через эти участки построены треки, по которым оценено изменение поверхностной температуры в зависимости от изменения высоты местности. Видно, что для значительного числа температурных аномалий резкое изменение высоты по исследуемому треку характеризуется и резким возрастанием температуры. В зимнее время года высота поднятия солнца над горизонтом не принимает больших значений на широтах, где расположен исследуемый район. Поэтому происходит прогрев склонов возвышенностей, обращённых к солнцу. Нами принято, что положительная корреляция высоты земной поверхности с южной стороны и повышение температуры означает прогретый солнечными лучами склон, на котором проявление термального источника маловероятно. Кроме того, склон можно определить и по освещённости в видимом диапазоне. Для термальных аномалий, находящихся в долинах водотоков или в береговой линии озёр, положительной корреляции температуры с высотой не отмечается, что может свидетельствовать о наличии термального источника. Именно это наблюдается на известных термах (см. рис. 3).

В местах разгрузки термальных вод повышенное значение температуры имеет не только вода, но и близлежащий поверхностный грунт. В работе (Горный и др., 2016) показано, что степень прогрева земной поверхности зависит от скорости подъёма подземных вод. Там, где вертикальная составляющая скорости воды выше, наблюдается повышенная температура земной поверхности. По выполненным авторами указанной работы расчётам вертикального распределения температуры пород в зависимости от скорости подземных вод, положительный температурный контраст будет наблюдаться при скорости движения водных масс 10^{-7} м/с и больше.

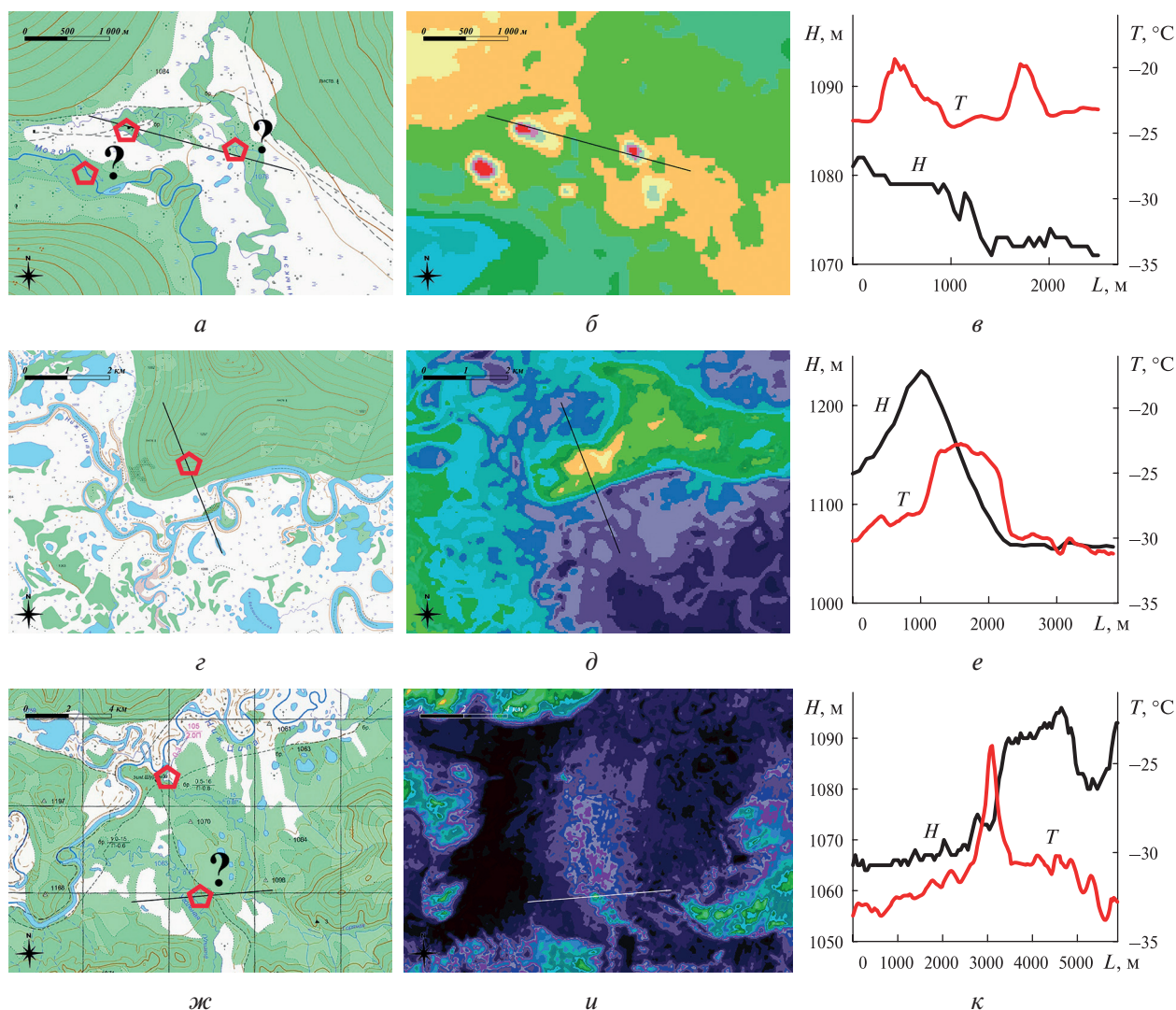


Рис. 3. Топокарта масштаба 1:200 000 (а, г, ж), снимок в инфракрасном диапазоне за 23.01.2024 (б, д, и), график температуры (Т, °С) и высоты (Н, м) (в, е, к) для термальных аномалий Баунтовской межгорной впадины: а–в — Могойский источник; г–е — температурная аномалия на склоне; ж–к — Шуриндинский источник. Пятиугольником отмечены места существующих и предполагаемых (?) термальных источников

Следует также обратить внимание на наледи, которые вносят вклад в мощность теплового излучения в инфракрасном диапазоне. В работах (Макарьева и др., 2019; Morse, Wolfe, 2015) более подробно описаны методы регистрации наледей и дано описание их некоторых параметров. Кроме налédных образований и склонов необходимо обращать внимание на техногенные объекты. Для рассматриваемой территории это отвалы разработки золотоносных россыпей.

Характеристика и местоположение термальных аномалий,
предположительно обусловленных выходами термальных вод

Предполагаемый источник	Местоположение	Характеристики термальной аномалии ΔT , °C / площадь
Могойский-1	Берег р. Могой	7 / 71 565 м ²
Могойский-2	Пойма р. Могой	5 / 409 58 м ²
Баунтовский озёрный	Берег оз. Баунт	6 / 49 450 м ²
Угольный	Пойма и русло р. Угольной	6 / 122 361 м ²
Михайловский	Устье ручья Михайловский	12 / 386 144 м ²
Уакитский	Русло р. Уакит	4 / 103 955 м ²
Амнунныкенский	Пойма ручья Амнунныкен	7 / 43 209 м ²

На основе вышеизложенного были определены наиболее доступные в транспортном отношении участки повышенного значения температуры, в которых возможны выходы термальных вод (таблица). Разность значений температуры термальной аномалии и окружающей поверхности обозначается как ΔT .

Выводы

Для поиска новых термальных источников можно использовать снимки, получаемые с летательных аппаратов (беспилотных летательных аппаратов, самолётов, искусственных спутников Земли (ИСЗ)), несущих на себе инфракрасные радиометры, фиксирующие мощность собственного теплового излучения поверхности Земли. Также можно выделить критерий для исследования термальных источников на территории Байкальской рифтовой зоны, а именно: снимки по времени зондирования должны быть зимними ввиду большего градиента температуры между возможным термальным источником и окружающей поверхностью. Следует отметить, что не для всех регионов Земли зимняя съёмка выступает актуальной. По этой причине при изучении термальных источников с использованием ИСЗ необходимо учитывать региональные особенности климата.

Формирование термальных аномалий на территории исследования происходит путём нагрева солнцем открытых склонов южной экспозиции, а также выносом эндогенного тепла земли водными потоками при излиянии термальных источников. При анализе данных по инфракрасной термометрии для разделения термальных аномалий следует учитывать особенности рельефа местности. Считаем маловероятным выход термальных вод на крутых склонах, существующие выходы приурочены к долинам и руслам рек, береговой линии озёр.

Установлено около 150 термальных аномалий. На базе термальных источников с известной температурой воды разработан алгоритм выявления самых перспективных для обнаружения гидротерм. Определено семь наиболее доступных в транспортном отношении участков термальных аномалий.

Исследования выполнены по госбюджетным темам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Литература

1. Албагачиева В. А. Условия формирования источников типа акратотерм в Северном Забайкалье. М.: Недра, 1965. 80 с.
2. 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. Т. 2. № 1. С. 20–29.

3. 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.
4. Горный В. И., Крищук 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.
5. Замана Л. В. Дейтерий и кислород-18 воды азотных терм Баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2011. № 3. С. 87–90.
6. Замана Л. В., Аскарлов Ш. А. Фтор в азотных термах Баунтовской группы (Северное Забайкалье) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2010. № 3. С. 8–12.
7. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1974. 166 с.
8. Макарьева О. М., Шихов А. Н., Остахов А. А., Нестерова Н. В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лёд и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 201–212. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-388.
9. Матушко А. К., Якубайлик О. Э. Мониторинг температуры земной поверхности территории Красноярска и окрестностей на основе спутниковых данных Landsat-8 // Успехи современ. естествознания. 2018. № 7. С. 177–182.
10. Некрасов И. А. Криолитозона Северо-Востока и Юга Сибири и закономерности ее развития. Якутск: Книж. изд-во, 1976. 246 с.
11. Оргильянов А. И., Замана Л. В., Михеев И. Е. и др. Азотные термы и углекислые воды Куанда-Эймнахского гидроминерального района (северное Забайкалье) // География и природ. ресурсы. 2021. Т. 42. № 3. С. 129–138. DOI: 10.15372/GIPR20210314.
12. Ткачук В. Г., Ясницкая Н. В., Анкудинова Г. А. Минеральные воды Бурят-Монгольской АССР. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1957. 153 с.
13. Тронин А. А., Шилин Б. В. Мониторинг шлейфов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга аэрокосмической тепловой съёмкой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 586–594.
14. Шварцев С. Л., Зинна Е. В., Борзенко С. В. Природа низкой солёности и особенности состава термальных вод провинции Цзянси (Китай) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 2. С. 243–262. DOI: 10.15372/GiG2019105.
15. Gurulev A. A., Kazantsev V. A. (2022a) The specific features of the thermal radiation of lake Kenon during freeze-up in the infrared band // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. Evolution of Biosphere and Technogenesis (2nd EBT 2021). 2022. V. 962. Article 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/962/1/012016.
16. Gurulev A. A., Kazantsev V. A. (2022b) Detección de contaminación térmica de reservorios urbanos por el método de radiometría IR en el ejemplo Del Lago Kenon, Zabaykalsky krai // Nexo Revista Científica. 2022. V. 35. Iss. 02. P. 527–532. DOI: 10.5377/nexo.v35i02.14629.
17. Morse P. D., Wolfe S. A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // J. Geophysical Research: Earth Surface. 2015. V. 120. Iss. 9. P. 1670–1686. DOI: 10.1002/2015JF003534.
18. Sekertekin A., Bonafoni S. Sensitivity Analysis and Validation of Daytime and Nighttime Land Surface Temperature Retrievals from Landsat 8 Using Different Algorithms and Emissivity Models // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 2776. DOI: 10.3390/rs12172776.
19. Vakhnina I. L., Zamana L. V. Pine radial growth in the Trans-Baikalian steppe and Taiga zones as a reflection of the climatic parameters and lake hydrological regime dynamics // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2020 Intern. Online Conf. Environmental Transformation and Sustainable Development in Asian Region, EnTransAsia 2020. IOP Publishing Ltd, 2021. Article 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012091.
20. Wan T. F. The tectonics of China. Beijing: Higher Education Press, 2012. 506 p.
21. Zheng G., Zhang G., Tan S., Feng L. Research on Progress of Forest Fire Monitoring with Satellite Remote Sensing // Agricultural and Rural Studies. 2023. V. 1. No. 2. Article 0008. DOI: 10.59978/ar01020008.

Identification of thermal springs using space research

A. A. Gurulev, L. V. Zamana, A. P. Kuklin, V. A. Kazantsev

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
Chita 672014, Russia*

E-mails: sansang@mail.ru, l.v.zamana@mail.ru, kap0@mail.ru, slava11545@gmail.com

Currently, the method of space detection of places with elevated surface temperatures on planet Earth in the thermal infrared range has become widespread for practical purposes. With its help, places of man-made and natural fires are identified, thermal pollution of water bodies is assessed. Thermal anomalies of natural origin are formed, among other things, by thermal springs, but not all thermal springs have a coordinate reference, and for some only their names are known. The objects of the study are the thermal anomalies of the Baunt basin within the Baikal rift zone. The purpose of this work is to determine the outlet locations of thermal mineral springs based on the object's own thermal radiation in the thermal infrared range in the wavelength range of 10.60–11.19 μm . The research objectives of this work included the identification of the optimal time of year and interfering factors for determining the outlet locations of thermal springs by their own thermal radiation in the thermal infrared range; testing this method for known objects under study. As a result, a spatiotemporal assessment of the areas of thermal anomalies recorded from the Landsat-8 satellite was carried out. About 15 thermal anomalies have been identified. An algorithm for estimating temperature anomalies and identifying the most promising places for detecting hydrotherms has been developed based on known thermal springs. The 7 best transportation-accessible sites of thermal anomalies have been identified. The data obtained make it possible to monitor thermal springs using remote sensing methods for these objects and their impact on the environment.

Keywords: thermal sources, thermal infrared range, space images, Landsat-8, remote sensing

Accepted: 10.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140

References

1. Albagachieva V. A., *Usloviya formirovaniya istochnikov tipa akratoterm v Severnom Zabaykal'e* (Conditions for the formation of akratoterm-type springs in Northern Transbaikalia), Moscow: Nedra, 1965, 80 p. (in Russian).
2. Belyaev A. I., Korovin G. N., Loupian E. A., Use of satellite data in the system of remote monitoring of forest fires of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 1, pp. 20–29 (in Russian).
3. Gornyy V. I., Seleznev G. A., Tronin A. A., Application of infrared-thermal satellite flown survey on the low temperature thermal water exploration, *Razvedka i okhrana nedr*, 2016, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
4. 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, Vol. 19, No. 3, pp. 23–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
5. Zamana L. V., Deuterium and oxygen-18 of nitrogen therms water of Baunt group (Baikal Rift Zone), *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, No. 3, pp. 87–90 (in Russian).
6. Zamana L. V., Askarov Sh. A., Fluorine in nitric therms of Bauntuntovskaya group (Northern Zabaikalie), *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, No. 3, pp. 8–12 (in Russian).
7. Lomonosov I. S., *Geokhimiya i formirovanie sovremennykh gidroterm Baykal'skoi riftovoi zony*, Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1974, 166 p. (in Russian).
8. Makarieva O. M., Shikhov A. N., Ostashov A. A., Nesterova N. V., Icings of the Indigirka river basin according to the recent Landsat satellite images and historical data, *Led i Sneg*, 2019, Vol. 59, No. 2, pp. 201–212 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-388.
9. Matuzko A. K., Yakubailik O. E., Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based in Landsat-8 satellite data, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, No. 7, pp. 177–182 (in Russian).
10. Nekrasov I. A., *Kriolitizona Severo-Vostoka i Yuga Sibiri i zakonomernosti ee razvitiya* (Permafrost zone of the North-East and South of Siberia and patterns of its development), Yakutsk: Book Publ. House, 1976, 246 p. (in Russian).

11. Orgilyanov A. I., Zamana L. V., Mikheev I. E. et al., Nitrogen therms and carbonic waters of the Kuanda-Eimnakch hydromineral region (Northern Transbaikalia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2021, Vol. 42, No. 3, pp. 129–138 (in Russian), DOI: 10.15372/GIPR20210314.
12. Tkachuk V. G., Yasnitskaya N. V., Ankudinova G. A., *Mineral'nye vody Buryat-Mongol'skoi ASSR* (Mineral waters of the Buryat-Mongolian Autonomous Soviet Socialist Republic), Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izd., 1957, 153 p. (in Russian).
13. Tronin A. A., Shilin B. V., Monitoring of plumes from municipal wastewater treatment plants of Saint Petersburg using aerospace thermal imaging, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 586–594 (in Russian).
14. Shvartsev S. L., Zippa E. V., Borzenko S. V., The nature of low salinity and composition peculiarities of thermal waters in Jiangxi Province (China), *Russian Geology and Geophysics*, 2020, Vol. 61, No. 2, pp. 196–213, DOI: 10.15372/RGG2019105.
15. Gurulev A. A., Kazantsev V. A. (2022a), The specific features of the thermal radiation of lake Kenon during freeze-up in the infrared band, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, Evolution of Biosphere and Technogenesis (2nd EBT 2021)*, 2022, Vol. 962, Article 012016, DOI: 10.1088/1755-1315/962/1/012016.
16. Gurulev A. A., Kazantsev V. A. (2022b), Detección de contaminación térmica de reservorios urbanos por el método de radiometría IR en el ejemplo Del Lago Kenon, Zabaykalsky krai, *Nexo Revista Científica*, 2022, Vol. 35, Issue 02, pp. 527–532, DOI: 10.5377/nexo.v35i02.14629.
17. Morse P. D., Wolfe S. A., Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada, *J. Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, Vol. 120, Issue 9, pp. 1670–1686, DOI: 10.1002/2015JF003534.
18. Sekertekin A., Bonafoni S., Sensitivity Analysis and Validation of Daytime and Nighttime Land Surface Temperature Retrievals from Landsat 8 Using Different Algorithms and Emissivity Models, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 2776, DOI: 10.3390/rs12172776.
19. Vakhnina I. L., Zamana L. V., Pine radial growth in the Trans-Baikalian steppe and Taiga zones as a reflection of the climatic parameters and lake hydrological regime dynamics, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, 2020 Intern. Online Conf. Environmental Transformation and Sustainable Development in Asian Region, EnTransAsia, 2020*, IOP Publishing Ltd, 2021, Article 012091, DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012091.
20. Wan T. F., *The tectonics of China*, Beijing: Higher Education Press, 2012, 506 p.
21. Zheng G., Zhang G., Tan S., Feng L., Research on Progress of Forest Fire Monitoring with Satellite Remote Sensing, *Agricultural and Rural Studies*, 2023, Vol. 1, No. 2, Article 0008, DOI: 10.59978/ar01020008.