К вопросу об уходящем тепловом инфракрасном излучении земной поверхности в зонах сейсмоактивных разломов северо-западного побережья оз. Байкал

М.А. Вилор¹, О.В. Лунина², А.А. Гладков^{1,2}

¹ ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей» Иркутск, 664007, Россия E-mail: sentfool@gmail.com ² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, Россия E-mail: lounina@crust.irk.ru

В статье рассматривается опыт применения теплоинерционного подхода как частного случая тепловой космической съёмки в определении особенностей распределения уходящего теплового инфракрасного излучения земной поверхности в зонах сейсмоактивных разломов северо-западного побережья оз. Байкал. Приведён обзор литературы по методам исследования уходящего теплового инфракрасного излучения земной поверхности в России и в мире. Авторами по методике тепловой космической съёмки были отобраны безоблачные ночные сцены ASTER/Terra за январь – февраль 2005 г. для исключения влияния тепловой инерции в спектральном диапазоне 11 мкм с разрешением 90 м. По формуле Планка рассчитана яркостная температура земной поверхности с предварительной рекалибровкой изображений. Для трёх участков западного Прибайкалья с использованием программных продуктов OGIS и Global Mapper построены тепловые карты поверхности, для чего были использованы базы данных со значениями яркостной температуры (как наилучшей характеристики уходящего поверхностного теплового потока). Исходя из анализа и интерпретации полученных результатов с применением дополнительных материалов (мультиспектральные космические снимки Spot-6 с комбинацией каналов 4-3-2), авторы пришли к выводу о том, что с рядом крупных разломов северо-западного побережья оз. Байкал ассоциируются аномалии теплового инфракрасного излучения, однако последние практически всегда совпадают с зонами густой растительности (залесённые территории).

Ключевые слова: тепловая космическая съёмка, ASTER, Spot-6, уходящее тепловое инфракрасное излучение, плиоцен-четвертичные разломы, оз. Байкал

Одобрена к печати: 11.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-66-75

Введение

На глубинах 20-40 м земной поверхности располагается нейтральный слой (или зона постоянных годовых температур). В нём температура остаётся практически постоянной и в каждом районе в среднем на 3,7 °С выше среднегодовой температуры воздуха. Ниже нейтрального слоя температура пород повышается в среднем на 3 °С при погружении на каждые 100 м. Это объясняется наличием регионального теплового потока от источников внутреннего тепла Земли, поднимающегося к поверхности (Хмелевской, 1997). Его величину принято характеризовать плотностью теплового потока (или просто тепловым потоком), который является основным источником информации о тепловом состоянии Земли и энергетике происходящих в ней процессов (Лысак, 1988). Среднее значение теплового потока как на суше, так и в океанах одинаково и составляет $0,06 \text{ Bt} \cdot \text{m}^{-2}$ с отклонением от него не более чем в 5–7 раз. В результате образования активных тектонических структур изменяется распределение глубинной температуры. На проницаемых участках земной коры, особенно в зонах гидротермальной активности и вулканизма, наблюдается общее повышение температуры и тепловых потоков. Тепловая космическая съёмка (ТКС) в комплексе с визуальным дешифрированием данных дистанционного зондирования и анализом теплофизических параметров земной поверхности позволяет изучить и оценить вклад уходящего теплового инфракрасного излучения в областях динамического влияния сейсмоактивных разломов (Горный и др., 2016).

Цель настоящего исследования — определить особенности распределения теплового инфракрасного излучения земной поверхности в зонах сейсмоактивных разломов северо-западного побережья оз. Байкал с использованием методов дистанционного зондирования Земли.

Методы и материалы

Регулярные и общедоступные данные о тепловом излучении в инфракрасном диапазоне поступают с конца 1970-х гг. от спутников серии NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) (радиометр AVHRR (англ. Advanced Very-High-Resolution Radiometer)), спутников Landsat-7 (запуск 1999 г., радиометр ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus)), а также со спутников серии EOS (англ. Earth Observing System) (запуск с 1999 г., радиометры MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и ASTER (англ. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)).

В англоязычной литературе по обработке данных о тепловом излучении поверхности Земли преимущественно рассматривается подход, который весьма обширно распространён в разных регионах и часто применяется в вулканологии (Bonneville, Kerr, 1987; Bonneville et al., 1985; Murphy et al., 2011; Pieri, Abrams, 2004, 2005). К примеру, по данным радиометра ASTER тепловые аномалии на склонах вулканов определяются как предвестники извержений. В работах М. Ф. Кулбау (М. F. Coolbaugh) с коллегами из Университета Невады (*англ.* University of Nevada) были использованы методы обнаружения температурных аномалий с использованием тепловых снимков ASTER и цифровых моделей рельефа на территории геотермальной электростанции Брэди Хот Спрингс в штате Невада, США (Brady Hot Springs, Nevada, USA) (Coolbaugh et al., 2007).

Яркостная температура как характеристика теплового потока частично зависит от излучательной способности поверхности. Низкие показатели излучательной способности уменьшают значения яркостной температуры, измеренной тепловым сенсором радиометра ASTER (Sabins, 1978, р. 119–124), однако наличие пяти тепловых каналов у ASTER позволяет рассчитать истинные значения температуры (Coolbaugh et al., 2007). В более поздних публикациях тех же авторов данные ASTER были использованы в сочетании с данными радиометра MODIS, что позволило выявить фоновые изменения и сезонные эффекты для лучшего определения геотермальных аномалий. Было отмечено, что данные ASTER с пространственным разрешением 90 м могут быть использованы для расчёта яркостного теплового потока, в то время как данные MODIS с разрешением 1 км — для производства композитных изображений с целью регистрации фоновых температурных вариаций (Vaughan et al., 2012). В русскоязычной литературе наиболее значимыми являются труды сотрудников Научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН под руководством Б. В. Шилина и В. И. Горного (Горный и др., 1993; Шилин, 1980), в презентациях последнего на ежегодных конференциях Института космических исследований РАН обоснованно указывается концептуальная связь распределения усреднённого поверхностного потока инфракрасного излучения с глубинным земным тепловым потоком.

Тепловая инерция любого материала, в свою очередь, оказывается функцией его теплоёмкости, плотности и теплопроводности (Mellon et al., 2000; Putzig, 2006). Теплоёмкость отношение количества теплоты, сообщённого телу, к соответствующему повышению температуры. Теплопроводность — процесс распространения теплоты от более нагретых элементов тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры (Паффенгольц, 1978). Следовательно, если другие факторы равны между собой, то значения суточной температуры поверхности будут одинаковы для материалов с другими значениями тепловой инерции (Elachi, Van Zyl, 1987). С увеличением тепловой инерции уменьшается суточный перепад температуры поверхности, т. е. она медленно нагревается днём и медленно остывает ночью. Вследствие этого утром и вечером (два раза в сутки) происходит инверсия (смена знака) тепловых аномалий между поверхностями с разной тепловой инерцией. В момент инверсии эти контрасты (аномалии) равны нулю, а после быстро возрастают с увеличением показателей инсоляции. В реальных условиях тепловая инерция каждого типа горных пород изменяется в широких пределах, а значит, оценка возможностей ТКС как метода идентификации объектов по тепловой инерции носит статистический характер (Горный и др., 1993).

В данной работе по методике ТКС (Горный и др., 1993) были отобраны безоблачные ночные сцены сенсора ASTER спутника Terra за январь – февраль 2005 г. для исключения влияния тепловой инерции в спектральном диапазоне 11 мкм с разрешением 90 м.

Среднемасштабные продукты ASTER L1T получены из базы данных Геологической службы США (United States Geological Survey — USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov). Снимки охватывают территорию как земной поверхности прибрежной части оз. Байкал, так и водной.

С помощью программного комплекса ENVI (*англ.* Environment for visualizing images) отобранные безоблачные ночные изображения ASTER/Terra (6 снимков с января по февраль 2005 г.) были предварительно рекалиброваны, при этом использовались калибровочные коэффициенты (Meyer et al., 2015), соответствующие длине волны 11 мкм, и формула:

$$F = (L - 1)$$
UCC BT·M⁻²·MKM·cp,

где *F* — яркостный поток; *L* — яркость; UCC — калибровочный коэффициент, представленный в виде:

UCC =
$$5,225 \cdot 10^{-3}$$
 BT·m⁻²·MKM·cp.

Яркостная радиационная температура подспутниковой поверхности *T* (К) вычислена по формуле Планка (Госсорг, 1988).

Полученные изображения с вычисленной яркостной температурой были конвертированы в файлы базы данных Excel.

Картирование аномалий инфракрасного излучения с использованием данных радиометра ASTER в диапазоне 11 мкм было проведено на трёх ключевых участках западного Прибайкалья.

В итоге для трёх участков западного Прибайкалья с помощью программных продуктов QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information Systems) и Global Mapper построены тепловые карты поверхности, при этом использовались базы данных со значениями яркостной температуры как наилучшей характеристики уходящего поверхностного теплового потока согласно теплоинерционному подходу как частному случаю ТКС (Горный и др., 1993). Данные карты были сопоставлены с цифровой картой разломов на Байкальский регион (Лунина, 2016) (http://activetectonics.ru).

Результаты и их обсуждение

На участке № 1 (координаты углов: западный — 105,97591° в.д., 53,59002° с.ш.; северный — 106,92230° в.д., 53,74246° с.ш.; восточный — 107,45964° в.д., 52,68571° с.ш.; южный — 106,53463° в.д., 52,53602° с.ш.), включающем крупнейшие Приморский и Ольхонский разломы, среднее значение яркостной температуры составляет 247,4±3,3 К, минимум температуры — 235,8 К, максимум — 257,1 К (*рис. 1*, см. с. 69).

В зоне динамического влияния Приморского разлома регистрируются повышенные значения радиационной температуры земной поверхности, варьирующиеся от 246 до 251 K, образуя прибрежную приразломную термозону. Приразломная термозона простирается от оз. Сурхайтор-Нур на севере до пересечения с р. Кучулга на юге с минимумами в конусах выноса р. Улан-Хан (245,4 K) и р. Сарма (245,8 K).

От р. Кучулга до устья р. Сарма приразломные термомаксимумы регистрируются на высотах 640—800 м, местами расширяясь к берегу до изогипсы 520 м. Локально выделяются максимумы со средними показателями температуры на отметках со значениями 520 м, как, например, на лесных массивах вблизи местности Шида (247,3–247,8 К) и северно-восточнее (247,3–247,8 К). На данном отрезке приразломной зоны в Сарминском ущелье выделяются экстремумы на юго-западном склоне речной долины со значениями в диапазоне 251–253,2 К.



Рис. 1. Тепловая карта распределения яркостной температуры земной поверхности по данным ASTER/Terra на участке № 1

В районе р. Сарма-оз. Сурхайтор-Нур приразломные тепловые аномалии (251–252 К) распространяются на высотах 680–900 м с локальными расширениями до 1000 м на северозападной границе.

Аномальные повышения температуры земной поверхности вне приразломной термозоны — до 253,3 К — локализуются северо-западнее Приморского разлома, образуя северную термозону с минимумами (239,7–243,3 К) в долинах рек Левая Иликта и Правая Иликта с их притоками. Экстремумы термоминимума (236,8 К) центральной термозоны отмечены в северо-западной области в районе д. Копылова, с. Заречное и с. Манзурка (Качугский р-н) на заболоченном участке платформенной части ниже 580 м. Экстремум термомаксимума (253,5 К) центральной термозоны отмечается в междуречье рек Белёта и Средняя Белёта на высокогорном участке Приморского хребта вдоль изогипсы 1100 м. На той же высоте прочие повышенные значения (251,1–251,7 К) яркостной температуры земной поверхности сосредоточены по горным лесным массивам, местами спускаясь до изогипсы 900 м.

На участке № 2 (координаты углов: западный — 107,39582° в.д., 54,37529° с.ш.; северный — 108,33499° в.д., 54,51179° с.ш.; восточный — 108,84553° в.д., 53,45182° с.ш.; южный — 107,93161° в.д., 53,31736° с.ш.) в пределах береговой зоны северо-западного побережья оз. Байкал главными структурами являются Кочериковский и Северобайкальский разломы. Среднее значение яркостной температуры на ключевом участке составляет 242,6±2,3 К, минимум температуры — 228,3 К, максимум — 251,7 К (*puc. 2*, см. с. 70).

В прибрежных сегментах участка на высоте около 500 м расположены минимумы в разветвлении р. Кочерикова вблизи одноимённой деревни (236,4 К) и урочища Малое Кочериково (236,4 К), а также в глубинной части материка к северу от д. Кочерикова на перевале Плоский (236,4 К). Прочие выделяющиеся термоминимумы на основной исследуемой территории ключевого участка связаны с долинами наиболее крупных рек, таких как Лена с притоками (231,1 К), с верховыми болотами на высотах 1100–1200 м на р. Глубокой (228,7 К) и севернее на р. Левая Тогонда (228,7 К).



Рис. 2. Тепловая карта распределения яркостной температуры земной поверхности по данным ASTER/Terra на участке № 2

Прибрежный термомаксимум с линейной структурой, вытянутый вдоль зоны динамического влияния Кочериковского разлома (247–277,9 К), расположен на высотах 620–1200 м, местами возвышаясь до 1600 м. Отдельный экстремум замечен в ущелье р. Риты севернее конуса выноса (250,8 К) на высоте около 900 м.

В зоне динамического влияния Северобайкальского разлома севернее конуса выноса р. Шартлай область аномальных повышенных значений температуры земной поверхности (247,4–251,2 K) выравнивается и простирается непосредственно вдоль разлома до крайней северной стороны ключевого участка (бухта Заворотная) и совпадает с его положением на высотах 600–900 м, периодами поднимаясь до 1200 м.

Залесённые участки северной и северно-западной части исследуемого участка выделяются повышенными значениями яркостной температуры земной поверхности (247,3–247,8 К).

Участок № 3 (координаты углов: западный — 108,36664° в.д.; 55,40599° с.ш., северный — 109,32627° в.д., 55,54881° с.ш.; восточный — 109,60355° в.д., 55,01262° с.ш.; южный — 108,64977° в.д., 54,87148° с.ш.) ограничен предполагаемым Болсодейским разломом с южной стороны и Кичерским — с северной. Также на его территории расположены крупные дизъюнктивы — Северобайкальский, Болсодей-Рельский, Акитканский. Среднее значение яркостной температуры на ключевом участке составляет 245,1±1,6 К, минимум температуры — 238,3 К, максимум — 251,8 К (*рис. 3*, см. с. 71).

На южной стороне участка № 3 (на сегменте м. Болсодей – м. Котельниковский) выделяется область повышенных значений температуры, которая простирается вдоль долины р. Молокон на высоте 700–900 м в зоне динамического влияния Северобайкальского разлома (247,3–247,9 К). Кроме того, выделяется обширная площадь повышенной температуры (247,3–247,9 К) в приразломной зоне близ м. Котельниковский и разлома Горячий. Область представляет собой залесённую территорию с небольшим заболоченным участком в долине р. Горячей, с которым связан локальный термоминимум (244,6 К), на высоте около 600 м. Конус выноса р. Куркулы с термальным курортом «Котельниковский» в плане температурных значений на данном снимке никак не выделяется. Залесённые участки в приразломной зоне Севернобайкальского разлома от м. Котельниковский до с. Байкальское выделяются повышенными значениями (247,1–247,9 K) на высотах 600–900 м.



Рис. 3. Тепловая карта распределения яркостной температуры земной поверхности по данным ASTER/Terra на участке № 3



Рис. 4. Сравнение яркостной температуры земной поверхности и мультиспектральной съёмки на участке № 1 в районе Сарминской палеосейсмодислокации: *a* — ASTER/Terra; *б* — Spot-6 MS

На северо-восточной стороне ключевого участка на заболоченных областях междуречий Слюдянки, Рели и Горемыки отмечены протяжённые термоминимумы (238,4–242,7 К), простирающиеся от берега оз. Байкал до западной части снимка с охватом большей части территории между разломами Болсодей-Рельский и Акитканский (Краевой).

Анализ распределения изучаемого параметра на всех трёх участках и их сопоставление с изображениями земной поверхности, полученными с космических снимков, показывает, что значительная часть территории, на которой зарегистрирована яркостная температура земной поверхности со значениями выше среднего, покрыта густой лесной растительностью. Так, например, на участке № 1 на высоте 1100 м повышенные значения (251,1–251,7 К) яркостной температуры земной поверхности сосредоточены по горным лесным массивам, местами спускаясь до изогипсы 900 м. Для проверки этого вывода на указанной территории в качестве дополнительного материала использованы мультиспектральные продукты Spot-6 с комбинацией каналов 4-3-2 (Жиленев, 2009), позволяющие выделять зоны с густой растительностью, где хвойная проявляется тёмно-красными и коричневыми тонами (рис. 4, см. с. 71). Залесённые территории участка № 2 выделяются повышенными значениями яркостной температуры земной поверхности (247,3-247,8 К) как в зонах динамического влияния разломов, так и вне их на Сибирской платформе. На участке № 3 показательным является обширный по площади термоминимум, совпадающий с высокими незалесёнными вершинами и склонами Байкальского хребта. Это свидетельствует о том, что абсолютные отметки рельефа в меньшей степени влияют на особенности распределения уходящего теплового инфракрасного излучения по сравнению с другими факторами.

Заключение

Проведённые исследования распределения уходящего теплового инфракрасного излучения земной поверхности вдоль северо-западного побережья оз. Байкал и на сопредельных территориях, включающих ряд крупных сейсмоактивных разломов, позволили сделать следующие основные выводы:

- 1. Крупные сейсмоактивные разломы северо-западного побережья оз. Байкал ассоциируются с аномалиями теплового инфракрасного излучения, однако последние практически всегда совпадают с густой залесённостью этих территорий.
- 2. Учитывая, что повышенные значения яркостной температуры появляются и вне зон дизъюнктивов, в местах плотной, преимущественно хвойной растительности и отсутствуют в пределах голых склонов и вершин Байкальского хребта, при исследовании распределения приразломной составляющей теплового баланса земной поверхности на горных залесённых территориях следует учитывать густоту растительности как один из ключевых факторов влияния на тепловое инфракрасное излучение.
- 3. Абсолютные отметки рельефа не оказывают заметного влияния на особенности распределения уходящего теплового инфракрасного излучения.
- 4. Для выделения эндогенной составляющей тепла на термокартах необходимы систематические методические исследования в различных природных и геодинамических обстановках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской обл. в рамках научного проекта № 20-45-385001 р_Наставник.

Литература

- 1. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
- 2. Горный В.И., Селезнев Г.А., Тронин А.А. Применение тепловой космической съемки для поисков слаботермальных вод // Разведка и охрана недр. 2016. № 1. С. 49–57.
- 3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография: основы, техника, применение: пер. с фр. М.: Мир, 1988. 416 с.

- 4. *Жиленев М. Ю*. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке // Геоматика. 2009. № 3. С. 56–64. URL: http://geomatica.ru/pdf/2009_03/2009_03.pdf.
- 5. Лунина О. В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434. DOI: http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215.
- 6. *Лысак С. В.* Тепловой поток континентальных рифтовых зон. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1988. 200 с.
- 7. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры: курс лекций. 1997. URL: http://geo.web.ru/db/msg.html?uri=page47.html&mid=1161636.
- 8. *Шилин Б. В.* Тепловая аэросъемка при изучении природных ресурсов. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 247 с.
- 9. *Bonneville A., Kerr Y. H.* A thermal forerunner of the March 28th 1983 Mt Etna eruption from satellite thermal infrared data // J. Geodynamics. 1987. V. 7. Iss. 1–2. P. 1–31. DOI: https://doi.org/10.1016/0264-3707(87)90061-5.
- Bonneville A., Vasseur G., Kerr Y. H. Satellite thermal infrared observations of Mt Etna after the 17th March 1981 eruption // J. Volcanology and Geothermal Research. 1985. V. 24. Iss. 3–4. P. 293–313. DOI: https:// doi.org/10.1016/0377-0273(85)90074-5.
- Coolbaugh M. F., Kratt C., Fallacaro A., Calvin W. M., Taranik J. V. Detection of geothermal anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 106. Iss. 3. P. 350–359. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.001.
- 12. *Elachi C., Van Zyl J.* Introduction to the physics and techniques of remote sensing. N.Y.: John Wiley and Sons, 2006. V. 28. 552 p. DOI: 10.1002/0471783390.
- Meyer D., Siemonsma D., Brooks B., Johnson L. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance (AST_L1T) Product, algorithm theoretical basis document. U.S. Geological Survey Open-File Report 2015–1171. 2015. 44 p. DOI: http://dx.doi.org/10.3133/ofr20151171.
- 14. *Murphy S. W., de Souza Filho C. R., Oppenheimer C.* Monitoring volcanic thermal anomalies from space: size matters // J. Volcanology and Geothermal Research. 2011. V. 203. Iss. 1–2. P. 48–61. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.04.008.
- Pieri D., Abrams M. ASTER watches the world's volcanoes: a new paradigm for volcanological observations from orbit // J. Volcanology and Geothermal Research. 2004. V. 135. Iss. 1–2. P. 13–28. DOI: https://doi. org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.018.
- Pieri D., Abrams M. ASTER observations of thermal anomalies preceding the April 2003 eruption of Chikurachki volcano, Kurile Islands, Russia // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 99. Iss. 1–2. P. 84–94. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.06.012.
- 17. *Sabins F. F., Jr.* Remote Sensing: Principles and interpretation // The Geographical J. 1987. V. 153. No. 3. P. 423–425.
- Vaughan R. G., Keszthelyi L. P., Lowenstern J. B., Jaworowski C., Heasler H. Use of ASTER and MODIS thermal infrared data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park // J. Volcanology and Geothermal Research. 2012. V. 233–234. P. 72–89. DOI: https://doi.org/10.1016/j. jvolgeores.2012.04.022.

On the issue of outgoing thermal infrared radiation of the Earth's surface in the zones of seismically active faults of the north-west coast of Lake Baikal

M.A. Vilor¹, O.V. Lunina², A.A. Gladkov^{1,2}

¹ State Autonomous Institution for Supplementary Education of the Irkutsk Region "Center for the Development of Supplementary Education of Children" Irkutsk 664007, Russia E-mail: sentfool@gmail.com
² Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk 664033, Russia E-mail: lounina@crust.irk.ru

The paper reviews the experience of using the thermal inertia approach as a special case of thermal satellite imagery in determining the distribution features of the outgoing thermal infrared radiation of the Earth's surface in the zones of seismically active faults of the north-west coast of Lake Baikal. A review of the literature on the methods of studying the outgoing thermal infrared radiation of the Earth's surface in Russia and in the world is presented. The authors selected cloudless night scenes of ASTER/Terra for January – February 2005 using the method of thermal space survey to exclude the influence of thermal inertia in the spectral range of 11 microns with a resolution of 90 m. According to the Planck formula, the brightness temperature of the Earth's surface is calculated with preliminary recalibration of images. Heat maps of the surface were constructed for three sections of the western Baikal region using OGIS and Global Mapper software products, for which databases with brightness temperature values were used (as the best characteristic of the outgoing surface heat flow). Based on the analysis and interpretation of the results obtained with the use of additional materials (multispectral satellite images Spot-6 with a combination of bands 4-3-2), the authors came to the conclusion that anomalies of thermal infrared radiation are associated with a number of large faults on the northwest coast of Lake Baikal, but the latter almost always coincide with zones of dense vegetation (forested areas).

Keywords: thermal space survey, ASTER, Spot-6, outgoing thermal infrared radiation, Pliocene-Quaternary faults, Lake Baikal

Accepted: 11.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-66-75

References

- 1. Gornyy V.I., Shilin B.V., Yasinskii G.I., *Teplovaya aerokosmicheskaya s"emka* (Thermal aerospace imagery), Moscow: Nedra, 1993, 128 p. (in Russian).
- 2. 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. 49–57 (in Russian).
- 3. Gaussorgues G., La Thermographie Infrarouge, Paris: Technique et Documentation, 1984, 586 p.
- 4. Zhilenev M. Yu., An overview of the application of multispectral remote sensing data and their combinations in digital processing, *Geomatika*, 2009, No. 3, pp. 56–64, available at: http://geomatica.ru/pdf/2009_03/2009_03.pdf (in Russian).
- 5. Lunina O.V., The digital map of the Pliocene-Quaternary crustal faults in the Southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2016, Vol. 7(3), pp. 407–434 (in Russian), DOI: http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215.
- 6. Lysak S.V., *Teplovoi potok kontinental'nykh riftovykh zon* (Heat flow of continental rift zones), Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1988, 200 p. (in Russian).
- 7. Khmelevskoi V.K., *Geofizicheskie metody issledovaniya zemnoi kory: kurs lektsii* (Geophysical methods for studying the earth's crust: course of lectures), 1997, available at: http://geo.web.ru/db/msg. html?uri=page47.html&mid=1161636 (in Russian).
- 8. Shilin B.V., *Teplovaya aeros" emka pri izuchenii prirodnykh resursov* (Thermal aerial photography in the study of natural resources), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 247 p. (in Russian).
- 9. Bonneville A., Kerr Y. H., A thermal forerunner of the March 28th 1983 Mt Etna eruption from satellite thermal infrared data, *J. Geodynamics*, 1987, Vol. 7, Issue 1–2, pp. 1–31, DOI: https://doi.org/10.1016/0264-3707(87)90061-5.

- Bonneville A., Vasseur G., Kerr Y.H., Satellite thermal infrared observations of Mt Etna after the 17th March 1981 eruption, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 1985, Vol. 24, Issue 3–4, pp. 293–313, DOI: https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90074-5.
- Coolbaugh M. F., Kratt C., Fallacaro A., Calvin W. M., Taranik J. V., Detection of geothermal anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 106, Issue 3, pp. 350–359, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.001.
- 12. Elachi C., Van Zyl J., *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*, New York: John Wiley and Sons, 2006, Vol. 28, 552 p., DOI: 10.1002/0471783390.
- Meyer D., Siemonsma D., Brooks B., Johnson L., Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance (AST_L1T) Product, algorithm theoretical basis document, U.S. Geological Survey Open-File Report 2015-1171, 2015, 44 p., DOI: http:// dx.doi.org/10.3133/ofr20151171.
- Murphy S. W., de Souza Filho C. R., Oppenheimer C. Monitoring volcanic thermal anomalies from space: size matters, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2011, Vol. 203, Issue 1–2, pp. 48–61, DOI: https:// doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.04.008.
- 15. Pieri D., Abrams M., ASTER watches the world's volcanoes: a new paradigm for volcanological observations from orbit, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2004, Vol. 135, Issue 1–2, pp. 13–28, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.018.
- Pieri D., Abrams M., ASTER observations of thermal anomalies preceding the April 2003 eruption of Chikurachki volcano, Kurile Islands, Russia, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 99, Issue 1–2, pp. 84–94, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.06.012.
- 17. Sabins F. F., Jr., Remote Sensing: Principles and interpretation, *The Geographical J.*, 1987, Vol. 153, No. 3, pp. 423–425.
- Vaughan R. G., Keszthelyi L. P., Lowenstern J. B., Jaworowski C., Heasler H., Use of ASTER and MODIS thermal infrared data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2012, Vol. 233–234, pp. 72–89, DOI: https://doi.org/10.1016/j. jvolgeores.2012.04.022.