# Геопространственный анализ техногенно-нарушенных экосистем Средней Сибири по спутниковым данным в ИК-диапазоне

К. В. Краснощеков<sup>1</sup>, А. В. Дергунов<sup>1</sup>, Т. В. Пономарева<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия E-mail: krasko@icm.krasn.ru

<sup>2</sup> Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия E-mail: bashkova\_t@mail.ru

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Работа посвящена исследованию изменения состояния растительного и почвенного покрова на техногенно-нарушенных участках различных типов в пределах Красноярского края за период с 2000 по 2021 г. Выделено четыре исследуемых речных бассейна: рек Енашимо, Панимбы, Норильской и Барги, на которых располагаются различные техногенные объекты (карьеры, хвостохранилища, отвалы). В целях детектирования повреждённых участков в виде аномалий на тепловых картах поверхности в работе использовались данные в тепловом ИК-диапазоне прибора MODIS/Terra (продукт MOD11A1). Разработана методика выявления нарушенных участков на тепловых картах исследуемых территорий, основанная на сравнении предполагаемых нарушенных участков с фоновыми ненарушенными областями. Данная методика применена как для точечного анализа выбранных техногенных объектов, так и для площадей в границах выбранных речных бассейнов. Анализ данных показал, что на всех четырёх исследуемых территориях температура поверхности превышает фоновую в среднем на 1,5°. Продемонстрирована динамика изменения состояния подстилающей поверхности на исследуемых территориях за 20-летний период. На техногенно-нарушенных территориях в бассейне р. Панимбы не наблюдается значительных изменений состояния подстилающей поверхности за исследованный период. В пределах бассейнов рек Енашимо и Норильской детектируется увеличение площади нарушенной подстилающей поверхности, а в границах бассейна р. Барги, наоборот, наблюдается положительная динамика восстановления растительного и почвенного покрова, в том числе благодаря рекультивации нарушенных поверхностей. Применение данных дистанционного зондирования как для идентификации локального техногенного нарушения, так и для определения доли нарушенных участков позволит получать более объективные оценки антропогенной нагрузки на экосистемы для конкретных промышленных территорий.

Ключевые слова: техногенные объекты, речной бассейн, тепловая карта поверхности, криолитозона, Сибирь, температурные аномалии поверхности, нарушенность растительности

Одобрена к печати: 02.06.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-203-216

# Введение

Красноярский край обладает большими запасами различных минерально-сырьевых ресурсов, которых насчитывается более 80 видов. В разведанных на территории края месторождениях запасы золота составляют порядка 20,3 % ресурсов золота России. Угледобывающая промышленность насчитывает 250 месторождений и запасы 69 млрд т при мощности добычи 60 млн т угля в год. Месторождения Норильского р-на обеспечивают производство цветных и редких металлов: добыча меди составляет 71 % от общероссийской, добыча никеля — 81 %, кобальта — 50 %, платиноидов — 98 %. Нефтегазодобывающая промышленность насчитывает 37 месторождений (Вохмина, Чернецкая, 2020). Промышленное освоение территории и добыча полезных ископаемых приводит к деструктивному воздействию на природную среду комплекса различных факторов, связанных с техногенной активностью. В различных районах Красноярского края наблюдается значительное длительное негативное влияние техногенного фактора на почвенный и растительный покров. В связи с этим возникает необходимость

осуществлять контроль и мониторинг нарушенных площадей. Одним из наиболее эффективных инструментов мониторинга состояния окружающей среды становятся космические средства наблюдения. Работа с многолетними многоспектральными спутниковыми данными позволяет проводить мониторинг состояния подстилающей поверхности (Барталев и др., 2015; Ponomareva et al., 2021).

Нарушения верхних горизонтов почв имеют свои дешифровочные признаки, по которым их можно идентифицировать на продуктах космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Традиционно для этой задачи используют данные различных спутников серии Landsat, Sentinel-2, «Канопус-В», PlanetScope. Повреждения поверхности в лесной зоне детектируются по спектральным характеристикам, форме, занимаемой площади и т.д. (Сорріп, Bauer, 1996; Häme, 1991).

Оценка степени повреждения растительности может осуществляться различными методами классификации информации на космическом снимке. В работах (Воробьев, Курбанов, 2017; Воробьев и др., 2016) приводится пример неуправляемой классификации (классификация без обучения). Также широко используется метод управляемой классификации (классификация с обучением) (Курбанов и др., 2011). Одним из новых способов классификации нарушенных и неповреждённых участков выступает распознавание с помощью нейронных сетей (Тарасов, 2020; Тарасов и др., 2021).

Часто величину изменения состояния древостоя оценивают путём обработки и анализа разновременных снимков исследуемой территории в вегетационный период (Терехин, 2017, 2019а, б). Другой подход предлагает проанализировать динамику изменения подстилающего покрова, используя данные о степени повреждений растительности на основе серии ежегодных космических снимков за период в десяток и более лет (Краснощеков и др., 2019; Пономарева и др., 2020).

Оценку площадей нарушенных участков и их временную динамику можно получить, анализируя рассчитанный вегетационный индекс NDVI (*анел.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), используя красный и ближний инфракрасный каналы спутника Landsat (Калабин и др., 2013). В нашем же исследовании проводится анализ изменения состояния растительного и почвенного покрова на техногенно-нарушенных участках в результате добычи полезных ископаемых (угольные разрезы и золоторудные месторождения, разрабатываемые открытым типом) по данным инфракрасных каналов прибора MODIS (*анел.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на космическом аппарате Terra. Динамика восстановления подстилающей поверхности на данных типах объектов зависит в том числе и от стратегии развития территории после её промышленной эксплуатации.

В ряде работ (Андроханов, Берлякова, 2016; Зеньков и др., 2019; Yang et al., 2018) проводится оценка восстановительных процессов на территориях, на которых размещены породные отвалы различных угольных месторождений. Согласно данным исследованиям, работы по лесной и водной рекультивации приводят к увеличению темпов восстановления растительных экосистем. В 2019 г. на Богословском угольном месторождении общая площадь внешних отвалов оценивалась в 2764 га. При этом 1354,6 га занимают площади с хвойным лесом, сформировавшимся в результате лесной рекультивации, а участки с травянистой и травянисто-кустарниковой растительностью занимают 92,2 и 270,9 га соответственно. Всего 61,7 га занимают горные выработки и отвалы без растительности, на остальной площади нарушенных земель сформирован растительный покров.

Повреждённые участки подстилающей поверхности на тепловых картах проявляются в виде тепловых аномалий (Краснощеков и др., 2019; Пономарева и др., 2020; Ponomareva et al., 2021; Yakimov, Ponomarev, 2020). По данным наземных исследований и численного моделирования, участки, на которых наблюдается тепловая аномалия в мерзлотной зоне Сибири, подвержены дополнительному прогреву, вследствие чего увеличивается глубина протаивания почвы на 10–20 % (Пономарев, Пономарева, 2018), что приводит к смене гидрологического режима и изменению функционирования биологического компонента данных экосистем. Цель настоящей работы — исследование изменения состояния растительного и почвенного покрова на техногенно-нарушенных участках различных типов в пределах Красноярского края за период с 2000 по 2020 г.

Районы исследования — промышленные территории Красноярского края. В рамках работы построен векторный ГИС-слой (геоинформационная система) территории Красноярского края с детализацией по видам техногенных объектов в пределах границ различных типов многолетней мерзлоты (Brown et al., 2021) (*puc. 1*). Данные о промышленных объектах получены на pecypce https://nedraexpert.ru/.



Рис. 1. ГИС-слой территории Красноярского края

Всего выделено 96 техногенных объектов на территории края. Из них 74 расположены в пределах распространения многолетней мерзлоты. В зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты, несмотря на то что она занимает больше половины территории края, крупных промышленных объектов немного. Это обусловлено труднодоступностью территории и крайне суровым климатом. Наибольшее количество предприятий сосредоточено в зоне распространения островной мерзлоты (55 техногенных объектов).

В работе применён бассейновый подход, в связи с чем мы характеризуем речной бассейн одним типом естественных таксонов. Такой подход позволяет выбрать для анализа бассейны, содержащие наибольшее количество техногенных объектов, и упрощает работу с данными о температуре подстилающей поверхности, ограничивая площадь участка границами выбранного бассейна.

# Материалы и методы

# Данные о температуре подстилающей поверхности

В работе использовались данные прибора MODIS (*анел.* Terra Space Satellite) — продукт MODIS/Terra LST&E Daily L3 Global 1 km SIN Grid (MOD11A1). Данный продукт представляет собой плитку с попиксельными значениями температуры подстилающей поверхности и коэффициента излучения с использованием 31-го и 32-го каналов радиометра MODIS, которая проецируется на синусоидальную сетку. Каждый пиксель продукта MOD11A1 имеет пространственное разрешение 1×1 км (Wang et al., 2008). Данные представлены в формате \*.hdf, содержат 11 различных слоёв информации и доступны на ресурсе LAADS DAAC

(NASA) (*англ.* The Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center, NASA — National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, https://ladsweb.modaps.eos-dis.nasa.gov/). Температура подстилающей поверхности измеряется в градусах Кельвина.

В работе использовался один слой продукта MOD11A1, содержащий дневную информацию о тепловом поле, который называется MODIS\_Grid\_Daily\_1km\_LST:LST\_Day\_1km. Выборка данных составила четыре изображения, соответствующих следующим номерам регулярной сетки MODIS: h21v02, h22v02, h22v03, h23v03. Данные скачивались для летних месяцев из выбранного временного интервала с 2000 по 2020 г.

Загруженные ежедневные данные усреднялись за выбранный летний месяц, содержащий наименьшее количество облачных дней. Усреднение производилось попиксельным суммированием слоёв с информацией о температуре поверхности и делением полученной сцены на общее количество ненулевых значений для каждого пикселя.

Методика выделения техногенных объектов на материалах съёмки (MODIS, продукт MOD11A1) выполнялась следующим образом:

- 1. Границы техногенных объектов верифицировались на основе результатов наземных обследований и координатной привязки, полученной авторами непосредственно в рассматриваемых в статье районах в 2017 по 2021 г.
- 2. Наземные данные средствами ГИС совмещались со спутниковыми изображениями, что позволило нанести точные границы нарушенных участков и далее оперировать ими.
- 3. Основным методом анализа было пороговое выделение нарушенных участков с использованием статистических данных о распределении радиояркостной температуры *T* в границах выделенных бассейнов. Для каждого бассейна определяли среднее значение и стандартное отклонение. В качестве порогового значения выбирали соотношение *T*<sub>ср.фон</sub> + σ. Пиксели изображения продукта MOD11A1, удовлетворяющие условию *T*<sub>ср. наруш.</sub> > *T*<sub>ср. фон</sub> + σ, были классифицированы как участки с наблюдаемыми аномалиями температуры и, соответственно, как нарушенные территории.

#### Информация по выбранным речным бассейнам

В работе подробно исследовались четыре речных бассейна в масштабе 8-го уровня вложенности из 12 по классификации Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEEDS) (Lehner, Grill, 2013), на территории которых располагаются крупные техногенные объекты, вызывающие значительные нарушения подстилающего покрова (*puc. 2*).



*Рис. 2.* Бассейн р. Барги в июле 2019 г.: *а* — в видимом диапазоне; *б* — тепловая карта по данным MOD11A. Синим контуром выделены границы Бородинского угольного разреза

- Бассейн р. Енашимо. Расположен в зоне островной мерзлоты. На территории бассейна р. Енашимо располагается Олимпиадинское месторождение. Оно одновременно считается одним из самых крупных и самых сложных по горнотехническим условиям месторождений золота в мире. Карьер врезается в землю на глубину 450 м. На месторождении выделено два участка: западный — с тремя рудными телами и восточный с одним рудным телом. С 1996 г. Олимпиадинское месторождение начало активно развиваться. Так как начало активного развития карьера почти совпадает с началом исследуемого временного интервала, то на данном участке хорошо прослеживается динамика в сторону увеличения площади тепловых аномалий.
- 2. Бассейн р. Панимбы. Расположен в зоне островной мерзлоты. Месторождение Панимба является частью Панимбинского рудного узла, входящего в Ерудинский рудный район, который занимает лидирующее положение по запасам и добыче золота в России. Месторождение Панимба (участки Михайловский и Золотой) считается одним из первоочередных объектов на эксплуатацию с оценёнными ресурсами в 73,71 т золота (Некрасова, 2019). В данном районе золото нашли в 1839 г. С этого времени началась активная разведка северных территорий и сформировались первые отвалы. На территории месторождения Панимба находятся отвалы, возраст которых составляет около 100 лет. На этих техногенных участках сформировался древесный растительный покров. По данным спутниковой съёмки, эти участки остаются стабильными последние десятилетия и изменение покрова практически не регистрируется.
- 3. Бассейн р. Норильской. Расположен в зоне сплошной мерзлоты. На территории бассейна р. Норильской располагается Талнахская обогатительная фабрика с прилегающим к ней хвостохранилищем. Хвостохранилище введено в эксплуатацию в 2016 г., что увеличило площадь антропогенной нарушенности в течение последних лет.
- 4. Бассейн р. Барги. Расположен вне мерзлотной области. На территории бассейна р. Барги располагается Бородинский угольный разрез. Это самый крупный угольный разрез в России. Разрез в длину составляет 7 км, в ширину — 2 км. Добыча угля в разрезе началась в 1950 г. С этого времени разрез активно развивается, наращивая показатели годовой добычи угля в год. Отвалы, производимые в результате разработки, рекультивируются, что приводит к более быстрому восстановлению повреждённой подстилающей поверхности.

В работе приведён *puc.* 2, на котором показан участок нарушенной территории с выделенной границей. Там же показана температурная карта, отражающая распределение радиояркостной температуры в границах нарушенной территории и в целом в границах рассматриваемого бассейна. На основе анализа геопространственной статистики усреднение значений температуры выполнялось в границах речного бассейна р. Барги по 491 пикселю, к усреднённому значению прибавлялось значение стандартного отклонения.

Аналогичная процедура выполнялась для остальных рассмотренных объектов (бассейнов рек и техногенных участков в них).

# Результаты и обсуждения

# Изменение площадей нарушенных территорий относительно речного бассейна

Рассчитана динамика изменения нарушенных участков в процентах относительно площади всей территории речного бассейна за последние два десятилетия.

Нарушенность территории определялась по тепловым данным на основе продукта MOD11A1. Для оценки площади нарушенных участков выбиралось количество пикселей, значения которых выше порогового значения. Для получения порогового значения к среднему значению температуры поверхности всего бассейна прибавлялось значение среднеквадратичного отклонения. Исходя из пространственного разрешения космических снимков высчитывалась площадь нарушенной территории, а далее — процент нарушенной территории относительно известной площади выбранного речного бассейна.

На рис. З показан результат для каждого из рассмотренных бассейнов, где пиксели продукта MOD11A1, удовлетворяющие условию нарушенности в терминах превышения порога  $(T_{cp. boh} + \sigma)$ , совмещены с изображениями Landsat.



a



Рис. 3. Пиксели нарушенных участков по данным MOD11A1 на подложке из снимков Landsat в границах исследуемых бассейнов: a - p. Енашимо;  $\delta - p$ . Панимба; b - p. Норильская; c - p. Барга. Синим контуром выделены техногенно-нарушенные области. Красным цветом показаны пиксели продукта MOD11A1 со значениями выше порогового

На рис. 4 (см. с. 209) показаны графики динамики числа пикселей в процентах, превышающих рассчитанное пороговое значение. Тренды на каждом графике отражают динамику к уменьшению или увеличению процента пикселей, температура которых превышает фоновые значения. Процент количества пикселей, превышающих фоновое значение, может быть косвенно связан с нарушенностью, поскольку на данной территории температура поверхности выше, чем на фоновом участке, где отсутствуют повреждения естественного или антропогенного происхождения.

Мы зафиксировали, что площадь нарушенной территории меняется в разные годы в разы, что, очевидно, может быть связано с пирогенным или климатическим фактором. Температура фоновых территорий для всех исследуемых бассейнов имеет небольшой тренд к увеличению. Был проведён корреляционный анализ, который установил величину коэффициента детерминации  $R^2$  между количеством пикселей, относящихся к тепловой аномалии, и средним значением температуры поверхности речного бассейна, равный 0,8. В то же

время тренды числа пикселей нарушенных территорий могут быть и в сторону увеличения, и в сторону уменьшения этого показателя. Снижение процента аномальных по температуре пикселей может указывать на восстановительные процессы экосистем, на формирование растительного и почвенного покрова; и наоборот, увеличение процента будет указывать на динамику к увеличению площади участков с повышенным тепловым фоном, т.е. на то, что данная территория подвергается деструктивному воздействию.



*Рис. 4.* Процент пикселей, превышающих пороговое значение относительно площади речного бассейна

Добыча золота открытым типом в бассейне р. Енашимо (см. *рис. 4a*) начала активно развиваться в начале двухтысячных годов. На данной территории хорошо прослеживается динамика в сторону увеличения площади тепловых аномалий в период с 2000 по 2020 г. Полученный тренд по количеству пикселей, превышающих фоновые значения, указывает на рост нарушенности территории.

В границах бассейна р. Панимбы (см. *puc. 46*) присутствуют нарушенные участки, характеризующиеся старыми мускульными и дражными отвалами породы, образованными при добыче золота. Отвалы на данном объекте имеют разный возраст и технологию отсыпки. Поскольку первые разработки на исследуемых объектах проводились ещё около сотни лет назад, часть отвалов на территории бассейна, не эксплуатируемых позже, уже имеет хорошо развитый растительный покров (древесный ярус и напочвенный покров). Изменение теплового состояния на данном участке связано с постепенным зарастанием более молодых отвалов, что и отражает тренд на *puc. 46*.

Норильский промышленный район расположен в зоне сплошной мерзлоты. Территория большей частью находится в зоне распространения воздушно-пылевого и газового шлейфа Норильского металлургического комбината. На территории исследуемого бассейна р. Норильской расположена городская агломерация Норильск с прилегающими промышленными зонами, окрестные заболоченные участки лесотундры и горнотундровые участки с гольцами. В период с 2000 по 2020 г. процент пикселей, превышающих среднее фоновое значение температуры, в границах бассейна р. Норильской имеет почти горизонтальный тренд. Из этого следует, что по данным температуры поверхности на территории данного бассейна не наблюдается существенных процессов восстановления или деградации растительного и почвенного покрова (см. *рис. 4в*).

На территории бассейна р. Барги располагается Бородинский угольный разрез. Данный объект активно развивается, увеличивая площадь трансформированных экосистем. Однако на использованной территории активно ведётся биологическая рекультивация земель, в результате которой на отвалах формируется растительный покров, благодаря чему нивелируется увеличение средней температуры. Линия тренда на *рис. 4г* позволяет говорить о том, что тепловое состояние территории данного речного бассейна за исследуемые 20 лет почти не изменилось.

#### Сравнение средней температуры поверхности речных бассейнов

Так как для исследуемых бассейнов рек площадь тепловой аномалии территории оказалась значительной, было решено дополнительно провести сравнение температуры поверхности в границах речных бассейнов, соответствующих выбранным техногенным объектам и фоновым территориям по данным продукта MOD11A1.



*Рис. 5.* Выбранные речные бассейны: в красных границах — техногенно-нарушенная территория; в синих — фоновая территория. Красными треугольниками обозначены техногенные объекты



*Рис. 6.* Изменение средней температуры поверхности техногенно-нарушенных и фоновых областей в границах выбранных речных бассейнов за период 2000–2021 гг.

Было выбрано четыре техногенно-нарушенных участка, расположенных в пределах девяти речных бассейнов (масштаба 12-го уровня вложенности из 12 по классификации HydroSHEEDS), и соответствующие им ненарушенные (фоновые) территории в пределах восьми речных бассейнов. Техногенные участки: вблизи пос. Еруда (*рис. 5a*, см. с. 210), пос. Новоерудинский (*рис. 56*), г. Норильска (*рис. 5в*), г. Бородино (*рис. 5г*).

Динамика изменения средней температуры поверхности выбранных речных бассейнов, содержащих исследуемые техногенные объекты и фоновую область, за период с 2000 по 2021 г. показана на *рис. 6*. Синим цветом отмечены данные, соответствующие фоновому бассейну, оранжевым — техногенно-нарушенному. Синяя и оранжевая сплошные линии линии трендов для фоновых и нарушенных бассейнов соответственно.

Анализ данных показал, что за последние 10 лет на всех четырёх выбранных техногеннонарушенных участках температура поверхности превышает фоновую: в среднем на 0,7° для бассейна вблизи пос. Еруда (см. *рис. 6a*), на 0,2° — вблизи пос. Новоерудинский (см. *рис. 6б*), на 2° — вблизи г. Норильска (см. *рис. 6в*) и на 1,7° — вблизи г. Бородино (см. *рис. 6г*).

Линии тренда изменения средней температуры поверхности в границах исследуемых бассейнов имеют разный угол наклона. Например, на *рис. 6а* и *в* тренды для нарушенных территорий имеют тенденцию к росту, что указывает на увеличение площади нарушенной подстилающей поверхности, они имеют больший угол по сравнению с трендами своих фоновых областей.

За последние 20 лет разница в температуре поверхности в границах выбранных нарушенных и фоновых бассейнов вблизи пос. Новоеруднинский (бассейн р. Панимбы) практически не меняется (см. *рис. бб*). Техногенные экосистемы, формирующиеся здесь, имеют большой возраст (до 100 лет), и к настоящему времени их экологическое состояние стабилизировалось, сформировался фитоценоз. На данных участках установился специфичный микроклимат. При этом, несомненно, происходит перестройка данной экосистемы в целом, в том числе установлено изменение относительно фоновых экосистем биологического разнообразия.

Данные для бассейнов вблизи г. Бородино можно интерпретировать как наблюдаемый прогресс в постепенном восстановлении растительного и почвенного покровов, в том числе благодаря рекультивации отвалов угольного разреза (см. *рис. бг*).

Продемонстрированное превышение значений средней температуры поверхности речных бассейнов, содержащих техногенные объекты, в сравнении с фоновыми бассейнами справедливо не ко всем годам из выбранного периода времени: максимальная разница температур не превышает 4°, а средняя разница по всем объектам составляет около 1,5°.

По полученным результатам можно сделать вывод, что существует некое пороговое значение площади нарушенных участков, при котором сравнение температуры поверхности нарушенных и ненарушенных областей в масштабе речных бассейнов может быть реализовано. При площади нарушенных участков менее порогового значения данный метод будет работать на уровне ошибки измерений исходных тепловых данных.

Также присутствуют климатический и пирогенный факторы, затрудняющие интерпретацию результатов описанным методом сравнения ввиду больших площадей исследуемых объектов. Ранний или поздний приход весны влияет на период схода снега, запуск биологических процессов, периоды обострения пожарной обстановки, что в конечном итоге отражается на получаемых результатах съёмки со спутника.

#### Заключение

Использование долгосрочных спутниковых данных даёт возможность оценивать масштабы нарушенных экосистем и проводить мониторинг их состояния. На основе анализа данных в тепловом диапазоне получены оценки экологического состояния техногенно-преобразованных территорий в лесостепной, среднетаёжной и лесотундровой зонах Средней Сибири.

Представленный подход к оценке состояния техногенно-нарушенных экосистем может быть использован при разработке мероприятий по восстановлению территорий, по улучшению экологической ситуации с учётом выявления наиболее негативных факторов. Примене-

ние данных дистанционного зондирования как для идентификации локального техногенного нарушения, так и для определения доли нарушенных участков позволит получать более объективные оценки антропогенной нагрузки на экосистемы для конкретных промышленных территорий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (грант № 20-44-242002 «Инструментальный мониторинг физических свойств и численное моделирование состояния техногенно-нарушенных почв Сибири»).

# Литература

- 1. *Андроханов В.А., Берлякова О. Г.* Состояние лесных культур и почвенного покрова на рекультивированном отвале угольного разреза // Сибирский лесной журн. 2016. № 2. С. 22–31. DOI: 10.15372/ SJFS20160202.
- 2. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- 3. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 84–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97.
- 4. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Полевщикова Ю. А., Лежнин С. А. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-124-134.
- 5. *Вохмина Д.А., Чернецкая А.Ю.* Недропользование и минерально-сырьевой потенциал Красноярского края // Инновационные тенденции развития российской науки. 2020. С. 381–385.
- 6. Зеньков И.В., Нефедов Б. Н., Жукова В.В., Кирюшина Е.В., Вокин В. Н. Результаты оценки экологии нарушенных земель угольным разрезом «Абанский» в Красноярском крае // Уголь. 2019. № 9. С. 116–119.
- 7. *Калабин Г. В., Моисеенко Т. И., Горный В. И., Крицук С. Г., Соромотин А. В.* Спутниковый мониторинг природной среды при открытой разработке Олимпиадинского золоторудного месторождения //Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184.
- 8. *Краснощеков К. В., Дергунов А. В., Пономарев Е. И.* Оценка тепловых карт подстилающей поверхности на участках вырубок по данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 87–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97.
- 9. *Курбанов Э.А., Нуреева Т.В., Воробьев О. Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Мифтахов Т.Ф., Незамаев С.А., Полевщикова Ю.А.* Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 17–24.
- 10. Некрасова Н.А. Геология и генезис месторождения Панимба (Енисейский кряж): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. 2019. 171 с.
- 11. Пономарев Е. И., Пономарева Т. В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // Сибирский эколог. журн. 2018. Т. 25. № 4. С. 479–488. DOI: 10.15372/SEJ20180408.
- 12. Пономарева Т. В., Ковалева Н. М., Пономарев Е. И., Малькевич В. В. Оценка биоразнообразия на территории Олимпиадинского ГОКа «Полюс Красноярск» // Горный журн. 2020. № 10. С. 48–53. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.02.
- 13. *Тарасов А. В.* Современные методы оперативного картографирования нарушений лесного покрова // Вестн. Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий. 2020. Т. 25. № 3. С. 201–213. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-201-213.
- 14. *Тарасов А. В., Шихов А. Н., Шабалина Т. В.* Распознавание нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам Sentinel-2 с помощью свёрточных нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 51–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.
- 15. *Терехин Э.А.* Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 112–124. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-112-124.

- 16. *Терехин Э.А.* (2019а) Нарушенность хвойных лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья в начале XXI века // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2019. № 5. С. 33–41. DOI: 10.25686/2367.2019.5.58814.
- 17. *Терехин Э.А.* (2019б) Распознавание нарушенных лесных экосистем лесостепи на основе спектрально-отражательных характеристик // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 3. С. 412–418. DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-3-412-418.
- 18. *Brown J.*, *Ferrians O.J.*, *Heginbottom J.A.*, *Melnikov E.S.* Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. Reston, VA: US Geological Survey, 1997. 45 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2994.9040.
- 19. Coppin P.R., Bauer M. E. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery // Remote Sensing Reviews. 1996. V. 13. P. 207–234. DOI: 10.1080/02757259609532305.
- 20. *Häme T.* Spectral interpretation of changes in forest using satellite scanner images // Acta Forestalia Fennica. 1991. V. 222. Art. ID 7668. 111 p.
- 21. *Lehner B.*, *Grill G.* Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. 2013. V. 27. No. 21. P. 2171–2186. DOI: 10.1002/hyp.9740.
- 22. Ponomareva T. V., Litvintsev K. Y., Finnikov K. A., Yakimov N. D., Sentyabov A. V., Ponomarev E. I. Soil Temperature in Disturbed Ecosys-tems of Central Siberia: Remote Sensing Data and Numerical Simulation // Forests. 2021. V. 12. No. 8. Art. No. 994. 22 p. DOI: 10.3390/f12080994.
- 23. *Wang W., Liang S., Meyers T.* Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 3. P. 623–635. DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.024.
- 24. *Yakimov N., Ponomarev E.* Dynamics of Post-Fire Effects in Larch Forests of Central Siberia Based on Satellite Data // E3S Web Conf. 2020. V. 149. P. 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/202014903008.
- 25. Yang Y., Erskine P.D., Lechner A. M., Mulligan D., Zhang S., Wang Z. Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm // J. Cleaner Production. 2018. V. 178. P. 353–362. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.050.

# Geospatial analysis of technogenically disturbed ecosystems in Central Siberia using satellite data in the IR range

# K. V. Krasnoshchekov<sup>1</sup>, A. V. Dergunov<sup>1</sup>, T. V. Ponomareva<sup>2,3</sup>

 <sup>1</sup> Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia E-mail: krasko@icm.krasn.ru
<sup>2</sup> Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia E-mail: bashkova t@mail.ru

<sup>3</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

The work is devoted to the study of changes in the state of vegetation and soil cover in technogenically disturbed areas of various types within the Krasnovarsk Territory for the period from 2000 to 2020. For the study, 4 river basins were selected: the Yenashimo River, the Panimba River, the Norilskaya River and the Barga River, on which various technogenic objects are located (quarries, tailings, dumps). In order to detect damaged areas in the form of anomalies on heat maps of the surface, we used data in the thermal IR range of the MODIS/Terra instrument (product MOD11A1). A method has been developed for identifying disturbed areas on heat maps of the studied territories, based on a comparison of the alleged disturbed areas with background, undisturbed areas. This method is applied both for accurate analysis of selected technogenic objects and for areas within the boundaries of selected river basins. Analysis of the data showed that in all four studied territories, the surface temperature exceeds the background by an average of 1.5°. The dynamics of changes in the state of the underlying surface in the studied territories over a 20-year period is demonstrated. In technogenically disturbed areas in the Panimba River basin, there are no significant changes in the state of the underlying surface during the study period. Within the basins of the Yenashimo and Norilsk rivers, an increase in the area of the disturbed underlying surface is detected, and within the boundaries of the Barga River basin, on the contrary, there is a positive trend in the restoration of vegetation and soil cover, including due to the reclamation of disturbed surfaces. Using remote sensing data both for identifying a local technogenic disturbance and for determining the proportion of disturbed areas will make it possible to obtain more objective estimates of the anthropogenic load on ecosystems for specific industrial areas.

**Keywords:** technogenic objects, river basin, heat map of the surface, cryolithozone, Siberia, surface temperature anomalies, vegetation disturbance

Accepted: 02.06.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-203-216

### References

- 1. Androkhanov V.A., Berlyakova O.G., Condition of forest crops and soil cover at reclaimed dump of coal mine, *Siberian Forest J.*, 2016, No. 2, pp. 22–31 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20160202.
- 2. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
- Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 84–97 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97.
- Vorobiev O. N., Kurbanov E. A., Polevshchikova Yu. A., Lezhnin S. A., Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 124–134 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-124-134.
- 5. Vokhmina D.A., Chernetskaya A.Yu., Subsurface use and mineral resource potential Krasnoyarsk Territory, *Innovatsionnye tendentsii razvitiya rossiiskoi nauki*, 2020, pp. 381–385 (in Russian).
- 6. Zenkov I. V., Nefedov B. N., Zhukova V. V., Kiryushina E. V., Vokin V. N., The Results of the Ecology Assessment of Disturbed Lands by the Abansky Coal Mine in the Krasnoyarsk Territory, *Ugol*', 2019, No. 9, pp. 116–119 (in Russian).
- 7. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gorny V. I., Kritsuk S. G., Soromotin A. V., Satellite monitoring of natural environment at Olimpiada gold open-cut mine, *J. Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 160–166.
- 8. Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Ponomarev E. I., Evaluation of underlying surface temperature maps on logging sites using Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 87–97 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97.
- 9. Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Miftakhov T.F., Nezamayev S.A., Polevshchikova Yu.A., Remote monitoring of disturbances in forest cover, reforestation and afforestation of Mari Zavolzhje, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 3, pp. 17–24 (in Russian).
- 10. Nekrasova N.A., *Geologiya i genezis mestorozhdeniya Panimba (Eniseiskii kryazh): Diss. kand. geol.-mineral. nauk* (Geology and genesis of the Panimba deposit (Yenisei ridge), Cand. geol. and mineral. sci. thesis), 2019, 171 p. (in Russian).
- 11. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., The effect of postfire temperature anomalies on seasonal soil thawing in the permafrost zone of Central Siberia evaluated using remote data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 4, pp. 420–427, DOI: 10.1134/S1995425518040066.
- 12. Ponomareva T. V., Kovaleva N. M., Ponomarev E. I., Malkevich V. V., Biodiversity assessment in the area of Olimpiada mining and processing plant, Polyus Krasnoyarsk, *Gornyi zhurnal*, 2020, No. 10, pp. 18–53 (in Russian), DOI 10.17580/gzh.2020.10.02.
- 13. Tarasov A. V., Traditional and modern methods of satellite images processing for operational mapping of forest cover disturbances, *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii*, 2020, Vol. 25, No. 3, pp. 201–213 (in Russian), DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-201-213.
- 14. Tarasov A.V., Shikhov A.N., Shabalina T.V., Detection of forest disturbances in Sentinel-2 images with convolutional neural networks, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 51–64 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-51-64.
- 15. Terekhin E.A., Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian Upland using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 112–124 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-112-124.
- 16. Terekhin E. A. (2019a), Disturbance of coniferous forests in the forest-steppe zone of Russia at the beginning of the XXI century, *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring*, 2019, No. 5, pp. 33–41 (in Russian), DOI: 10.25686/2367.2019.5.58814.
- 17. Terekhin E.A. (2019b), Detection of disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using reflectance values, *Komp'yuternaya optika*, 2019, Vol. 43, No. 3, pp. 412–418 (in Russian), DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-3-412-418.

- 18. Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., Melnikov E.S., *Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions*, Reston, VA, US Geological Survey, 1997, 45 p., DOI: 10.13140/RG.2.1.2994.9040.
- 19. Coppin P. R., Bauer M. E., Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery, *Remote Sensing Reviews*, 1996, Vol. 13, pp. 207–234, DOI: 10.1080/02757259609532305.
- 20. Häme T., Spectral interpretation of changes in forest using satellite scanner images, *Acta Forestalia Fennica*, 1991, Vol. 222, Art. ID 7668, 111 p.
- 21. Lehner B., Grill G., Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems, *Hydrological Processes*, 2013, Vol. 27, No. 15, pp. 2171–2186, DOI: 10.1002/hyp.9740.
- 22. Ponomareva T. V., Litvintsev K. Y., Finnikov K. A., Yakimov N. D., Sentyabov A. V., Ponomarev E. I., Soil Temperature in Disturbed Ecosys-tems of Central Siberia: Remote Sensing Data and Numerical Simulation, *Forests*, 2021, Vol. 12, No. 8, Art. No. 994, 22 p., DOI: 10.3390/f12080994.
- 23. Wang W., Liang S., Meyers T., Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 3, pp. 623–635, DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.024.
- 24. Yakimov N., Ponomarev E., Dynamics of Post-Fire Effects in Larch Forests of Central Siberia Based on Satellite Data, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 149, p. 03008, DOI: 10.1051/e3sconf/202014903008.
- 25. Yang Y., Erskine P. D., Lechner A. M., Mulligan D., Zhang S., Wang Z., Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm, *J. Cleaner Production*, 2018, Vol. 178, pp. 353–362, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.050.