

УДК 528.8.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-3-53-60

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО УРАЛА ПОД ТЕХНОГЕННЫМ ВЛИЯНИЕМ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Алексей Андреевич Самсонов¹✉, Юрий Антонович Чуриков²,
Артур Русланович Ибрагимов³, Игорь Юрьевич Гришин⁴,
Андрей Григорьевич Фесюн⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; churikov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ari3008@mail.ru

⁴ Институт математических исследований сложных систем Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова; igrishin@sev.msu.ru

⁵ Институт стран Азии и Африки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fesyun@iaas.msu.ru

Аннотация. Данная работа посвящена результатам мониторинга изменения компонентов природных ресурсов в степной зоне Южного Урала под техногенным влиянием добычи и переработки медной руды с использованием данных дистанционного зондирования Земли. В ходе комплексного исследования были проанализированы космические снимки Landsat, полученные в 2014 и 2023 гг. Применение вегетационных индексов, в частности NDVI, позволило выявить снижение уровня растительности вокруг горно-обогатительного комбината за исследуемый период. Дополнительный анализ с использованием индекса железистых минералов (Ferrous Minerals Ratio) и метода «ложных цветов» подтвердил расширение площадей, занятых отвалами и хвостами, а также увеличение концентрации железа в почве. Результаты химического анализа проб подтверждают наличие повышенных концентраций металлов на хвостохранилище. Полученные данные свидетельствуют о влиянии горно-обогатительного комбината на окружающую среду и подчеркивают необходимость системного мониторинга ситуации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космические снимки Landsat, NDVI, Ferrous Minerals Ratio, метод «ложных цветов», экологический мониторинг

Для цитирования: Самсонов А.А., Чуриков Ю.А., Ибрагимов А.Р., Гришин И.Ю., Фесюн А.Г. Результаты дистанционного мониторинга изменения компонентов природных ресурсов в степной зоне Южного Урала под техногенным влиянием добычи полезных ископаемых // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 3. С. 53–60.

THE RESULTS OF REMOTE MONITORING OF CHANGES IN NATURAL RESOURCES IN THE STEPPE ZONE OF THE SOUTHERN URALS UNDER ANTHROPOGENIC INFLUENCE FROM MINING ACTIVITIES

Aleksey A. Samsonov¹✉, Yury A. Churikov², Artur R. Ibragimov³,
Igor Yu. Grishin⁴, Andrey G. Fesyun⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; churikov@geol.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ari3008@mail.ru

⁴ Institute of Complex Systems Mathematical Research, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; igrishin@sev.msu.ru

⁵ Institute of Asian and African Studies, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fesyun@iaas.msu.ru

Abstract. This study focuses on the results of monitoring changes in natural resource components in the steppe zone of the Southern Ural region under the technogenic influence of copper ore extraction and processing, using Earth remote sensing data. A comprehensive analysis was conducted on Landsat satellite images acquired in 2014 and 2023. The application of vegetation indices, particularly the NDVI, revealed a decline in vegetation levels around the mining and processing plant over the study period. Further analysis utilizing the Ferrous Minerals Ratio index and the “false color” method confirmed the expansion of areas occupied by waste dumps and tailings, as well as an increase in soil iron concentration. Chemical analyses confirmed the presence of elevated metal concentrations at the tailings storage facility. The findings highlight the environmental impact of the mining and processing plant and underscore the need for systematic monitoring of the situation.

Keywords: Remote sensing of the Earth, satellite images of Landsat, NDVI, Ferrous Minerals Ratio, the method of “false colors”, ecological monitoring

For citation: Samsonov A.A., Churikov Yu.A., Ibragimov A.R., Grishin I.Yu., Fesyun A.G. The results of remote monitoring of changes in natural resources in the steppe zone of the Southern Urals under anthropogenic influence from mining activities. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 3: 53–60. (In Russ.).

Введение. Загрязнение территорий вокруг рудников широко известно и может представлять значительную экологическую проблему, влияющую на качество окружающей среды. В процессе добычи и переработки полезных ископаемых в зависимости от состава руды в компоненты среды могут попадать различные загрязнители, включая тяжелые металлы, химические реагенты и пылевые частицы. Эти вещества накапливаются в почвах, водоемах и атмосфере, вызывая деградацию экосистем, что требует тщательного мониторинга и анализа.

Для комплексного изучения загрязнения территорий вокруг рудников используются различные методы, включая химический анализ проб отходов недропользования, проб почвы и воды на предполагаемой площадке воздействия, дистанционное зондирование и геохимическое картирование. Эти методы позволяют определить состав загрязняющих веществ, их концентрацию и распространение, а также оценить влияние на окружающую среду. В совокупности указанные методы дадут более точную оценку уровня загрязнения на исследуемой территории.

В качестве практического примера частичной реализации разработанных подходов рассмотрен горно-обогатительный комбинат (ГОК) по добыче и переработке медной руды. Объект представляет собой пример промышленного предприятия с потенциально высоким риском загрязнения компонентов среды, что делает его удобной моделью для проведения комплексного анализа.

Дистанционное зондирование становится все более популярным благодаря своей способности охватывать большие территории и предоставлять данные в реальном времени. Основной целью исследования было выявление и картирование зон с наибольшим уровнем загрязнения, что позволит,



Рис. 1. Схема отбора проб на хвостохранилище, 1–9 — места отбора проб

при необходимости, разработать меры по снижению экологического воздействия ГОКа на окружающую среду. Задачей данного исследования являлась оценка динамики изменения почвенно-растительного покрова вокруг ГОКа с применением комплекса современных методов изучения, включая прецизионный химический анализ проб хвостохранилища, расчет массы пыления и дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) для мониторинга и анализа степных и смежных с ними экосистем.

Материалы и методы. Динамика изменения почвенно-растительного покрова территории степных и полустепных зон была оценена с использованием ретростептивных космических снимков, полученных со спутников Landsat. Программа Landsat, реализуемая Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и Геологической службой США (USGS), непрерывно осуществляющая съемку и обеспечивающая получение изображений земной поверхности из космоса с 1972 г., предоставила данные для исследования. С момента запуска первого спутника Landsat-1 было выведено на орбиту еще восемь аппаратов. В настоящее время функционируют спутники Landsat седьмого, восьмого и девятого поколений, в то время как аппараты предыдущих поколений завершили свою работу.

Первичная обработка полученных спутниковых снимков, включая расчет вегетационных и геологических индексов, была выполнена в геоинформационной системе QGIS, работа над которой была начата американским геологом Гари Шерманом в 2002 г. Пространственная привязка растровых изображений, сравнительный анализ данных в пространстве и времени, а также составление карт были осуществлены в геоинформационной системе ArcGIS, разработанной компанией ESRI (США).

Для проведения исследований были отобраны 11 проб, в том числе 2 рудных пробы (руда 1, руда 2) с карьера и 9 проб (X1, X9) с хвостохранилища ГОКа (рис. 1).

Исследования химического состава отобранных проб выполнены методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой в лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей». В качестве выборки в табл. 1 из полученных аналитических данных были отобраны элементы, которые превышают в значительной степени (в 2–4 раза) значения фоновых концентраций по степным районам Южного Урала, на примере Челябинской области [Семенова и др., 2015; Смагин и др., 2023; Нефёдова, 2023]. По результатам анализов отмечены низкие содержания Си до 0,03–0,05 % в хво-

Таблица 1

Основные элементы, определенные методом масс-спектрометрии

Номер образца	ME-MS41								
	As	Ca	Co	Cu	Fe	Mg	Mo	P	W
	ppm	%	ppm	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm
	0,1	0,01	0,1	0,2	0,01	0,01	0,05	10	0,05
X1	5,1	2,63	22,8	376,0	3,61	2,37	5,17	1010	18,43
X2	4,4	2,33	20,4	304,5	3,86	2,43	5,37	994	17,67
X3	5,0	2,13	21,4	317,0	3,38	2,16	5,62	1295	23,53
X4	3,3	2,46	21,2	411,6	3,52	2,34	5,25	741	18,79
X5	5,8	2,06	20,4	436,3	3,40	1,88	5,77	1065	41,14
X6	4,9	1,74	20,2	754,2	3,07	1,71	10,79	770	43,59
X7	6,0	1,88	21,4	504,6	3,12	1,85	7,94	677	31,93
X8	4,9	2,34	20,5	443,4	3,41	2,22	5,61	663	14,28
X9	4,1	2,19	20,4	315,4	3,38	2,16	4,00	696	29,69
руда 1	379,5	0,75	192,2	9867,0	37,21	0,26	0,87	165	286,65
руда 2	156,0	1,04	146,5	4669,9	17,71	1,27	90,56	259	326,44

стах обогащения, по сравнению с содержаниями 0,5–1,5% в руде, что может совпадать с проектными показателями извлечения полезного ископаемого 95%. Такая же тенденция у значений Fe и S.

Для оценки интенсивности и радиуса ореола распространения пылевых частиц с площади хвостохранилища ГОКа определены следующие параметры:

- среднегодовое значение скорости ветра на данной территории принято 5 м/с [Climate..., 2024];
- количество сухих дней в год 217 [Climate..., 2024];
- 1 день равен 86 400 секундам;
- площадь открытой поверхности хвостохранилища $6 \cdot 10^6 \text{ м}^2$;
- площадь исследуемой территории с учетом выбранной системы координат (WGS 84) составляет $473\,000\,000 \text{ м}^2$.

Интенсивность пыления хвостохранилища, принятого за аналог, при скорости ветрового потока 5 м/с и среднем диаметре частиц 45 мкм составляет $0,910 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [Маслобоев и др., 2016].

Также проведен гранулометрический ситовой анализ 3 проб хвостохранилища весом 30 г каждая. Итогом стало разделение общей массы на размеры фракций в процентном отношении, что отражено в табл. 2.

На основе приведенных параметров и результатов гранулометрического анализа проведен расчет массы пыли от хвостохранилища, оседающей на 1 м^2 в год:

$$0,910 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 86400 \cdot 217 = 102\,368\,448 \text{ кг} / 473\,000\,000 \text{ м}^2 = 0,2164 \text{ кг}.$$

Таким образом, установлено количественное воздействие пыли на исследуемой площади, прежде всего на атмосферу и почвы.

Таблица 2

Гранулометрический анализ проб хвостохранилища

Размер фракции, мм	Средние содержания гранулометрических фракций в пробах, %	Размер фракции, мм	Средние содержания гранулометрических фракций в пробах, %
<0,05	7,3	0,6	2,3
0,1	10,8	1	23,9
0,2	15,2	2	13,5
0,3	5,9	>3	17,1
0,4	3,9		

Применение спектральных индексов. Для оценки уровня загрязнения территорий степных зон и воздействия на прилегающие к ГОКа районы возможно использовать данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Применение данного метода с использованием индексов железистых минералов позволяет наглядно представить результаты проведенного исследования, что в сопоставлении с оценкой массы пыли на изучаемой территории выявляет степень воздействия и деградации почв вокруг месторождений и может применяться в аналогичных по показателям растительности степных и полупустынных регионах Азии и Африки.

Для мониторинга изменений почвенно-растительного покрова изучаемого района были проанализированы многоспектральные космические снимки Landsat, полученные 3 июля 2014 г. (Landsat-8) и 24 июля 2023 г. (Landsat-8). Выбор программы Landsat был обусловлен несколькими факторами.

Во-первых, пространственное разрешение 30 м и спектральный диапазон 0,4–1,1 мкм, характерные для снимков Landsat-8, соответствуют требованиям, установленным «Классификатором тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли», для решения поставленных геоэкологических задач [Классификатор..., 2002]. К таким задачам относятся выявление территорий с неудовлетворительным состоянием лесов, выявление участков леса, пострадавших от промышленных выбросов, а также выделение участков с различной степенью преобразованности (нарушенности) растительного покрова.

Во-вторых, снимки Landsat являются мульти-спектральными, что дает широкие возможности для их обработки. Так, снимки Landsat-5 содержат семь спектральных каналов, Landsat-7 — восемь, а Landsat-8 — одиннадцать. Каждый канал представляет собой определенный диапазон частот электромагнитного спектра, включая как видимые (красный, зеленый, синий), так и невидимые (ближний и коротковолновый инфракрасный) человеческому глазу.

Снимки программы Landsat находятся в свободном доступе на официальном портале Геологической службы США GloVis USGS [USGS].

Таблица 3

Значения индекса NDVI и соответствующие им типы растительного покрова

Значение NDVI	Тип растительности (объекта)
Ниже -0,1	Бетон, асфальт
-0,1...0,2	Отсутствие всякой растительности (горы, водные объекты, облака)
0,2...0,3	Низкая степень развития зеленой биомассы
0,3...0,6	Средняя степень развития зеленой биомассы
0,6...1	Высокая степень развития зеленой биомассы

Программа Landsat располагает обширной библиотекой космических снимков, охватывающей период с 1973 по 2024 гг. Доступ к этой библиотеке предоставляется через портал GloVis USGS.

Июль был выбран в качестве месяца наблюдений поскольку, согласно Приказу Рослесхоза [Приказ..., 2018] вегетационный период в степных районах Российской Федерации фиксируется с 15 мая. Кроме того, для обеспечения объективности исследования были выбраны снимки, сделанные в близкие даты, так как разница даже в один месяц может привести к существенным различиям в величинах вегетационного индекса. Это позволяет сравнивать полученные значения изучаемого района с данными из других природных зон, а также с аналогичными природными условиями в различных регионах, включая территории Ближнего Востока и Африки.

Для оценки динамики состояния почвенно-растительного покрова был использован нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), разработанный американским ученым Джоном Роузом в 1973 г. [Rouse, et al., 1973]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR — ближний инфракрасный канал (NearInfrared); RED — красный канал.

Формула NDVI основана на том, что здоровая и густая растительность поглощает больше красного излучения и отражает больше ближнего инфракрасного излучения. Благодаря нормализации значения NDVI всегда находятся в диапазоне от -1 до +1, что упрощает сравнение состояния растительности во времени и пространстве, а также идентификацию типов растительного покрова. Оптимальные показатели NDVI для изучаемого района приведены в табл. 3.

Проведенный анализ ретроспективных спутниковых снимков показал очевидное расширение границ ГОКа на момент проведения исследования, увеличились отвалы и площадь хвостохранилища, что связано с активной работой комбината в течение 12 лет. Значения вегетационных индексов, рас-

считанные для данной территории, сопоставимы с аналогичными показателями в степных и полупустынных регионах Африки и Азии. Также, можно обнаружить уменьшение уровня растительности вокруг комбината на основании значений табл. 3.

Современные методы анализа спутниковых снимков позволяют оценить также ореол концентрации железа на исследуемой территории. Для этого можно использовать индекс железистых минералов, а также напрямую оценить распространение Fe^{2+} и Fe^{3+} .

Сравнение индекса железистых минералов Ferrous Minerals Ratio рассчитывалось по следующей формуле [Segal, 1982]:

$$\text{Ferrous Minerals Ratio} = \frac{SWIR - 1}{NIR}.$$

Коэффициент железистых минералов (FM) — геохимический индекс для определения объектов горных пород, содержащих некоторое количество железистых минералов, при использовании каналов коротковолнового инфракрасного (SWIR) и ближнего инфракрасного (NIR) излучения.

Проведенный комплексный анализ спутниковых снимков через индексы NDVI (рис. 2) и Ferrous Minerals Ratio (рис. 3) показал очевидное расширение ГОКа, увеличились площади, занятые под массивами отвалов и хвостов, что связано с 12-летним периодом работы комбината на момент исследования, уменьшение уровня растительности вокруг комбината.

Для расчета содержания в горных породах трехвалентного железа применяется формула [IndexDataBase, 2011–2024]:

$$Fe^{3+} = \frac{Red}{Green}.$$

Проведенный анализ (рис. 4, А) продемонстрировал, что максимальная концентрация трехвалентного железа наблюдается по краям отвалов, а также частично на полях хвостов. Это говорит о том, что содержание оксидов трехвалентного железа характерно для отвалов, появившихся относительно недавно. Такое распределение трехвалентного железа, вероятно, связано с повышенным содержанием рудного материала, а именно халькопирита и борнита в этих отвалах. В целом халькопирит является одним из основных минералов, содержащих трехвалентное железо и его присутствие объясняет наблюдаемые результаты анализа.

Для расчета содержания в горных породах двухвалентного железа применяется следующая формула [IndexDataBase, 2011–2024]:

$$Fe^{2+} = \frac{SWIR - 2}{NIR} + \frac{Green}{Red}.$$

Содержание двухвалентного железа отображено на рис. 4, Б. В отличие от трехвалентного железа,

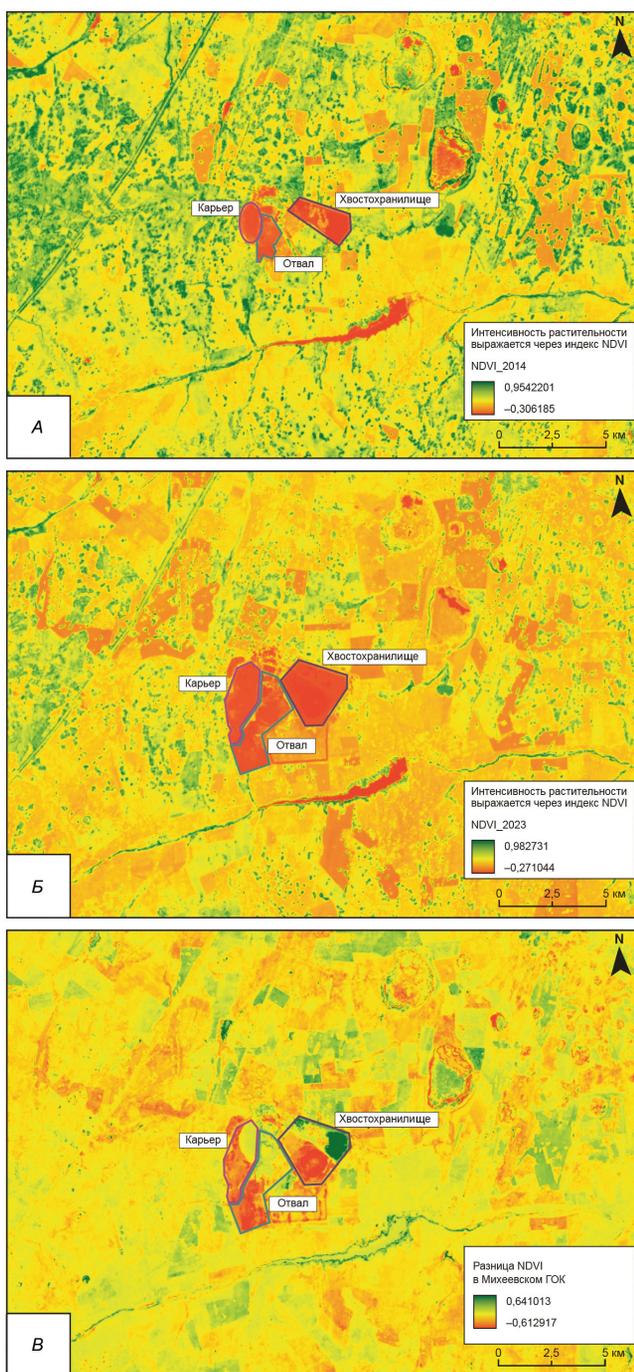


Рис. 2. Значения NDVI в 2014 г. (А) и в 2023 г. (Б); разница NDVI с 2014 по 2023 гг. (В)

содержание оксидов двухвалентного железа в ГОК выделяются менее наглядно. В первую очередь выделяются карьер и отвалы, и это тоже связано с высоким содержанием рудного материала, только в этом случае пирита и арсенопирита, что характерно для данного месторождения.

Для точного определения областей, богатых железом, был применен метод «ложных цветов» в комбинации с RGB-каналами. Технология «ложных цветов» позволяет визуализировать информацию, полученную из различных частей электромагнит-

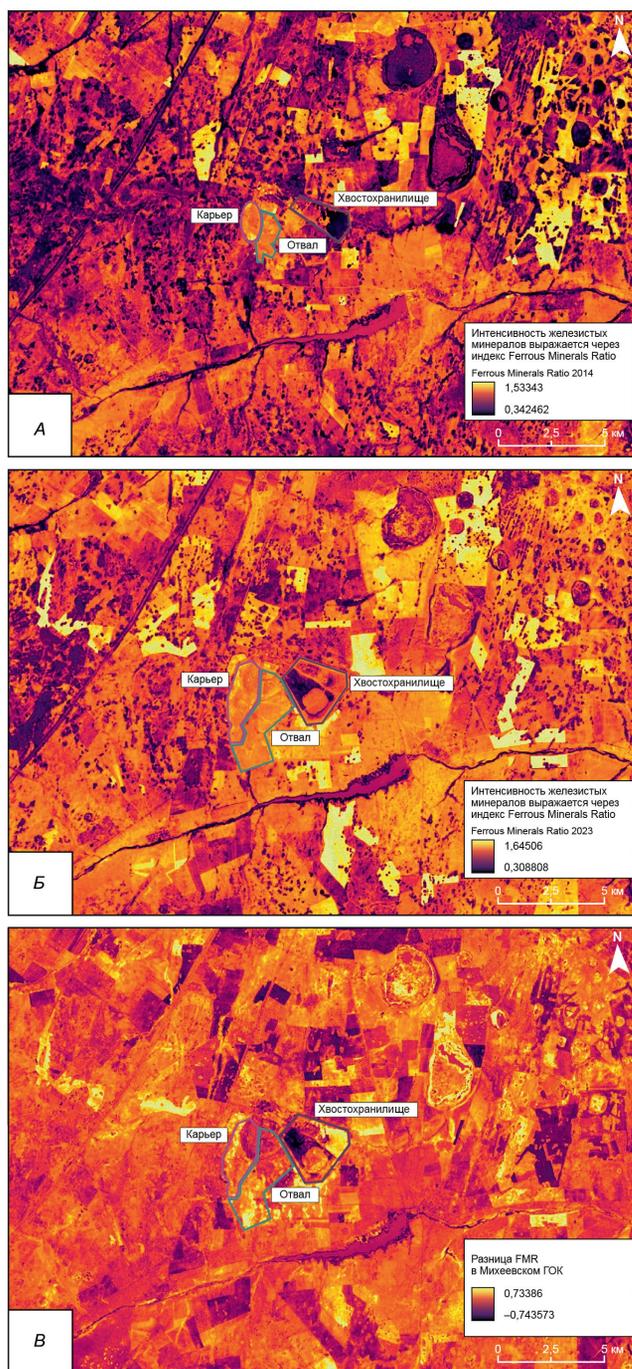


Рис. 3. Уровни значений железистых минералов в 2014 г. (А) и в 2023 г. (Б); изменение уровня значений индекса железистых минералов с 2014 по 2023 гг. (В)

ного спектра, включая видимый и невидимый диапазоны, что делает ее мощным инструментом для анализа данных дистанционного зондирования.

В данном случае, для создания изображения с «ложными цветами» были использованы следующие соотношения отражательной способности.

$$\text{Красный канал (Red): } \frac{\text{Red}}{\text{Green}} (\text{Fe}^{3+}) -$$

это соотношение отражательной способности в диапазонах 4 и 3, которое чувствительно к трехвалентному железу.

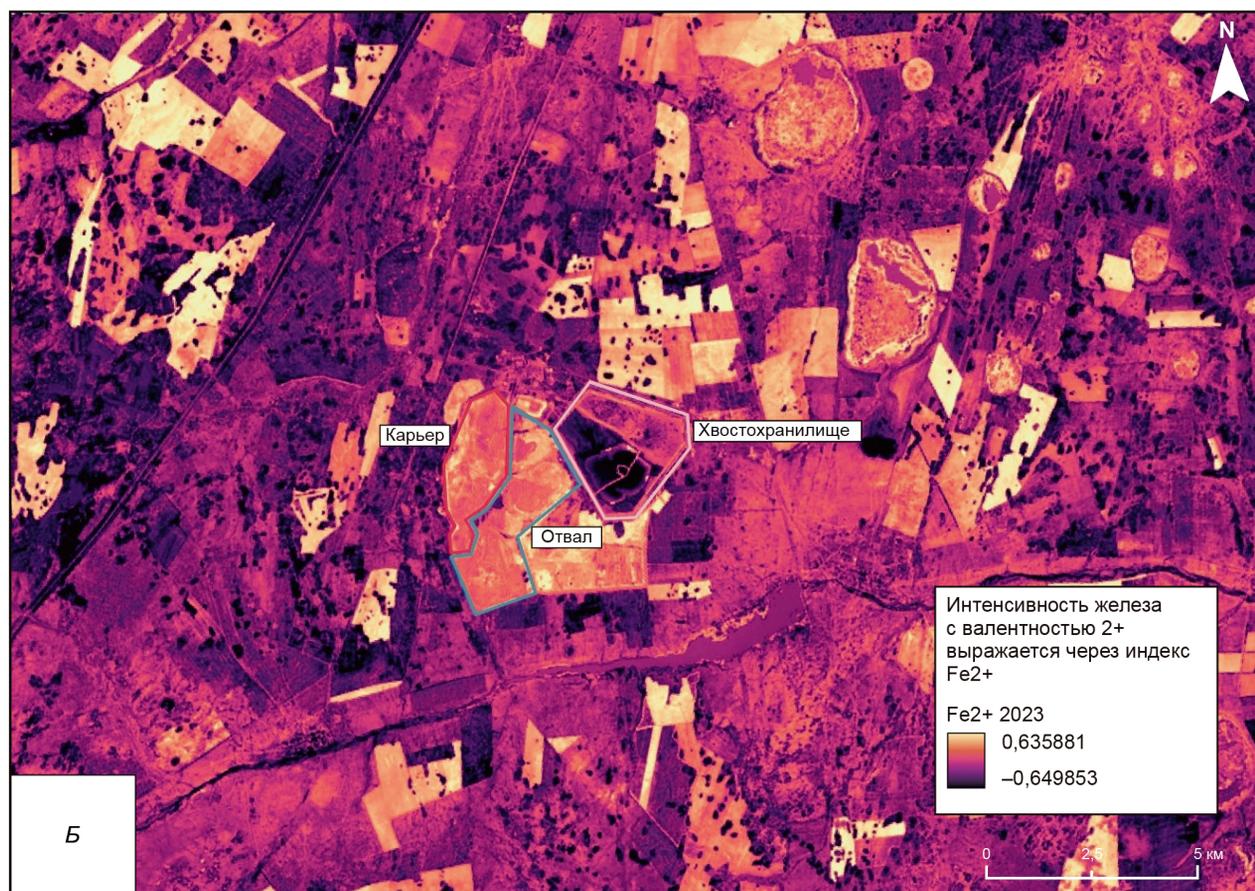
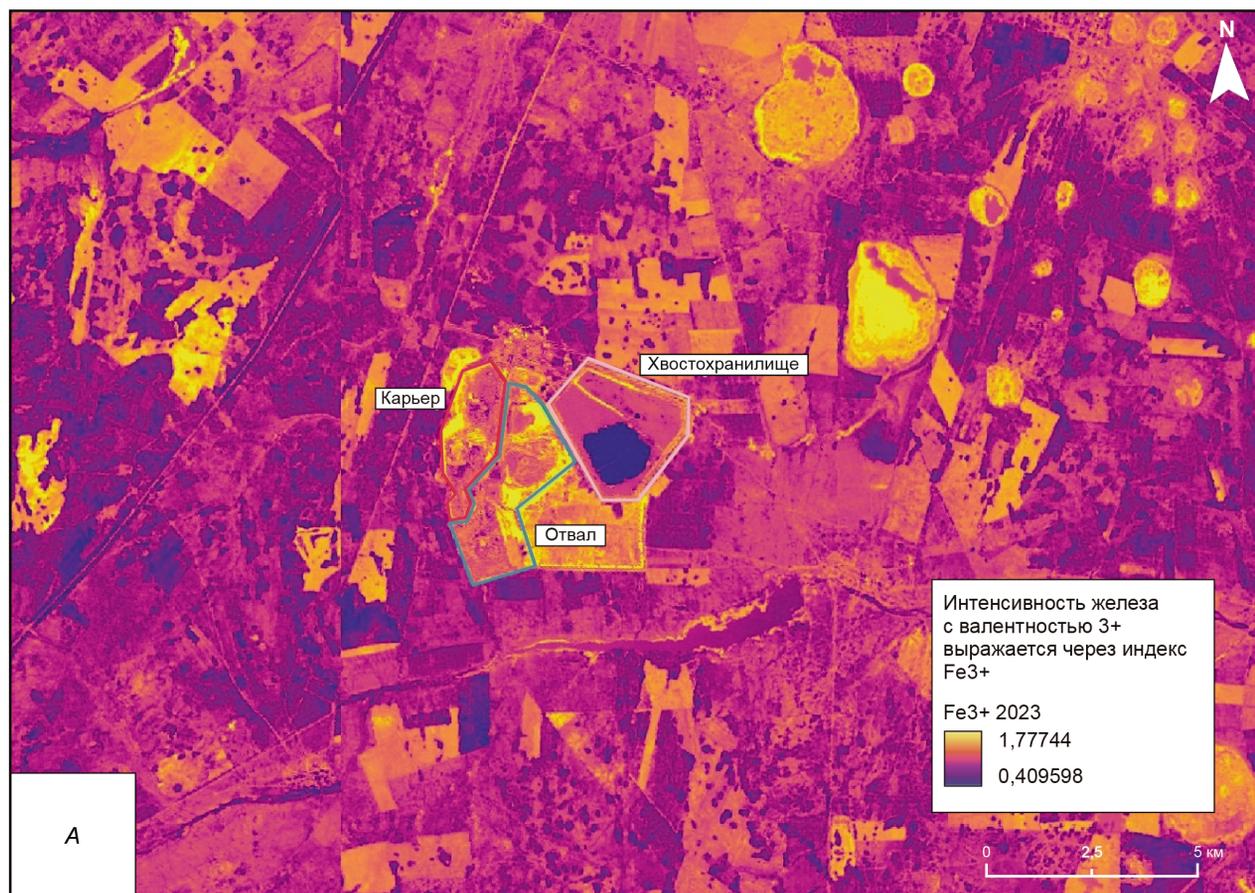


Рис. 4. А — распределение содержаний оксидов трехвалентного железа (Fe^{3+}); Б — распределение содержаний оксидов двухвалентного железа (Fe^{2+})

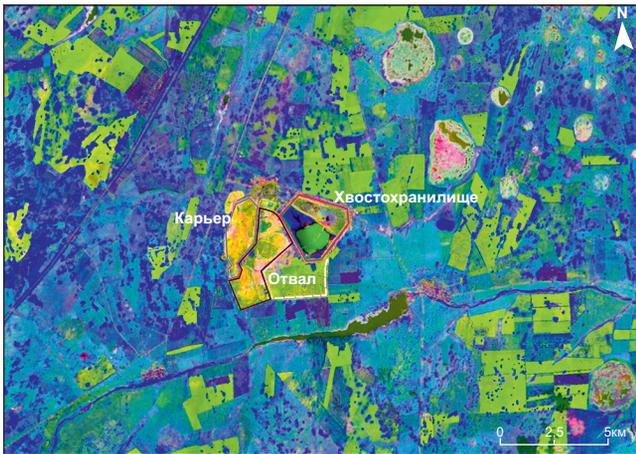


Рис. 5. RGB-композиции в «ложных цветах» (Red — Fe³⁺, Green — Fe²⁺, Blue — Clay Minerals)

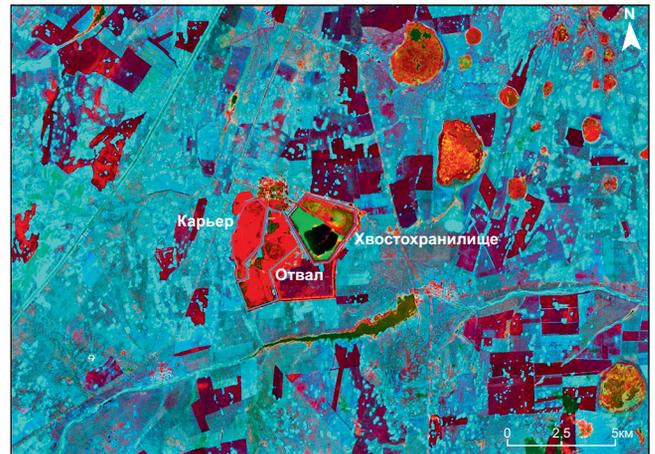


Рис. 6. RGB-композиции в «ложных цветах» (Red — Fe³⁺, Green — 5/7, Blue — 5/4)

Зеленый канал (Green): $\frac{SWIR-2}{NIR} + \frac{Green}{Red} (Fe^{2+})$ — это соотношение отражательной способности реагирует на присутствие двухвалентного железа.

Синий канал (Blue): $\frac{SWIR 1}{SWIR 2}$ (Clay minerals) — соотношение отражательной способности в диапазонах 6 и 7, которое связано с наличием глинистых минералов [Amro, 2011; Gopinathan, et al., 2020].

Такая комбинация каналов позволяет создавать изображения с уникальной цветовой палитрой (рис. 5), где распределение железа визуализируется следующим образом:

- желтый цвет указывает на участки с высоким содержанием железа, где присутствуют как оксиды железа, так и двухвалентное железо;
- красный цвет обозначает зоны с умеренным содержанием железа, где преобладают оксиды железа;
- зеленый цвет соответствует водным участкам, которые характеризуются низкой отражательной способностью во всех использованных диапазонах;
- синий цвет и его оттенки представляют остальные типы пород и объектов, где содержание железа незначительно, а преобладают глинистые минералы.

Анализ изображения с «ложными цветами» позволяет наглядно определить распределение железа в исследуемой области, выделить зоны с различным содержанием этого элемента и оценить их пространственное расположение. Этот метод является ценным инструментом для геологического картирования, поиска месторождений полезных ископаемых и изучения геохимических процессов.

Желтым цветом выделены в первую очередь карьер и отвалы, связано это с используемыми красным и зеленым каналами, которые в совокупности образуют соответственно желтый цвет, которые отражают трехвалентное и двухвалентное железо в рудных материалах, например пирит, халькопирит, а также борнит и арсенопирит.

Помимо стандартного подхода, существует альтернативный способ применения технологии «ложных цветов», который также использует прин-

цип «ложных цветов», но с иной конфигурацией цветовых каналов.

В этом альтернативном методе, вместо традиционного использования красного, зеленого и синего спектров, применяются специальные соотношения отражательной способности в различных диапазонах:

- красный канал (Red) формируется соотношением отражательной способности в диапазонах 4/3 (Fe³⁺);
- зеленый канал (Green) использует соотношение 5/7 (влажность почвы);
- синий канал (Blue) строится на основе соотношения 5/4 (распределение растительности).

Такой подход позволяет создавать изображения с уникальной цветовой палитрой, где распределение железа визуализируется следующим образом:

- красный цвет указывает на участки с высоким содержанием железа;
- желтый цвет обозначает зоны с умеренным содержанием железа;
- темно-коричневый или черный цвет: соответствует водным объектам;
- голубой или бордовый цвет представляет остальные типы пород и объектов.

Анализ изображения с «ложными цветами» (рис. 6) позволяет наглядно определить распределение железа в исследуемой области, выделить зоны с различным содержанием этого элемента и оценить их пространственное расположение. Сравнение результатов, полученных с помощью разных методов «ложных цветов», позволяет более точно интерпретировать состав и свойства горных пород, а также выявлять скрытые закономерности и особенности геологического строения исследуемой территории.

Красным цветом более детально по сравнению с первым методом «ложных цветов» выделяются карьер и отвалы, связано это с применением в качестве красного канала индекса Fe³⁺, и соответственно большого количества минералов трехвалентного железа в рудном материале, в первую очередь это касается халькопирита и борнита.

Хвостохранилище отчетливо выделяется зеленым цветом, поскольку оно является территорией складирования рыхлых пород после процесса обогащения, соответственно, проникающая способность для воды увеличиваются, породы насыщены влагой.

Синий цвет может быть применен для выявления состояния и уровня деградации растительности, а также оценки загрязненности, изменений в почвенном покрове. Так, можно наблюдать большие площади с угнетенной растительностью, которая отображается темно-бордовыми цветами спектра, а здоровая растительность выделяется синими-голубыми цветами интерференции цветового спектра. Данная работа выявляет маркировочные критерии для аналогичных территорий и дает возможность анализировать удаленные территории регионов стран Азии и Африки дистанционно без непосредственного нахождения на месте изучения.

Заключение. За более чем десятилетний период добычи медной руды на ГОКе были накоплены большие объемы техногенных образований, из-за чего состояние окружающей среды непрерывно меняется. В данный момент времени площадь, занятая объектами добычи и переработки полезных ископаемых, превышает 12 км² и в ближайшем будущем будет расширяться с пропорциональным увеличением объемов отходов недропользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования земли. Иркутск; М., 2002.

Маслобоев В.А., Бакланов А.А., Амосов П.В. Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1/1. С. 13–19.

Нефёдова Е.А. Изучение содержания подвижных форм тяжелых металлов в почвах Челябинской области // Итоги XXII Международного конкурса научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке», 2023. URL: <https://school-science.ru/15/1/51001> (дата обращения: 20.08.2024).

Приказ Рослесхоза № 173 «О внесении изменений в Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов, утвержденные приказом Рослесхоза от 10.11.2011 № 472». URL: <https://rosleshoz.gov.ru> (дата обращения: 20.08.2024).

Семенова И.Н., Биктимерова Г.Я., Ильбулова Г.Р., Исанбаева Г.Т. Современные проблемы науки и образования. Содержание тяжелых металлов в почве окрестностей карьеров Челябинской области // Современные проблемы науки и образования. 2015. (2–1). С. 561–565.

Смагин А.И., Маркова Л.М. Успехи современного естествознания. Загрязнение почв города Челябинска // Успехи современного естествознания. 2023. № 4. С. 55–61.

Произведена обработка космоснимков, полученных со спутников Landsat, а именно вычисление специализированных индексов NDVI, Fe³⁺, Fe²⁺, Ferrous Mineral Ratio и применение метода «ложных цветов» при построении RGB-изображений, что позволяет выявить места скопления рудного материала в отвалах и на хвостохранилище.

Комплексирование методов химического и гранулометрического анализов с космоснимками на наличие железа в отвалах, хвостохранилище и на прилегающих территориях ГОКа продемонстрировало динамику изменения растительного покрова за счет пыления, расширение площади воздействия ГОКа и увеличения преобладания железистого компонента в почвах в зоне влияния комбината. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения комплекса применяемых методов на основе ДЗЗ в степных регионах Российской Федерации, а также в аналогичных биомах, включая аридные и полуаридные зоны Азии и Африки.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш05-07 на тему «Исследование потенциала природных ресурсов и новых форматов отношений между Россией и странами Азии и Африки: моделирование экономического, политического и культурного сотрудничества».

Alasta A.F. Using Remote Sensing data to identify iron deposits in central western Libya // International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing (ICETCIP'2011) Bangkok Dec., 2011.

Climate-Energy.ru. URL: <https://climate-energy.ru> (дата обращения: 20.08.2024).

Gopinathan P., Parthiban S., Magendran T., et al. Mapping of ferric (Fe³⁺) and ferrous (Fe²⁺) iron oxides distribution using band ratio techniques with ASTER data and geochemistry of Kanjamalai and Godumalai, Tamil Nadu, south India, Remote Sensing Applications // Society and Environment. 2020. Vol. 18.

Index DataBase. Sensor: Landsat 8 // The IDB Project, 2011–2024. URL: <https://www.indexdatabase.de> (дата обращения 20.08.2024).

Rouse Jr.J. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / J. Rouse Jr, R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering // NASA special publication. 1973. 309 p.

Segal D. Theoretical Basis for Differentiation of Ferric-Iron Bearing Minerals, Using Landsat MSS Data // Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology, Fort Worth, TX, 1982. 949–951 p.

USGS — Science for a changing world. URL: <https://www.usgs.gov> (дата обращения: 20.08.2024).

Статья поступила в редакцию 14.05.2024, одобрена после рецензирования 12.05.2025, принята к публикации 28.06.2025