

УДК 528.8.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-120-131

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МИХАЙЛОВСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Екатерина Павловна Пшеченкова<sup>1</sup>✉, Алексей Андреевич Самсонов<sup>2</sup>,  
Алексей Алексеевич Бурмистров<sup>3</sup>, Юрий Антонович Чуриков<sup>4</sup>,  
Никита Николаевич Анисимов<sup>5</sup>, Виктор Иванович Старостин<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; deseos@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alek.burmistroff2017@yandex.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; churikov@geol.msu.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Nikita.n.anisimov@gmail.com

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; star@geol.msu.ru

**Аннотация.** Проведен анализ динамики изменений ландшафта и почвенного покрова в районе Михайловского горно-обогатительного комбината и прилегающей территории с помощью методов тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли. Проанализирована возможность использования геологических индексов для полуколичественной оценки содержания железа в почвах и хвостах обогащения железистых кварцитов.

**Ключевые слова:** Михайловское месторождение, Курская магнитная аномалия, техногенные объекты, хвостохранилище, оценка воздействия на окружающую среду, дистанционное зондирование Земли, обработка космоснимков

**Для цитирования:** Пшеченкова Е.П., Самсонов А.А., Бурмистров А.А., Чуриков Ю.А., Анисимов Н.Н., Старостин В.И. Использование данных дистанционного зондирования Земли для анализа экологической нагрузки техногенных объектов Михайловского горно-обогатительного комбината // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 120–131.

## THE USE OF EARTH REMOTE SENSING DATA TO ASSESS THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE MINING WASTE FACILITIES OF THE MIKHAILOVSKY MINING AND PROCESSING PLANT

Ekaterina P. Pshechenkova<sup>1</sup>✉, Aleksey A. Samsonov<sup>2</sup>, Aleksey A. Burmistrov<sup>3</sup>,  
Yury A. Churikov<sup>4</sup>, Nikita N. Anisimov<sup>5</sup>, Viktor I. Starostin<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; deseos@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alek.burmistroff2017@yandex.ru

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; churikov@geol.msu.ru

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Nikita.n.anisimov@gmail.com

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; star@geol.msu.ru

**Abstract:** The analysis of the dynamics of changes in the landscape and soils near the Mikhailovsky mining and processing plant using satellite image processing is carried out. The possibility of using spectral indices for a semi-quantitative assessment of the iron content in soils and tailings of ferruginous quartzite beneficiation is analyzed.

**Keywords:** Mikhailovsky deposit, Kursk magnetic anomaly, mining waste, tailings, environmental impact assessment, Earth remote sensing, satellite image processing

**For citation:** Pshechenkova E.P., Samsonov A.A., Burmistrov A.A., Churikov Yu.A., Anisimov N.N., Starostin V.I. The use of Earth remote sensing data to assess the environmental impact of the mining waste facilities of the Mikhailovsky Mining and Processing Plant. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 120–131. (In Russ.).

**Введение.** Михайловское железорудное месторождение располагается в северной части Курской магнитной аномалии в Железногорском районе Курской области. Михайловский горно-обогатительный комбинат (ГОК) ведет разработку Веретенинской залежи Михайловского месторождения с 1960 г. от-

крытым способом. За более чем 60-летний период деятельности ГОКа природная среда испытала колоссальное техногенное воздействие на площади порядка 50 км<sup>2</sup>. В результате образовались специфические формы рельефа в виде карьера, отвалов вскрышных пород и некондиционных руд. Балки

и овраги заняты искусственными водоемами, гидротвалом и хвостохранилищем. Процессы ветровой и водной эрозии приводят к загрязнению тяжелыми металлами почв, водных систем, накоплению токсичных элементов в растительности.

Современные методы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) все шире входят в практику геологоразведочных работ при поиске и разведке полезных ископаемых, позволяя изучать обширные территории (в том числе труднодоступные для полевых наземных работ) при низких финансовых затратах. Анализ спутниковых данных эффективно используется при оценке изменений окружающей среды при решении задач в области экологии и природопользования [Горный и др., 2023; Грехнев и др., 2015; Чуриков и др., 2023, Ducart, et al., 2016].

**Объект исследования.** Михайловское железорудное месторождение расположено в Железногорском районе Курской области вблизи г. Железногорска. Район месторождения приурочен к юго-западному склону Среднерусской возвышенности и представляет собой слабовсхолмленную равнину, расчлененную сетью речных долин, балок и оврагов. Интенсивная деятельность по разработке Михайловского месторождения привела к значительному изменению естественного рельефа. В процессе горнодобычных работ образовались новые специфические формы рельефа: карьер и отвалы, возвышающиеся на 40–50 м над дневной поверхностью. В русле реки Песочной построено хвостохранилище.

Климат района умеренно-континентальный. В теплый период (апрель - сентябрь) преобладают западные, северо-западные и северо-восточные ветры, в холодный период (октябрь-март) — западные, юго-западные, юго-восточные. Снежный покров устанавливается с конца ноября и сходит к середине апреля. Территория расположена в пределах лесостепной зоны, но коренная растительность почти не сохранилась. Обширные площади степей на водоразделах и склонах распаханы. Преобладающий тип почв — серые лесные, сформированные на легко- и среднесуглинистом субстрате.

Михайловское месторождение приурочено к железисто-кремнисто-сланцевой формации курской серии раннего протерозоя. Рудовмещающей толщей является коробковская свита, которая подразделяется на две железорудные и две сланцевые подсвиты. Объектом промышленной отработки является первая нижняя железорудная подсвита — Веретенинская залежь. Рудная толща залегает в виде моноклинали с крутым восточным падением (80°) и мощностью около 800 м. Железистые кварциты представлены магнетитовыми, гематит-магнетитовыми, магнетит-гематитовыми разновидностями с содержанием железа общего от 35,4 до 40,3% и характеризуются полосчатой текстурой, мелко- и тонкозернистой структурой. В тектонически ослабленных зонах и вблизи контактов железистых

кварцитов с вмещающими сланцами развита зона окисления мощностью до 400 м. На окисленных кварцитах в виде плащеобразных залежей залегают богатые руды коры выветривания мощностью до 20 м. Докембрийские образования повсеместно перекрыты породами осадочного чехла фанерозойского возраста мощностью от 35 м в центральной части месторождения до 190 м на флангах [Железные..., 2001].

На месторождении выделяются три технологических типа руд: железистые кварциты, окисленные железистые кварциты и богатые руды коры выветривания. Главными минералами неокисленных кварцитов являются магнетит, кварц, гематит, в незначительных количествах развиты зеленая слюда, эгирин, карбонаты, щелочные амфиболы, редко — апатит, пирит. Минеральный состав окисленных кварцитов — мартит, гематит, магнетит, кварц, второстепенные минералы — карбонаты, гидроокислы железа (лимонит, гидрогетит, гетит), зеленая слюда, редко — пирит, апатит, щелочные амфиболы, эгирин. Граница между окисленными и неокисленными железистыми кварцитами проводится по бортовому содержанию магнетитового железа — 16%. В богатых рудах железо связано с мартитом, гематитом и гидроокислами железа, в меньшей степени, с сидеритом; промышленную ценность имеют гематит-мартитовые и карбонат-мартитовые руды с содержанием железа от 45% до 69%.

Неокисленные железистые кварциты обогащаются путем тонкого измельчения и магнитной сепарации с дообогащением флотацией. Главные минералы, слагающие хвосты, — кварц, гематит, магнетит, гидроокислы железа; второстепенные — пирит, слюды, амфиболы, карбонаты. На 2020 г. в хвостохранилище уложено 915 млн т отходов обогащения. Окисленные кварциты в связи со сложностью их обогащения вынимаются как скальная вскрыша и складированы в специальные отвалы. Породы с верхних горизонтов карьера, представленные суглинками, глинами, песками, складированы в отвалы вскрыши.

*Эколого-геохимическая характеристика.* Сведения о степени загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами в зоне влияния Михайловского ГОКа у разных авторов варьируют от отсутствия накопления поллютантов в почвах вблизи карьера, отвалов и хвостохранилища до интенсивного загрязнения [Экологическая..., 2015]. При исследовании почвенного покрова в районе Михайловского ГОКа в качестве основных загрязнителей установлены свинец, цинк, кадмий, железо, кобальт, медь [Загрязнение..., 2012, Стифеев и др., 2015, Экологическая..., 2009; 2015]. Наиболее серьезным загрязняющим агентом является пыль, образующаяся при взрывах в карьерах, дроблении руды, а также сдуваемая с поверхностей отвалов и хвостохранилища. Известно, что максимальные концентрации элементов-загрязнителей, связанные с выпадением из атмосферных

Спектральные диапазоны данных Landsat

Номер канала	Landsat 4-5 TM		Landsat 8-9 OLI/TIRS	
	Спектральный диапазон, мкм — Пространственное разрешение, м	Описание	Спектральный диапазон, мкм — Пространственное разрешение, м	Описание
1	0,45–0,52 — 30	Синий	0,435–0,451 — 30	Фиолетовый
2	0,52–0,60 — 30	Зеленый	0,452–0,512 — 30	Синий
3	0,63–0,69 — 30	Красный	0,533–0,590 — 30	Зеленый
4	0,76–0,90 — 30	Ближний ИК (NIR)	0,636–0,673 — 30	Красный
5	1,55–1,75 30	Коротковолновый ИК	0,851–0,879 — 30	Ближний ИК (NIR)
6	10,40–12,50 — 120	Тепловой ИК (TIR)	1,566–1,651 — 30	Коротковолновый ИК (SWIR1)
7	2,08–2,35 — 30	Коротковолновый ИК	2,107–2,294 — 30	Коротковолновый ИК (SWIR2)
8	–	–	0,503–0,676 — 15	Панхроматический
9	–	–	1,363–1,384 — 30	Перистые облака
10	–	–	10,6–11,19 — 100	Тепловой ИК (TIR1)
11	–	–	11,5–12,51 — 100	Тепловой ИК (TIR2)

потоков, приурочены к верхнему горизонту почв. Однако, на участках сельскохозяйственных работ наблюдается снижение интенсивности аномалий, что связано, в частности, с механическим перемешиванием почвы при вспашке [Геохимия..., 1990].

**Материалы и методы.** Для оценки изменения почвенно-растительного покрова и распределения железа в техногенных объектах и почвах в районе Михайловского ГОКа были использованы космические снимки, полученные при помощи спутников Landsat. Снимки Landsat являются мультиспектральными, их пространственные и спектральные характеристики приведены в табл. 1.

Программа Landsat обладает наиболее обширной библиотекой космических изображений: на портале Геологической службы США [https://earthexplorer.usgs.gov] доступны спутниковые снимки с 1973 по 2023 г. включительно. На изучаемую территорию были получены безоблачные дневные изображения за 1 октября 1987 г. (Landsat-5) и 8 ноября 2023 г. (Landsat-8) с проведенной геометрической и радиометрической коррекцией данных.

Для полученных изображений была проведена атмосферная коррекция с помощью Semi-Automatic Classification Plugin QGIS по методу DOS (Dark Object Subtraction). Обработка космических снимков включала расчет вегетационного, водного и геологических индексов, метод отношения каналов и построение результирующих изображений на основе комбинаций каналов и их отношений. Операции по обработке снимков, пространственная привязка растровых изображений, сравнение данных в пространстве и времени, составление карт проводились в геоинформационной системе QGIS.

Спектрометрические методы ДЗЗ основаны на том, что каждый природный объект обладает уникальными характеристиками поглощения, отра-

жения и испускания электромагнитного излучения. Съемка местности производится в нескольких узких спектральных диапазонах (каналах) регистрируемого сигнала, как в видимой (красная, зеленая, синяя), так и невидимой человеческому глазу (ближняя, коротковолновая и тепловая инфракрасная) областях спектра. Данные ДЗЗ представляются в виде цифровых растровых изображений, при этом значение каждого пиксела снимка является суммарным сигналом от всех компонентов отображаемого участка земной поверхности.

Спектральная яркость горных пород обусловлена их химическим и минеральным составом, структурными и текстурными особенностями [Clark, 1999]. Для пород, состоящих из светлых и темных минералов (в частности, железистые кварциты), даже небольшое количество темноцветных зерен значительно увеличивает поглощение электромагнитного излучения, что вносит основной вклад в результирующий сигнал.

Спектральные характеристики основных дешифрируемых объектов на изучаемой площади представлены на рис. 1 по данным из спектральной библиотеки Геологической службы США (USGS).

Для интерпретации спутниковых данных используются индексы — производные изображения, получаемые путем проведения арифметических действий с значениями пикселей в разных каналах исходного изображения на основе особенностей поглощения и отражения соответствующих объектов.

Состояние и изменение растительного покрова оценивалось с помощью широко используемого вегетационного индекса (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) [Rouse, et al., 1973]:

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

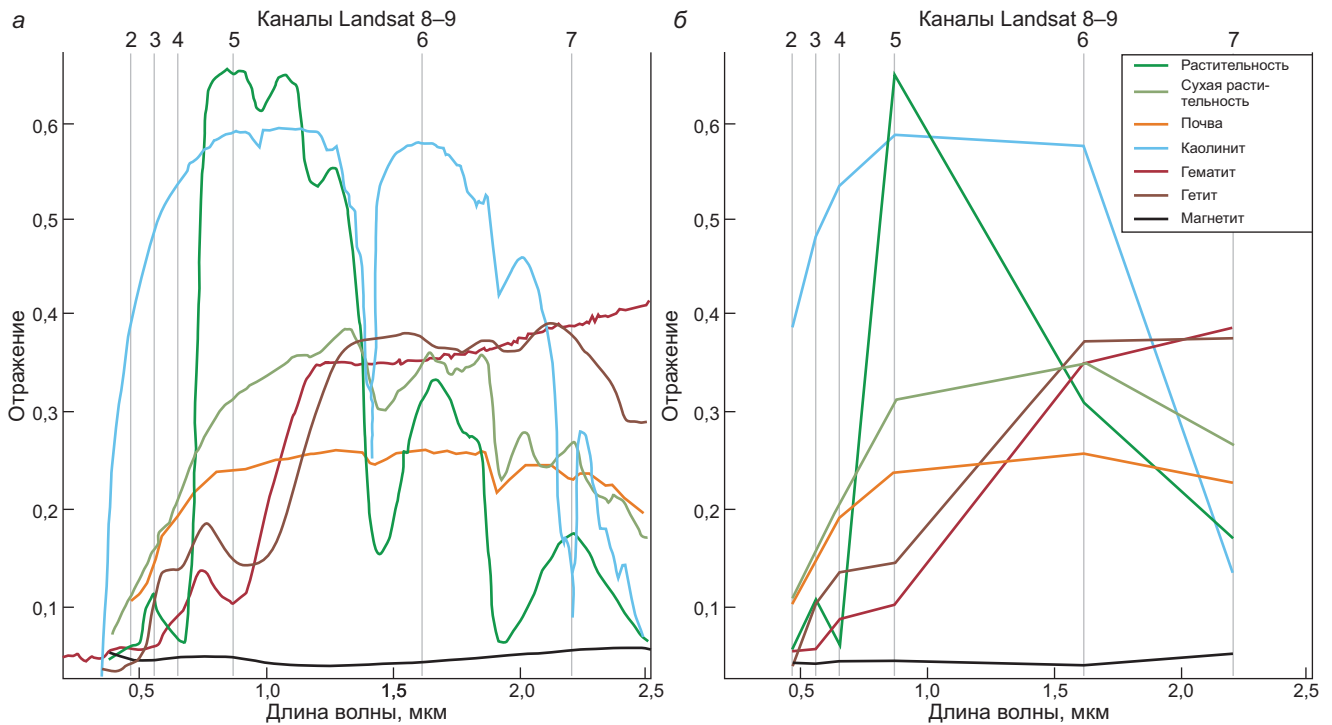


Рис. 1. Спектральные характеристики основных дешифрируемых объектов (а — данные из спектральной библиотеки USGS; б — спектры, приведенные к разрешению Landsat 8–9)

Расчет NDVI базируется на том, что высокая фотосинтетическая активность, связанная с произрастанием густой растительности, приводит к уменьшению отражательной способности объекта в красной зоне спектра (RED) и, наоборот, к увеличению отражательной способности в ближней инфракрасной области спектра (NIR). Формула для расчета NDVI устроена таким образом, что, в отличие от некоторых других вегетационных индексов, его значение всегда находится в промежутке от 1 до -1, поэтому данный индекс удобно использовать как для сравнения состояния растительности во времени и в пространстве, так и для идентификации состояния растительного покрова в зависимости от значения NDVI. Разработана универсальная шкала значений для летнего времени, по которой можно оценивать степень развития зеленой биомассы, значения <0 приравниваются к техногенным сооружениям (бетон); значения от 0 до 0,2 — отсутствие растительности (открытая почва); значения от 0,3 до 1 — наличие зеленой биомассы, где 0,3 — слабое развитие, а 1 — максимальное.

Для выделения на территории поверхностных водных объектов применялся водный индекс (WRI — Water Ratio Index) [Mukherjee, Samuel, 2016]:

$$WRI = \frac{GREEN + RED}{NIR + SWIR2}$$

Для оценки распределения железа по хвостохранилищу и почвам на прилегающей территории использовались наиболее распространенные геологические индексы (табл. 2), отражающие распростра-

Таблица 2

**Индексы, отражающие содержание железа в горных породах и почвах**

Название	Описание	Индекс	Каналы Landsat 8
Iron (Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> ) Oxides Ratio	выделяет все оксиды железа	$\frac{RED}{BLUE}$	$\frac{4}{2}$
Ferric Iron, Fe <sup>3+</sup>	содержание Fe <sup>3+</sup>	$\frac{RED}{GREEN}$	$\frac{4}{3}$
Ferrous Iron, Fe <sup>2+</sup>	содержание Fe <sup>2+</sup>	$\frac{SWIR2 + GREEN}{NIR + RED}$	$\frac{7}{5} + \frac{3}{4}$
		$\frac{RED}{SWIR1}$	$\frac{4}{6}$
Ferrous Minerals Ratio	выделяет все железосодержащие материалы	$\frac{SWIR1}{NIR}$	$\frac{6}{5}$

нение железосодержащих минералов в почвах и породах на открытых (свободных от растительности) территориях [Ducart, et al., 2016, Gopinathan, et al., 2022, Meer, et al., 2014]. Так, минералы оксидов железа представлены, в основном, гематитом и гетитом и характеризуются поглощением излучения в диапазоне длин волн 0,38–1,00 мкм, с пиками поглощения 0,52–0,60 мкм (для гематита и гетита), 0,86 мкм (для гематита), 0,92 мкм (для гетита) [Clark, 1999, Morris, et al., 1985, Segal, 1982], что соответствует 2, 3 и 5 каналам Landsat 9. При этом в диапазонах длин волн, соответствующих 4 и 6 каналам Landsat 9, для гематита и гетита фиксируется отражение излучения.

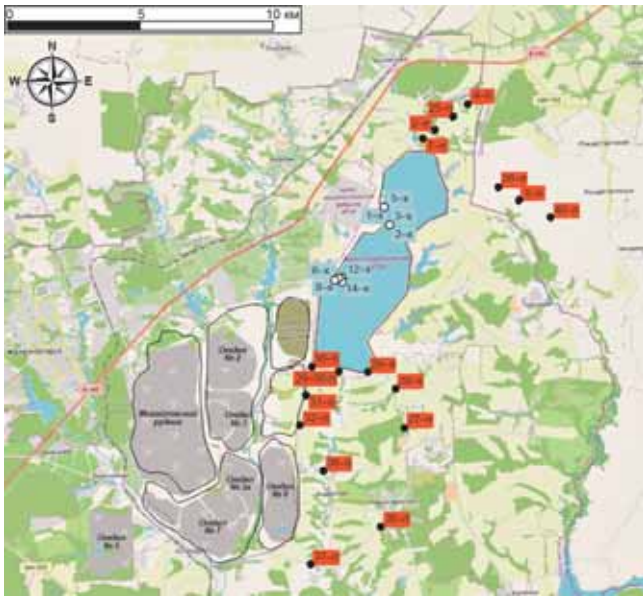


Рис. 2. Схема отбора проб (1-п — почвы, 1-х — материал хвостов)

На основе рассчитанных индексов были построены синтезированные цветные (RGB) изображения. Для построения таких изображений используются три снимка, каждому из которых присваивается свой цвет из трех основных цветов (красный, зеленый и синий). Так, для получения изображения в «естественных» цветах используются снимки, полученные в красном, зеленом и синем спектральных диапазонах. Изображения, получаемые с использованием комбинаций других каналов (в том числе и геологических индексов) называются псевдоцветными. Такие изображения позволяют выделять интересные классы объектов, в частности, почвы, геологические материалы.

Для заверки результатов анализа спутниковых данных на изучаемой территории отбирались пробы почв и хвостов обогащения для определения химического состава. Почвенные пробы отбирались на открытых участках из верхнего почвенного гори-

зонта А с глубины 10–15 см. Всего было отобрано 17 почвенных проб на территории, прилегающей к хвостохранилищу, и 16 проб сухих хвостов непосредственно с пляжей хвостохранилища. Схема отбора проб представлена на рис. 2. Все пробы высушивались и измельчались до состояния аналитической пудры (фракция 0,074 мм). Химический анализ проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей».

**Результаты и их обсуждение.** Сравнение снимков за 1987 и 2023 г. показывает, что ландшафт прилегающих к месторождению территорий претерпел существенные трансформации (рис. 3): увеличились размеры карьера, которые составляют  $5,9 \times 2,6$  км, а глубина — 375 м; образованы 2 новых отвала вскрышных пород, а площадь, занимаемая всеми отвалами, составляет порядка  $33,7$  км<sup>2</sup>. Значительно увеличились размеры хвостохранилища, которое состоит из трех отсеков общей площадью —  $18,4$  тыс. м<sup>2</sup>.

На изучаемой территории различаются основные классы объектов по их спектральным «образам»: почвы, растительность, хвосты обогащения руд, коренные породы, вскрытые в карьере (рис. 4). Для их выделения на снимках использовалось цветное синтезированное изображение на основе следующей комбинации каналов: в качестве красного взят коротковолновый инфракрасный канал (SWIR1), в качестве зеленого — ближний инфракрасный канал (NIR), в качестве синего — красный (RED). На результирующем изображении вся вегетирующая растительность имеет зеленые оттенки, распаханное поле — розовые и лиловые, а карьер, отвал окисленных железистых кварцитов и хвостохранилище — синие и фиолетовые.

Для выделения областей, содержащих железистые минералы, был составлен снимок на основе отношения каналов: отношению 6/7 присвоен красный цвет, 4/2 — зеленый, 4/6 — синий [Meer, 2014]. В такой комбинации зоны распространения



Рис. 3. Техногенные образования Михайловского ГОКа в 1987 г. (а) и в 2023 г. (б) (изображение в «естественных» цветах)

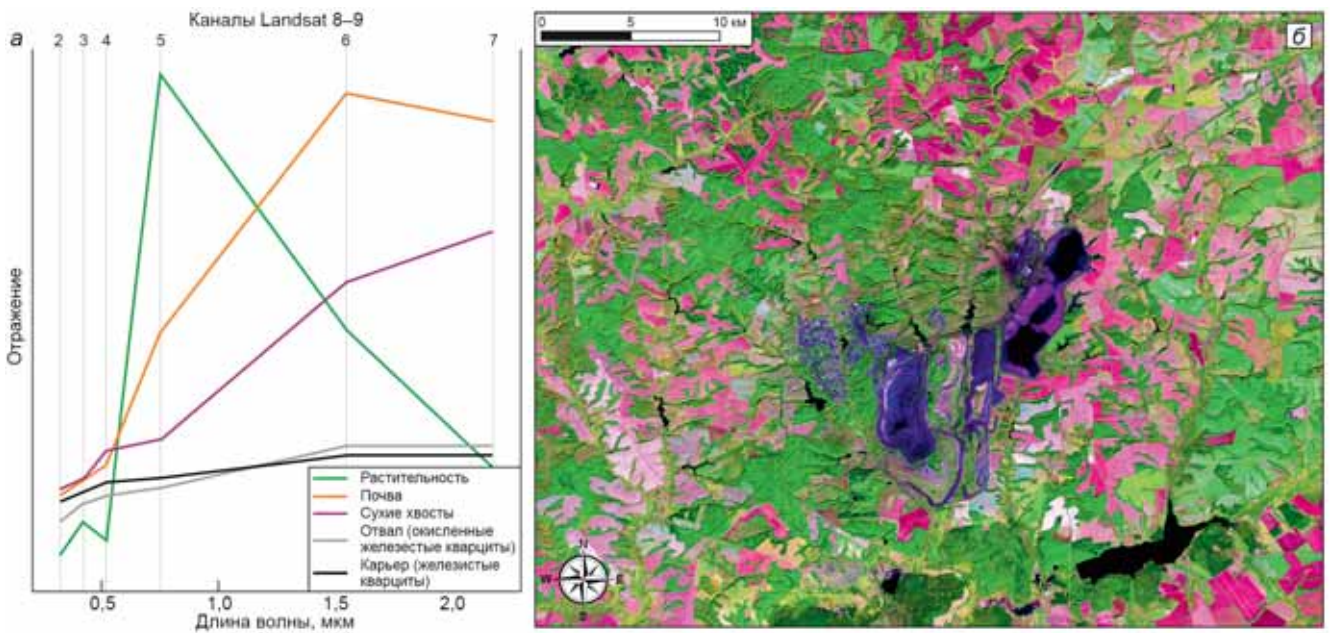


Рис. 4. Основные объекты, выделенные на территории: а — спектры основных классов объектов, полученные по снимкам Landsat-8; б — псевдоцветное изображение (SWIR1-NIR-RED)

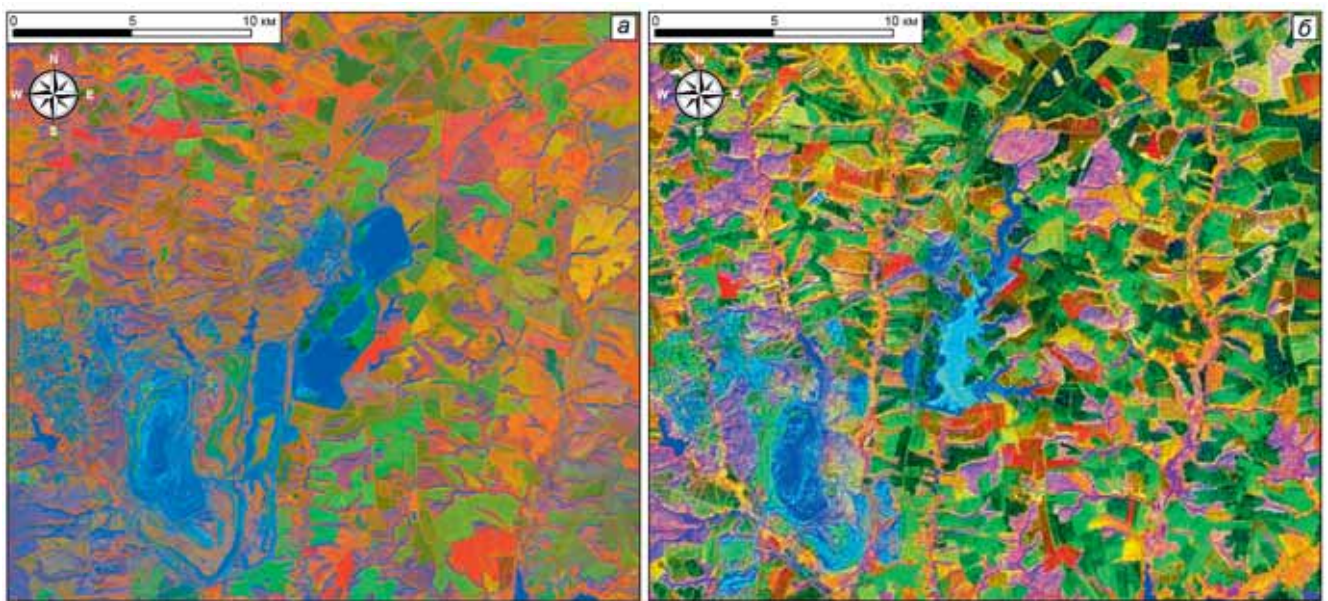


Рис. 5. Псевдоцветное изображение (красный канал: 6/7, зеленый канал: 4/2, синий канал: 4/6) (а — 1987 г., б — 2023 г.)

минералов оксидов железа окрашиваются в зеленые оттенки (открытые почвы), а оксиды двухвалентного железа — в синие (карьер, отвал окисленных железистых кварцитов) (рис. 5).

В работах [Чуриков и др., 2023, Gopinathan, et al., 2022] показана возможность полуколичественной оценки содержания железа в изучаемых объектах с помощью геологических индексов. По геологическим индексам были построены карты распространения железа в хвостах и почвах и проведен корреляционный анализ для установления связи между значением индекса и содержанием железа в пробе.

**Хвосты обогащения.** По результатам химического анализа содержание железа общего в хвостах составляет в среднем 19% (от 14,27 до 34,84%) (табл. 3).

Таблица 3

Содержание железа в хвостах обогащения Михайловского ГОКа

№ проб	1-х-1	1-х-2	2-х	3-х	4-х	5-х-1	5-х-2	5-х-3
Fe, %	16,26	18,75	34,84	18,24	22,75	18,26	17,74	14,27
№ проб	6-х	7-х	8-х	9-х	11-х	12-х	13-х	14-х
Fe, %	19,22	15,49	20,45	17,9	18,16	19,67	18,18	16,14

Важнейшими факторами, влияющим на спектральный сигнал хвостов, являются размер частиц и влажность [Нао, et al., 2019]. По гранулометрическому составу большая часть (90%) хвостов относится к классу  $-0,074$  мм. Столь маленький размер частиц материала отходов способствует увеличению

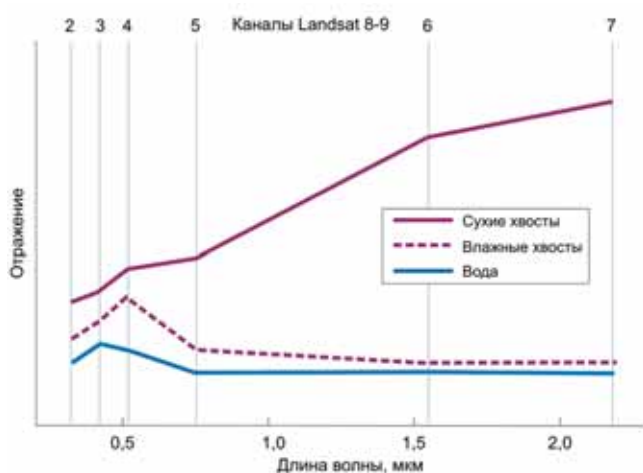


Рис. 6. Усредненные спектры сухих и влажных хвостов Михайловского ГОКа

отражению излучения от поверхности хвостов. В свою очередь, вода поглощает электромагнитное излучение в видимом и инфракрасном диапазоне, что выражается в снижении спектральной яркости, причем в коротковолновой инфракрасной области влияние воды выражено сильнее, чем в видимом диапазоне (рис. 6).

На всех картах распределения железа и железосодержащих минералов, построенных по геологическим индексам, в хвостохранилище наблюдается четкое разграничение жидкой (вода), твердой фазы (сухие хвосты) и смеси (влажные хвосты) (рис. 7). Зависимость между содержанием железа в пробах

хвостов, определенным по химическому анализу, и интенсивностью спектральных показателей отсутствует. Участки повышенных «концентраций железа» по индексам, построенных на основе спектральных особенностей железа в 2, 3, 4 каналах (рис. 7, а, б), за счет неравномерного поглощения излучения водой в видимой и ближней инфракрасной области спектра связаны с влажностью материала и приурочены к местам текущего выпуска пульпы. Для индексов, в формулу которых входят 5, 6, 7 каналы (рис. 7, в, г), картина получается противоположной: области повышенных значений соответствуют сухим хвостам, маркируя пляжи хвостохранилища.

**Почвенный покров.** В работе [Чуриков и др., 2023] продемонстрировано применение ДЗЗ для качественной оценки техногенного загрязнения земель железом в зоне разработки месторождений на примере Ковдорского ГОКа. Михайловское месторождение находится в Центрально-Черноземном регионе с развитым земледелием и техногенное воздействие испытывают земли сельскохозяйственного назначения.

Результаты химического анализа почв представлены в табл. 4. Фоновые значения содержания железа в почвах разнятся у разных авторов: от 3300 мг/кг [Стифеев и др., 2015] до 13 300 мг/кг (в пробе почвы на удалении 20 км от Михайловского хвостохранилища [Пашкевич, Понурова, 2006]).

Оценим уровень загрязнения почв железом из пылевых выпадений с хвостохранилища Михайловского ГОКа. По данным авторов [Пашкевич,

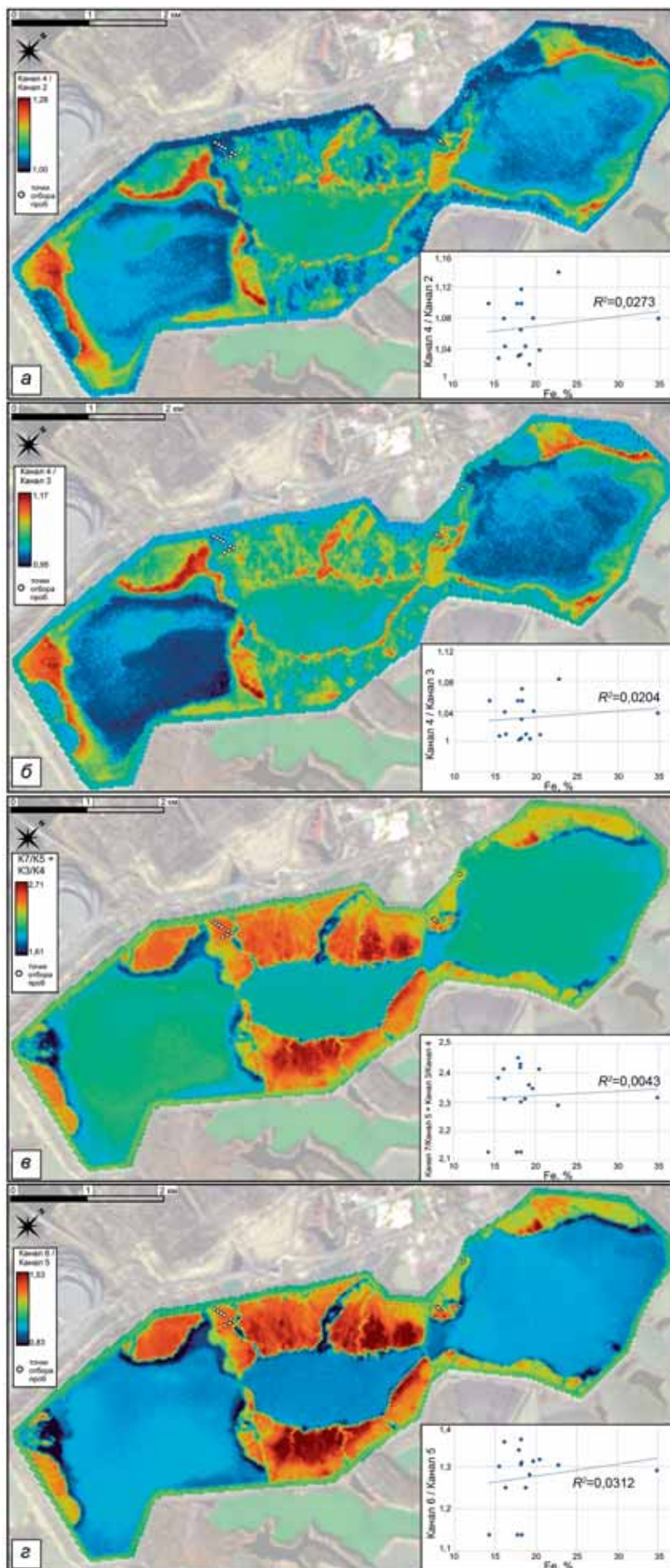
Таблица 4

Валовое содержание (мг/кг) тяжелых металлов в почвах в районе Михайловского ГОКа

№ пробы	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe, %	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sr	V	W	Zn
2-п	3,3	450	0,16	14,2	55	17,4	2,88	649	0,61	19,5	16,3	0,44	1	124,6	44	73,7	52
25-п	6,2	444	0,12	13,2	56	17,5	2,56	599	0,47	20,7	16,9	0,43	2	104,2	47	55,8	51
26-п	6,2	390	0,07	11,6	41	13,3	6,10	479	0,46	15,5	12,5	0,29	1	79,7	33	62,8	39
29–30-п	4,3	253	0,10	19,1	25	12,0	9,91	309	0,59	9,2	13,0	0,43	<1	50,3	17	178,8	38
30-п	4,4	284	0,06	10,2	28	11,1	11,62	338	0,40	11,0	11,9	0,31	2	64,8	24	65,4	33
38-п	3,9	418	0,14	14,6	53	18,0	2,38	618	0,68	18,4	19,0	0,53	<1	87,5	36	83,7	51
36-п	7,8	441	0,12	11,2	55	18,2	3,08	514	0,64	23,2	19,0	0,65	2	112,5	40	43,9	59
7-п	4,3	427	0,12	15,5	58	16,7	4,44	491	0,60	22,0	15,4	0,49	1	115,8	51	94,5	55
8-п	5,5	432	0,18	11,9	52	17,2	2,30	643	0,53	19,3	16,0	0,40	<1	99,5	42	49,9	54
27-п	5,0	301	0,12	31,2	47	14,6	2,42	389	0,80	17,9	13,1	0,41	3	66,1	35	251,1	40
40-п	7,4	372	0,09	13,9	38	12,1	8,88	409	0,45	16,1	10,0	0,34	2	67,4	36	87,9	42
4-п	3,4	438	0,18	10,9	52	16,4	2,04	605	0,45	18,6	17,9	0,42	3	92,3	43	38,9	47
31-п	8,8	400	0,19	20,1	46	24,6	3,50	508	0,54	17,1	19,0	0,60	2	87,2	36	142,0	48
37-п	1,6	186	0,08	36,1	25	7,3	1,12	445	0,60	7,9	8,4	0,21	2	38,9	15	354,0	25
32-п	2,3	393	0,05	11,6	44	15,4	2,19	369	0,58	14,3	17,4	0,49	2	82,8	31	60,5	35
29-п	3,6	225	0,07	20,4	22	8,9	10,99	274	0,65	8,3	8,2	0,27	1	45,6	15	191,1	34
28-п	3,4	386	0,13	9,5	41	16,2	2,77	569	0,49	17,4	17,4	0,41	1	81,4	34	31,2	37
ПДК*	5,0	–	1,00	5,0	6,0	3,0	–	1500	–	4,0	32,0	4,5	–	–	150	–	23

\* — СанПиН 1.2.3685-21.

Рис. 7. Карты значений геологических индексов в хвостохранилище Михайловского ГОКа (2023 г.): а — индекс, характеризующий распространение оксидов железа; б — индекс, характеризующий распространение Fe<sup>3+</sup>; в — индекс, характеризующий распространение Fe<sup>2+</sup>; г — индекс, характеризующий распространение железосодержащих минералов (Ferrous Minerals Ratio)



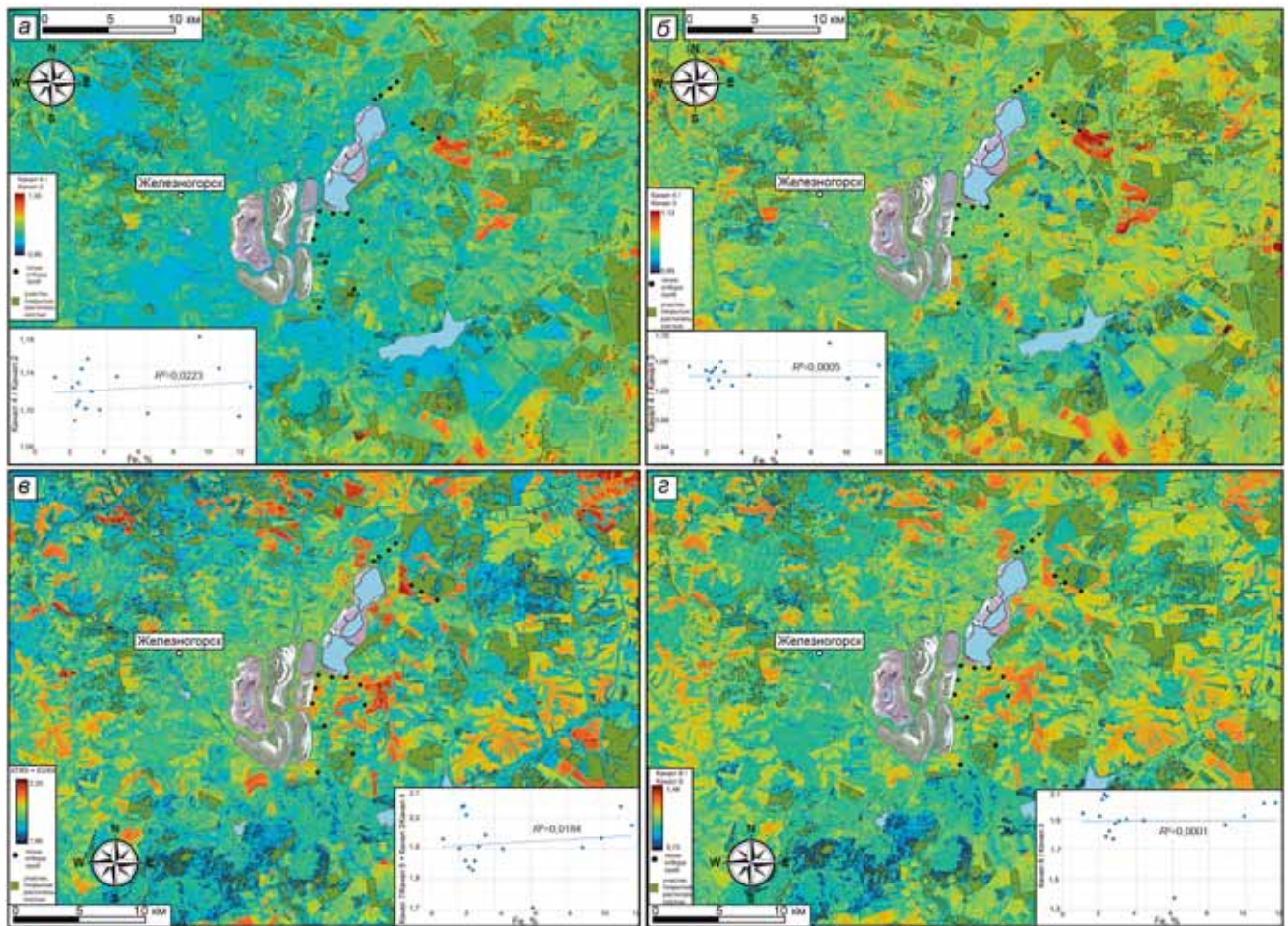


Рис. 8. Карты значений геологических индексов на участках открытых почв в районе Михайловского ГОКа (2023): *а* — индекс, характеризующий распространение оксидов железа; *б* — индекс, характеризующий распространение  $Fe^{3+}$ ; *в* — индекс, характеризующий распространение  $Fe^{2+}$ ; *з* — индекс, характеризующий распространение железосодержащих минералов (Ferruginous Minerals Ratio)

Понурова, 2006], в сутки с 1 га поверхности пляжей хвостохранилища сдувается от 2 до 5 т мелкодисперсной пыли с содержанием железа — 168 500 мг/кг, а основной объем рассеянной в воздухе пыли выпадает в радиусе 5 км от хвостохранилища. Принимая упрощенную модель равномерного рассеивания пыли и ее наземного выпадения, уровень годовой атмотехногенной нагрузки в зоне радиусом 5 км от хвостохранилища составляет 2,87 кг/м<sup>2</sup> пыли, в которой содержится 0,484 кг железа. В качестве фонового принято содержание железа в верхнем слое (до 20 см) серых лесных почв на удалении 20 км от Михайловского ГОКа, которое составляет 13300 мг/кг [Пашкевич, Понурова, 2006]. Средняя плотность твердой фазы для горизонта А почвенного профиля — 2,43 г/см<sup>3</sup> [https://egrpr.esoil.ru]. Таким образом, превышение фонового содержания железа за год в верхнем слое почвы мощностью 5 см за счет железа, поступающего с пылью, составляет порядка 30%.

Спектральная яркость сухих почв определяется содержанием органических (гумусовых) веществ и окислов железа. Основными минералами железа в почвах являются гематит и гетит. Полосы поглощения излучения в видимом и инфракрасном

диапазонах для минералов железа и органического вещества перекрываются, что оказывает влияние на результирующий сигнал от почв и затрудняет интерпретацию. Содержание в почве органического вещества более 2% приводит к «маскированию» сигнала от минералов железа и его искажению более чем на 25% [Pearlshtien, Ben-Dor, 2020]. По данным Единого реестра почвенных ресурсов России, содержание гумуса в гумусовом горизонте серых лесных почв на территории Железногорского района составляет 4–8%.

Как и для хвостов, важным фактором, оказывающим влияние на спектральный сигнал от почвенного покрова, является влажность. Увеличение увлажненности почвы приводит к снижению спектральной яркости [Тематическое..., 2020].

Для почв, загрязненных тяжелыми металлами, наблюдается дополнительное искажение спектральных характеристик. Тяжелые металлы связываются компонентами почв (в частности, оксидами и гидроксидами железа), что на спектральной кривой выражается в уменьшении глубины пиков поглощения, соответствующих определенному компоненту, и в общем сглаживании кривой [Kim, et al., 2020].

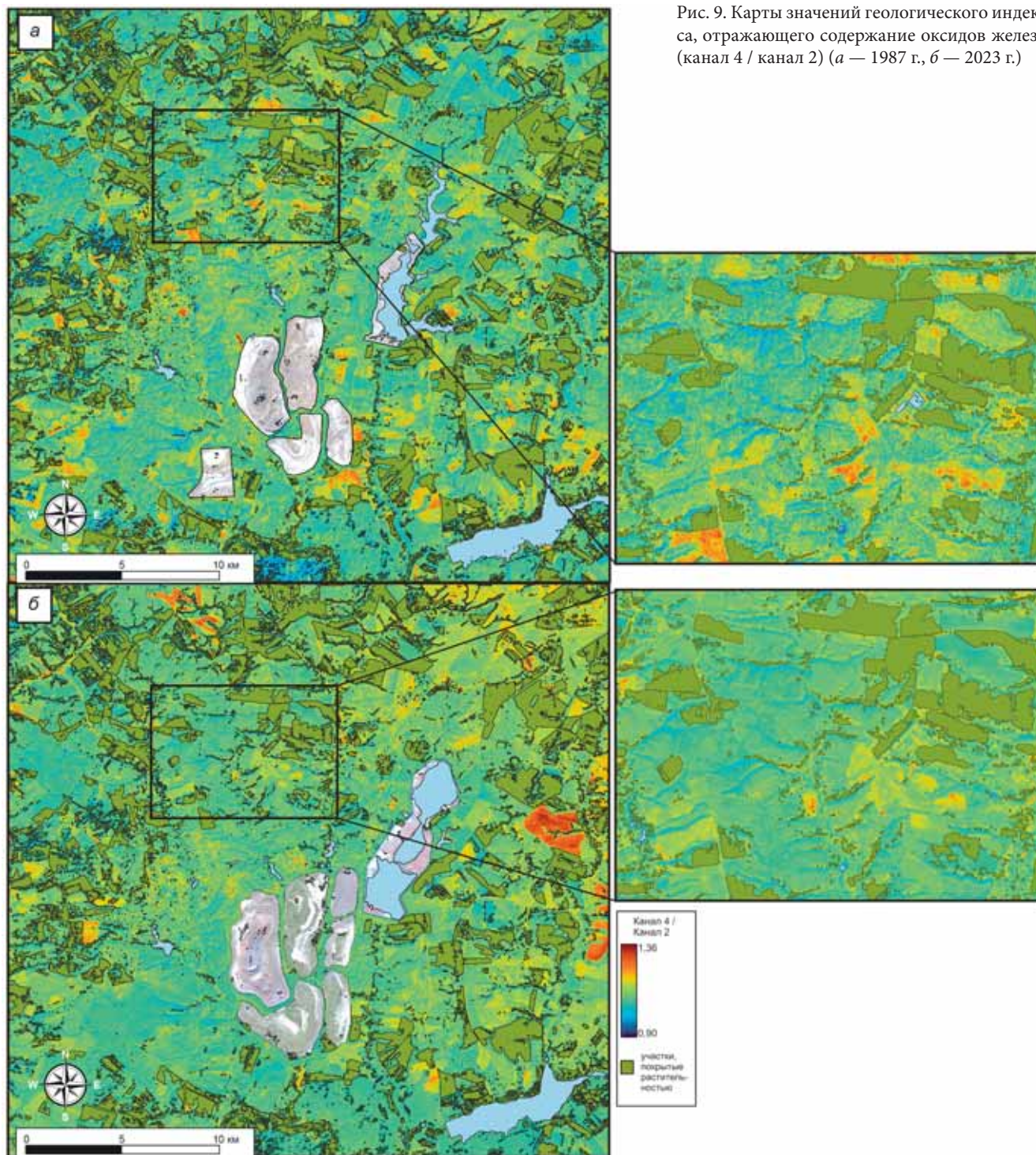


Рис. 9. Карты значений геологического индекса, отражающего содержание оксидов железа (канал 4 / канал 2) (а — 1987 г., б — 2023 г.)

С помощью индексов NDVI и WRI были определены участки, покрытые растительностью и поверхностными водами, которые исключались при расчете геологических индексов, характеризующих распространение железа в почвах. Анализ полученных изображений показал, что на изучаемой территории наблюдается довольно равномерное распределение участков как повышенных, так и пониженных значений спектральных индексов, а пространственное расположение областей повышенных или пониженных значений не имеет какой-либо привязки к техногенным объектам. При этом показатели

содержания железа в пробах почв, определенного с помощью химического анализа, не коррелируют с зонами изменений интенсивности спектральных показателей (рис. 8).

При сравнении разновременных снимков за 1987 и 2023 г. на изучаемой территории не наблюдается увеличения абсолютных значений индексов, характеризующих содержание железа (рис. 9), при этом фиксируется перераспределение участков повышенных и пониженных значений спектральной яркости, что отражает общее состояние почв в конкретный период.

Таким образом, по спутниковым данным для Михайловского месторождения не удастся обнаружить и выделить повышенные содержания железа в почвах, несмотря на зафиксированные в ряде работ техногенные геохимические аномалии железа по результатам полевых исследований.

**Заключение.** В данном исследовании показана возможность проведения методами ДЗЗ экологического мониторинга прилегающих к месторождению территорий. С помощью спутниковых снимков хорошо дешифрируются участки разработки недр и сформированные в процессе горнопромышленной деятельности техногенные объекты — карьеры, отвалы, хвостохранилища. Сравнение разновременных снимков позволяет проследить и оценить динамику произошедших изменений ландшафта. Для улучшения спектральной выраженности дешифрируемых объектов и отнесения их к определенному классу (карьер, хвостохранилище, почвы, растительность) используются псевдоцветные изображения RGB на основе каналов и их отношений.

При сравнении разновременных снимков за 1987 и 2023 г. на территории, прилегающей к Михайловскому ГОКу, не наблюдается увеличения абсолютных значений индексов, характеризующих содержание железа, т. е. по спутниковым данным не удастся обнаружить и выделить повышенные содер-

жания железа в почвах, несмотря на зафиксированные в ряде работ техногенные геохимические аномалии железа по результатам полевых исследований. Это, хотя и предварительный, но положительный вывод. Он указывает, что за 36-летний период не произошло существенных изменений экологической обстановки. Более того, вполне вероятно, что и на сельскохозяйственные работы эти изменения не оказали существенного влияния.

Применение геологических индексов на современном этапе развития методов ДЗЗ неоправданно для оценки содержаний элементов, в частности железа, в таких объектах, как почвы и тонкодисперсные хвосты обогащения руд. Спектральный сигнал, регистрируемый от почвенного покрова и хвостов, является результатом разнонаправленного влияния свойств изучаемых материалов (химический состав, влажность и размер частиц, количество органического вещества для почв) на поглощение и отражение электромагнитного излучения, и выделить вклад только химического состава не представляется возможным. Для регионов с развитым сельскохозяйственным земледелием дополнительное влияние оказывают внешние факторы (вспашка земель), изменяющие концентрацию химических элементов в почвах и, как следствие, итоговый спектральный сигнал.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.

Горный В. И., Бровкина О. В., Киселев А. В. и др. Тенденции развития дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 2. С. 9–38.

Грехнев Н.И., Липина Л.Н., Усиков В.И. К вопросу оценки экологического риска с использованием метода дистанционного зондирования земли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S30. С. 437–447.

Железные руды КМА: Монография / Н.И. Голивкин, Н.Д. Кононов, В.П. Орлов и др.; гл. ред. В.П. Орлов. М.: Геоинформмарк, 2001. 615 с.

Загрязнение почв тяжелыми металлами / Ю.Н. Водяницкий, Д.В. Ладонин, А.Т. Савичев. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. 304 с.

Пашкевич М.А., Понурова И.К. Геоэкологические особенности техногенного загрязнения природных экосистем зоны воздействия хвостохранилищ Михайловского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. Вып. 5. С. 349–356.

Стифеев А.И., Бессонова К.Н., Кемов К.Н. и др. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне функционирования Михайловского железорудного комбината КМА // Вестник КГСХА. 2015. № 4. С. 54–57.

Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: Учебное

пособие / А.Н. Шихов, А.П. Герасимов, А.И. Пономарчук, Е.С. Перминова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2020. 191 с.

Чуриков Ю.А., Самсонов А.А., Ишмухаметова В.Т. Использование данных дистанционного зондирования Земли для анализа экологической нагрузки и рудного потенциала техногенных отвалов Ковдорского ГОКа // Недропользование XXI. 2023. № 3–4 (100). С. 52–59.

Экологическая геология Курской магнитной аномалии (КМА): Монография / И.И. Косинова, Т.А. Барабошкина, А.Е. Косинов и др. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2009. 216 с.

Экологическая ситуация в районах размещения горнодобывающих предприятий региона Курской магнитной аномалии монография / А.Г. Корнилов и др. Белгородский гос. нац. исслед. ун-т. Белгород, 2015. 102 с.

Clark R.N. Chapter 1 — Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy // Rencz A.N. (ed.) Manual of Remote Sensing. Remote Sensing for the Earth Sciences. New York: John Wiley and Sons, 1999. Vol. 3. P. 3–58.

Ducart D.F., Silva A., Toledo B., Assis L. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil // Brazilian Journal of Geology. 2016. № 46(3). P. 331–349.

Gopinathan P., Priyadarsi R., Subramani T., Karunanidhi D. Detection of iron-bearing mineral assemblages in Nainital granulite region, south India, based on satellite image processing and geochemical anomalies // Environmental Monitoring and Assessment. 2022.

Hao L., Zhang Z., Yang X. Mine tailing extraction indexes and model using remote-sensing images in southeast Hubei Province // Environmental Earth Sciences. 2019. 78: 493.

*Kim H., Yu J., Wang L., et al.* Variations in Spectral Signals of Heavy Metal Contamination in Mine Soils Controlled by Mineral Assemblages // *Remote Sensing*. 2020. № 12. 3273.

*Morris R.V., Lauer H.V., Lawson C.A., et al.* Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (alpha-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), maghemite (gamma-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), goethite (alpha-FeOOH) and lepidocrocite (gamma-FeOOH). *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 1985, 90: 3126–3144.

*Mukherjee N.R., Samuel C.* Assessment of the Temporal Variations of Surface Water Bodies in and around Chennai using Landsat Imagery // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9(18).

*Pearlshtien D.H., Ben-Dor E.* Effect of Organic Matter Content on the Spectral Signature of Iron Oxides across the VIS–NIR Spectral Region in Artificial Mixtures: An Example

from a Red Soil from Israel // *Remote Sensing*. 2020. № 12. 1960.

*Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, 1973. P. 309–317.

*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*, 1982. P. 949–951.

*Van der Meer F.D., van der Werff H.M.A., van Ruitenbeek F.J.A.* Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 148. P. 124–133.

<https://earthexplorer.usgs.gov>

<https://egrpr.esoil.ru>

Статья поступила в редакцию 29.05.2024,  
одобрена после рецензирования 03.06.2024,  
принята к публикации 25.01.2025