



Чуриков Ю.А.
МГУ имени М.В. Ломоносова
магистрант
churikov@geol.msu.ru



Самсонов А.А.
канд. геол.-мин. наук
МГУ им М.В. Ломоносова
старший научный сотрудник
samsonov@geol.msu.ru



Ишмухаметова В.Т.
канд. геол.-мин. наук
ИГЕМ РАН
старший научный сотрудник
geoivt@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И РУДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННЫХ ОТВАЛОВ КОВДОРСКОГО ГОКА

Проведен анализ динамики изменений почвенного покрова и водных ресурсов территории вокруг Ковдорского ГОКа с помощью методов математического сравнения космоснимков, сделанных в 1986 и 2022 годах. Выявлено значительное загрязнение почвенного покрова пылью за счет выбросов, образованных при проведении добычных работ в карьерах. В связи со строительством хвостохранилищ определены существенные изменения речной системы изучаемого района. Вместе с тем, при анализе спутниковых снимков отвалов и хвостов Ковдорского ГОКа, выделены потенциальные площади для разведки техногенных образований в качестве месторождения железа.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Ковдорское месторождение, обработка космоснимков, почвенно-растительный покров, техногенные объекты, экологическая нагрузка, спутниковая геология.

Вплоть до 20-х годов прошлого века Мурманская область была территорией, на которой не велась масштабная горнопромышленная деятельность. Основными жителями Кольского полуострова были саамы, занимавшиеся оленеводством, а также русские поморы, занятием которых была рыбная ловля. Однако, ситуация резко изменилась в 1921 году, когда академик Е. А. Ферсман обнаружил в Хибинах залежи апатита, а спустя ещё несколько лет были обнаружены также месторождения многих других видов полезных ископаемых [3]. Среди них было и Ковдорское железорудное месторождение, открытое в 1933 году. Вскоре по всему полуострову началось освоение новых территорий: появились первые карьеры и горно-обогатительные комбинаты. Однако, вместе с развитием промышленности на Кольский полуостров возросла экологическая нагрузка: добыча сырья из карьеров немедленно повлекла за собой образование отвалов и хвостохранилищ, а переработка полезных ископаемых на горно-обогатительных комбинатах – колоссальные выбросы во все компоненты окружающей среды: атмосферный воздух, воду и почву. Отвалы, в свою очередь, не просто занимают определенную природную территорию, где раньше была растительность, но и оказывают значительное влияние окружающую среду: среди негативных экологических последствий выделяются пылевые выбросы, водная и ветровая эрозия, просадки и оползни [4]. В настоящее время помимо экологических проблем актуальным является и сокращение ресурсного потенциала Ковдорского ГОКа.

Современные средства дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволяют эффективно определять экологическую нагрузку в регионах [2], а также могут успешно применяться при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых [1]. Однако, существенными осложняющими факторами для использования данных ДЗЗ является обильная растительность, а также наличие мощных перекрывающих аллювиальных и элювиальных отложений. С этой позиции Кольский полуостров удобен для работы с использованием методов ДЗЗ из-за небогатого растительного мира, а изучение и интерпретация данных, полученных этими методами, на территориях полностью лишённых лесного покрова хвостохранилищ и отвалов горного производства может иметь максимальную эффективность.

Основная цель работы – провести анализ, основанный на интерпретации спектральных данных спутниковых снимков, экологической нагрузки на рассматриваемой территории и потенциального использования отвалов Ковдорского ГОКа в качестве техногенных источников железной руды,

Материалы и методы

Для проведения оценки динамики изменения состояния почвенно-растительного покрова Ковдорского массива были использованы космические снимки, полученные при помощи спутников Landsat, запущенных на орбиту Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и Геологической службой США (USGS). Спутниковые снимки Landsat имеют характеристики пространственного разрешения в 30 метров, а также спектральных диапазонов в 0,4-1,1 мкм. Данные снимки являются многоспектральными: снимки Landsat-5 содержат семь спектральных каналов, снимки Landsat-7 – восемь каналов, а снимки Landsat-8 – одиннадцать. Канал представляет собой спектральный диапазон, находящийся на определенной частоте электромагнитного спектра. Причем этот спектральный диапазон может быть как видимым (красный, зеленый, синий), так и невидимым (ближний и коротковолновый инфракрасный) человеческому глазу.

Программа Landsat обладает наиболее обширной библиотекой космических изображений: на портале GloVis USGS доступны спутниковые снимки с 1973 по 2022 годы включительно [9].

В рамках предобработки проведена атмосферная коррекция с помощью Semi-Automatic Classification Plugin QGIS, с использованием метода DOS (Dark-Object Subtraction). Обработка космических снимков (расчёт вегетационных и геологических индексов) проводилась в геоинформационной системе SAGAGIS. Пространственная привязка растровых изображений, сравнение данных в пространстве и времени, а также составление карт были проведены в геоинформационной системе ArcGIS.

Для того, чтобы отслеживать изменения почвенно-растительного покрова на территории Мурманской области, были использованы многоспектральные космические снимки Landsat за 26 июля 1986 года (Landsat-5) и 21 июля 2022 года (Landsat-8).

Динамика состояния почвенно-растительного покрова рассчитывалась через нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) [6]. Алгоритм расчёта данного индекса впервые разработал американский ученый Джон Роуз в 1973 году.

Формула для расчёта:

$$NDVI = \frac{NIR + RED}{NIR - RED} \quad (1)$$

NIR – ближний инфракрасный канал (NearInfrared), RED – красный канал.

Данная формула основана 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 зоне ближнего инфракрасного канала (NIR). Формула для расчёта 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, а также для идентификации состояния растительного покрова в зависимости от значения NDVI. Разработана универсальная шкала значений для летнего времени, по которой можно оценивать степень развития зелёной биомассы, значения <0 приравниваются к техногенным сооружениям (бетон); значения 0 до 0,2 – отсутствие растительности; 0,3-1 наличие зелёной биомассы, где 0,3 слабое развитие, а 1 максимальное.

Используется также и альтернативный показатель MNDVI – модифицированный стандартизованный индекса различий воды. Вода имеет положительные значения, в отличие от схожего индекса NDWI, где значения воды отрицательные. С помощью данного индекса можно обнаружить обмеление либо, наоборот, увеличение площади водоёмов и водотоков, отследить появление либо исчезновение хвостохранилищ, а также обнаружить просачивание в карьер подземных вод.

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR2}{GREEN + SWIR2} \quad (2)$$

GREEN – зелёный канал; SWIR 2 – коротковолновый инфракрасный канал (Shortwave Infrared).

Для оценки распределения железа по отвалам и хвостохранилищам использовались расчётный коэффициент «Ferrous Minerals Ratio», а также прямой пересчёт спектральных данных для Fe²⁺ и Fe³⁺.

$$FerrousMineralsRatio = \frac{SWIR-1}{NIR} \quad (3)$$

SWIR-1 – Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, NIR – ближний инфракрасный канал (NearInfrared).

Метод соотношения железистых минералов (FM) представляет собой геологический индекс для определения характеристик горных пород, содержащих некоторое количество железосодержащих минералов, с использованием диапазонов SWIR и NIR.

$$Fe^{3+} = \frac{Red}{Green} \quad (4)$$

RED – красный канал, Green – зелёный канал.

$$Fe^{2+} = \frac{SWIR - 2}{NIR} + \frac{Green}{Red} \quad (5)$$

RED – красный канал, Green – зелёный канал, SWIR-2 – Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, NIR – ближний инфракрасный канал (NearInfrared).

В отвалах и хвостах отбирались заверочные пробы для анализа химического состава. Все пробы высушивались и измельчались до состояния аналитической пудры (фракция <0,063 мкм). Химический анализ проводился методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии XRF-анализатором Niton FxL 950 старшим научным сотрудником Лубковой Т.Н. на кафедре геохимии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Результаты

Экологическая оценка. Проведенный анализ спутникового снимка, сделанного в июле 2022 года и его сравнение с референсным снимком от 26 июля 1986 года (*рис. 1а-б*) показал, что за 36 лет на территории Ковдорского железорудного месторождения и прилегающих территориях в ландшафте произошли существенные изменения. В частности, значительно увеличилась площадь карьера, составлявшая в 1986 году 2,88 км². Деятельность горно-обогатительного производства (освоение карьера) неразрывно связана с формированием на прилегающих территориях отвалов и хвостохранилищ, где рассматриваемый интервал времени образовались три отвала и два хвостохранилища общей площадью 9,03 км² (*рис. 1б*). Помимо этого, из анализа снимков следует, что вся прилегающая территория имеет повышенное содержание железа за счет значительного загрязнения пылью, которая в этот период распространилась на 20 км вокруг карьера. (*рис. 1в*).

Сравнение MNDVI показало, что:

1) в 1986 году вода в пределах карьера отсутствовала, но по данным снимка 2022 года можно судить о наличии воды на дне карьера. Это говорит о проникновении в карьер подземных вод в результате значительного увеличения его глубины. При этом заметно, что окружающие реки значительно обмелели. С целью продолжения работ по добыче полезных ископаемых Ковдорский ГОК организовал насосные станции, которые выкачивают воду со дна карьера в озеро Ковдор.

2) в 1986 году первое поле хвостохранилища функционировало в штатном режиме, а в 2022 году MNDWI резко уменьшился в связи с осушением хвостохранилища и последующей добычей из него богатого апатитом и бадделейтом минерального сырья.

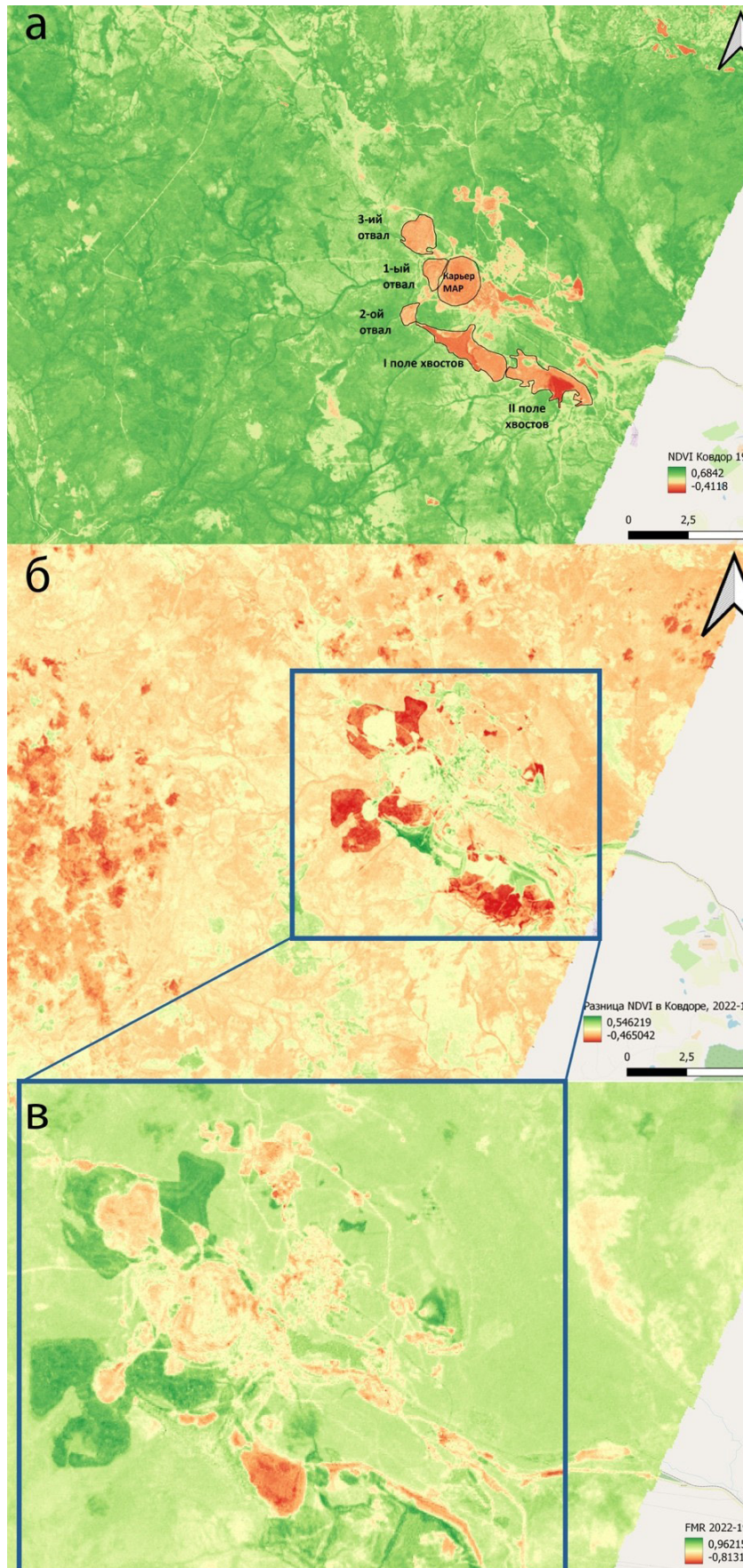


Рис. 1. Спектрональные спутниковые снимки Ковдорского ГОКа
 а – значения NDVI на снимке 1986 г;
 б – показатель разницы NDVI между снимками 1986 и 2022 гг;
 в – разность значений MNDVI на снимках 1986 и 2022 гг.

Железородный потенциал отвалов ГОКа.
 В настоящее время в хвостах Ковдорского месторождения накоплено большое количество железорудных отходов, которые могут использоваться как самостоятельное полезное ископаемое. Сейчас ГОК потребляет магнетит, добываемый из продуктивных горизонтов Ковдорского месторождения, однако, запасы магнетита неизбежно истощаются. По этой причине накопленное железо в хвостах может стать, в определенной степени, эффективным решением данной проблемы. Современные методы анализа спутнико-

вых снимков позволяют оценить распространение железа и его форму нахождения на исследуемой территории.

Сравнение Ferrous Minerals Ratio за 1986 и 2022 годы показало следующие результаты (*рис. 2а-в*):

Увеличение содержания железосодержащих минералов во всех трёх отвалах, в результате прямого повышения интенсивности показателя по данным ДЗЗ, связано с увеличением площади отвалов; резкое уменьшение содержания железистых минералов в первом хвостохранилище по отношению к 1986 г объясняется усовершен-

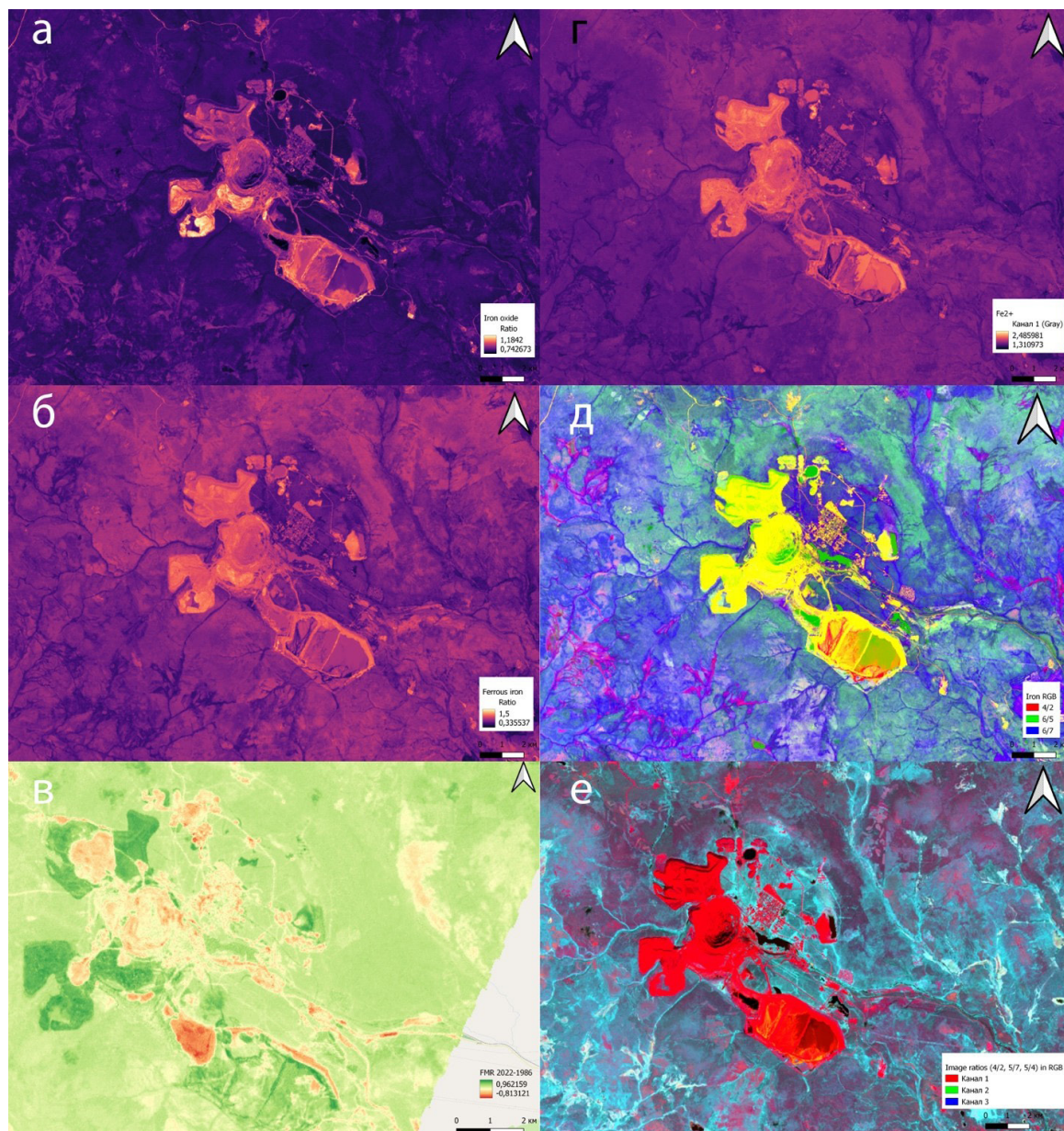


Рис. 2.
 Спектрональные спутниковые снимки Ковдорского ГОКа крупным планом.
 а – Ferrous Minerals Ratio, 1986 год; б – Ferrous Minerals Ratio, 2022 год; в – изменение индекса Ferrous Minerals Ratio с 1986 по 2022 год; г – интенсивность двухвалентного железа (Fe²⁺), 2022 год; д – RGB-композиция в «ложных цветах», созданная с целью картирования железа (Red – 4/2, Green – 6/5, Blue – 6/7); е – RGB-композиция в «ложных цветах» (Red – 4/2, Green – 5/7, Blue – 5/4)

ствованием технологии извлечения железа из руды; уменьшение содержания железа в карьере со временем говорит об истощении Ковдорского железорудного месторождения.

Вышеописанный показатель чувствителен к большинству типов преимущественно железных минералов (силикаты, оксиды и гидроксиды). Для уточнения химической формы нахождения железа в отвалах анализировалось распределение Fe^{3+} и Fe^{2+} . Трёхвалентное железо имеет неоднородное распределение и максимально интенсивные значения на снимках совпадают с соответствующими значениями показателя Ferrous Minerals Ratio. В отличие от трёхвалентного железа, содержание оксидов двухвалентного железа распределено практически равномерно: его содержание одинаково высоко во всех отвалах и в самом карьере (рис. 2г).

С целью наиболее точного обнаружения области, содержащей железо, был проведён анализ в комбинации RGB-каналов с использованием технологии «ложные цвета». Ложные цвета (псевдоцвета) – это методы визуализации, которые используются для отображения визуальной информации в цвете, которые были записаны в разных частях электромагнитного спектра (включая как видимую, так и невидимую его часть). В качестве красного спектра (Red) был использован Iron oxide (4/2) [8], в качестве зеленого спектра – 6/5 (Ferrous iron), в качестве синего спектра – 6/7 (Clay minerals) [5]. Горные породы, наиболее богатые железом, здесь отображаются жёлтым цветом, горные породы, содержащие небольшое количество железа – красным цветом, водные участки – зелёным цветом, а все остальные территории – серым цветом и его оттенками (рис. 2д).

Существует альтернативный способ определения содержания железа в горных породах [7]. Он также основан на технологии «ложных цветов», однако в качестве красного спектра (Red) здесь выступает соотношение 4/2, в качестве зеленого канала (Green), а в качестве синего спектра (Blue) – соотношение 5/4 (рис. 2е). Наиболее богатые железом горные породы отображаются красным цветом, породы, содержащие небольшое количество железа – жёлтым цветом, водные объекты – тёмно-коричневым или чёрным цветом, все остальные объекты – голубым либо бордовым.

Учитывая показатели Fe^{3+} , Ferrous Minerals Ratio и изменённые снимки с ложными цветами, отчётливо вырисовываются поля накопления магнетита, обогащённые по сравнению с «фоновыми содержаниями» в отвалах. Наиболее контрастным по содержаниям магнетита является первое поле хвостохранилища, где наблюдается максимальная разница интенсивностей соответствующих показателей.

Химический анализ проб. Исследование химического состава проводилось с целью проверки результатов ДЗЗ с соотношением содержания железа в отвалах. Такая проверка необходима в связи с тем, что спутниковые снимки дают возможность лишь сравнивать области друг с другом, но не дают возможности получать реальные содержания.

Геохимические пробы отбирались в пределах первого поля хвостохранилища из сухого материала. Всего было отобрано 6 проб в разных участках хвостохранилища (рис. 3).

Результаты химического анализа демонстрируют неоднородные содержания железа, в разных участках первого поля хвостохранилища содержа-



Рис. 3. Схема первого поля хвостохранилища с точками отбора проб 4/2, Green – 5/7, Blue – 5/4)

Таблица 1.

Химический анализ проб 1-го поля хвостохранилища по результатам рентгено-флуоресцентного анализа

Обр.	Al %	As ppm	Ba %*	Ca %	Cl %	Cr ppm	Cu ppm	Fe %	K %
№1	0,8	3	0,14	19,9	0,11	44	172	2,7	0,81
№2	1,0	2	0,15	17,6	0,12	40	139	3,4	1,01
№3	1,2	4	0,20	15,7	0,10	60	332	5,7	0,66
№4	1,3	3	0,18	16,0	0,09	43	246	4,1	0,83
№5	0,6	5	0,14	20,0	0,10	58	392	4,1	0,45
№6	0,5	4	0,15	22,1	0,11	59	660	2,9	0,50
Обр.	Mg %	Si %	Sn ppm	Sr %	Ti %	U ppm*	V ppm	Y ppm	Zr %
№1	9,8	5,6	9	0,25	0,11	24	41	32	0,11
№2	10,4	6,6	11	0,22	0,08	21	38	27	0,14
№3	10,5	7,7	8	0,20	0,18	31	65	29	0,16
№4	10,9	8,2	6	0,19	0,17	19	58	23	0,16
№5	9,0	5,3	11	0,24	0,14	39	61	31	0,17
№6	8,5	4,8	12	0,35	0,14	59	55	36	0,17

ния железа варьируют в два раза (*табл. 1*). При этом увеличение количества содержания железа, определённого с помощью рентгено-флуоресцентного анализа, совпадает с зонами увеличенной интенсивности показателей ДЗЗ.

Таким образом, методами интерпретации данных ДЗЗ действительно возможно различать распределение железа даже при относительно низких содержаниях, а также можно выделить потенциальные участки для проведения подробных разведочных работ на магнетитовое сырьё в пределах отвалов и хвостохранилищ Ковдорского ГОКа.

Заключение

За последние 36 лет экологическая нагрузка в районе Ковдорского массива в значительной степени увеличилась. Общая площадь нарушенных территорий (карьер, три отвала, два поля хвостов) превысила 31 км², что в несколько раз больше территории самого города Ковдора. В будущем эта площадь, вероятно, станет ещё больше и будет возрастать до тех пор, пока не будет закончена отработка Ковдорского месторождения. При этом по снимкам отмечается значительное пылевое загрязнение всей прилегающей территории в радиусе 20 км и значительное воздействие на речную систему района. Последние два фактора имеют накопительный эффект. По мере пылевого

загрязнения будет ухудшаться состояние почв, а из-за изменения речной системы данного района может поменять в принципе вся экосистема.

Очевидно, что отработка карьера с глубиной становится экономической менее эффективной, а объёмы отвалов с каждым годом увеличиваются в геометрической прогрессии. Однако, данное исследование показывает возможность:

1) возможность проведения методами ДЗЗ экологического мониторинга прилегающих к Ковдорскому месторождению территорий;

2) использование данных спутниковых снимков как одного из механизмов для поисков наиболее перспективных площадей для детальной разведки и последующей добычи железной руды из отвалов карьера.

Приведенные в исследовании результаты анализа космоснимков показали потенциальные участки накопления полезного компонента. Изучение и дальнейшая добыча железной руды из отвалов позволит уменьшить экологическое воздействие на окружающую среду, а также увеличит экономическую прибыль предприятия.

На основе имеющихся геохимических показателей возможно осуществлять фактическую привязку показателей ДЗЗ и получать полуколичественные содержания железа при интерпретации спектральных данных. ^(XX)

Коллектив авторов благодарит всех сотрудников АО «Ковдорский ГОК», оказавших содействие в проведении студенческих производственных практик для сбора фактического материала, положенного в основу настоящего исследования.

Литература

1. Визигин Д.В. Исследование метода автоматизированного поиска месторождений полезных ископаемых по данным дистанционного зондирования земли на примере системы geomed3d // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2013. № 2. С. 14–16.
2. 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. № 530. С. 437–447.
3. Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В. и др. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 359 с.
4. Стрекалова Т.А., Стрекалова В.А., Меренкова Е.С. Мероприятия, снижающие вредное воздействие отвалов на окружающую среду // Успехи современного естествознания. 2013. № 4. С. 118–121.
5. Amro F. A., Using Remote Sensing data to identify iron deposits in central western Libya // International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing ICETCIP'2011.
6. 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.
7. Salem S.M., El Gamal E.A. Iron ore prospecting East Aswan, Egypt, using remote sensing techniques // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2015. № 78 (2). P.195–206.
8. 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.
9. <https://glovis.usgs.gov/>

UDC: 528.8.04, BBC: 20.18, 26.34

Yuri A. Churikov, master student, Moscow State University, churikov@geol.msu.ru

A. A. Samsonov, PhD, Moscow State University, senior researcher, samsonov@geol.msu.ru.

V. T. Ishmukhametova, PhD, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), senior researcher, geoivt@mail.ru

USING EARTH REMOTE SENSING DATA TO ANALYZE THE ENVIRONMENTAL STRESS AND ORE POTENTIAL OF TECHNOGENIC DUMPS OF THE KOVDORSKY GOK

Abstract: An assessment was made of changes in the soil cover and water resources of the area around the Kovdorsky GOK using the methods of mathematical comparison of satellite images taken in 1986 and 2022. Significant deterioration of the soil cover and its «dusting» as a result of exposure to harmful emissions generated during mining operations in quarries were revealed. Due to the construction of tailings, significant changes in the river system of the study area as a whole have been identified. At the same time, when analyzing satellite images of dumps and tailings of the Kovdorsky GOK, potential areas for exploration of an already technogenic iron deposit were identified.

Keywords: space remote sensing, Kovdorskoye deposit, processing of space images, soil and vegetation cover, man-made objects, environmental impact, satellite geology.



Churikov Yu.A.
Lomonosov Moscow State University (MGU),
postgraduate student
churikov@geol.msu.ru



Samsonov A.A.
PhD, MGU, Senior Researcher
samsonov@geol.msu.ru



Ishmukhametova V.T.
PhD, Institute of Geology of Ore
Deposits, Petrography, Mineralogy and
Geochemistry, Russian Academy of
Sciences (IGEM), Senior Researcher
geovt@mail.ru

APPLICATION OF THE EARTH REMOTE SENSING DATA FOR ANALYZING THE ECOLOGICAL STRESS AND ORE POTENTIAL OF TECHNOGENIC DUMPS OF THE KOVDOR MPP

Changes in the soil cover and water resources of the Kovdor MPP area are analyzed based on the mathematical comparison of satellite images taken in 1986 and 2022. Significant pollution of the soil cover related to the hazardous dust emission during mining operations in quarries was revealed. Notable changes in the river system due to the construction of tailings have been identified in the study area. Analysis of the satellite images of mine dumps and tailings of the Kovdor MPP, however, revealed promising areas for the exploration of a technogenic iron deposit.

Ключевые слова: space remote sensing, Kovdor deposit, processing of space images, soil and vegetation cover, technogenic objects, ecological stress, satellite geology.

Until the 1920s, large-scale mining activities were not carried out in the Murmansk region. The main inhabitants of the Kola Peninsula were the Sami people and Russian Pomors engaged, respectively, in reindeer husbandry and fishing. However, the situation changed dramatically in 1921, when academician E.A. Fersman discovered apatite deposits in the Khibiny, and deposits of many other types of minerals were also discovered here a few years later (Pozhilenko et al., 2002). Among them, the Kovdor iron ore deposit was discovered

in 1933. Soon, the development of new areas began throughout the peninsula: the first quarries along with mining and processing plants appeared. However, ecological stress on the Kola Peninsula increased along with the development of industry: the mining of raw materials from quarries provoked the formation of mine dumps and tailings, and the processing of minerals at the mining and processing plants generated huge pollutant emissions into all environmental components: atmospheric air, water and soil. As is known, mine dumps, in turn,

not only occupy a certain natural area covered by plants in the past, but also have a significant negative environmental impact: dust emission, water and wind erosion, subsidence, and landslide (Strekalova et al., 2013). In addition to ecological issues, reduction of the resource potential of the Kovdor MPP is also urgent at present.

Modern techniques of the Earth remote sensing (ERS), which make it possible to determine effectively the ecological stress in different regions (Grekhnev, 2015), can also be applied successfully in the prospecting and exploration of mineral deposits (Vizigin, 2013). However, application of the ERS data is complicated significantly by the presence of abundant vegetation, as well as thick alluvial and eluvial deposits. From this point of view, the Kola Peninsula is convenient for the application of ERS methods due to scanty flora. Besides, the study and interpretation of data obtained by these methods in the mine tailings and dumps completely devoid of forest cover can be most efficient.

The present work is aimed at analysis based on the interpretation of spectral data from satellite images, ecological impact on the territory under consideration and the potential use of the Kovdor MPP dumps as technogenic sources of iron ore.

Materials and methods

To assess the dynamics of changes in the state of the soil and vegetation cover of the Kovdor massif, we used images obtained by Landsat satellites launched into orbit by the NASA and USGS. The Landsat satellite images have a spatial resolution of 30 m and spectral range of 0.4-1.1 μm . These images are multispectral: 7, 8, and 11 spectral channels, respectively, in Landsat-5, Landsat-7, and Landsat-8 images. The channel represents a spectral range located at a certain frequency of the electromagnetic spectrum. Moreover, the spectral range can be both visible (red, green, blue) and invisible (near-infrared and short-wavelength infrared) to the human eye.

The Landsat program has the most extensive library of satellite images: satellite images from 1973 to 2022 inclusive are available on the *GloVis USGS portal* (<https://glovis.usgs.gov/>).

During the preprocessing, atmospheric correction was carried out based on the QGIS Semi-Automatic Classification Plugins using the Dark-Object Substraction (DOS) method. The processing of satellite images (calculation of vegetation and geological indices) was accomplished in the SAGA-GIS system. The spatial reference of scanned images, comparison of the spatiotemporal data, and compilation of maps were carried out in the ArcGIS system.

The multispectral Landsat-5 (July 26, 1986) and Landsat-8 (July 21, 2022) satellite images were used

to track changes in the soil and vegetation cover of the Murmansk region.

Dynamics of the state of the soil and vegetation cover was calculated using the algorithm for the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) reported in (Rouse, 1973):

$$NDVI = \frac{NIR+RED}{NIR-RED} \quad (1)$$

where NIR and RED is the near-infrared and red channel, respectively.

This formula is based on the following fact: high photosynthetic activity associated with the growth of dense vegetation provokes a decrease of the object reflectance in the red zone of the spectrum (RED) and, conversely, an increase of reflectance in the near-infrared channel (NIR). The formula for calculating NDVI is arranged in such a way that, unlike some other vegetation indices, its value is always in the range from 1 to -1. Therefore, this index is convenient both for comparing the spatiotemporal state of vegetation and for identifying the state of vegetation cover depending on the NDVI value. According to the degree of green biomass development based on the universal scale of the summer time values, values less than 0 suggest the technogenic structures (concrete); values from 0 to 0.2, absence of vegetation; and 0.3-1, presence of green biomass (0.3 and 1 corresponds, respectively, to weak and maximum development).

The alternative Modified Normalized Difference Index (MNDVI) is also used for water. Water has positive values in this case, in contrast to negative values in the similar NDVI index. Index MNDVI can be used to detect the shallowing or, conversely, expansion of the reservoir and watercourse area, track the appearance or disappearance of tailings, and detect the groundwater seepage into the quarry.

This index is calculated by the following equation:

$$MNDWI = \frac{GREEN-SWIR2}{GREEN+SWIR2} \quad (2)$$

where GREEN and SWIR2 designate the green and short-wavelength infrared channel, respectively.

To assess the Fe distribution in mine dumps and tailings, we applied calculation coefficient based on the Ferrous Minerals Ratio, as well as the direct recomputation of spectral data for Fe^{2+} and Fe^{3+} .

$$FerrousMineralsRatio = \frac{SWIR-1}{NIR} \quad (3)$$

where SWIR-1 and NIR designate the short-wavelength infrared and near-infrared channel, respectively.

The Ferrous Minerals Ratio (FMR) represents a geological index designed to determine the

characteristics of rocks containing some amount of Fe-bearing minerals based on the SWIR and NIR values.

$$Fe^{3+} = \frac{Red}{Green} \quad (4)$$

where RED and GREEN designate the red and green channel, respectively.

$$Fe^{2+} = \frac{SWIR - 2}{NIR} + \frac{Green}{Red} \quad (5)$$

where RED and GREEN designate the red and green channel, respectively; SWIR-2 and NIR, the short-wavelength infrared and near-infrared channel, respectively.

In the mine dumps and tailings, we took check samples to analyze the chemical composition. All samples were dried and crushed to the analytical powder state (fraction <0.063 μm). The chemical analysis was carried out using Niton FXL 950 XRF analyzers by senior researcher Lubkova T.N. (Department of Geochemistry, Geological Faculty, MGU).

Results

Ecological appraisal. Analysis of the satellite image taken in July 2022 and its comparison with the reference image taken in July 26, 1986 (Figs. 1a-1b) showed that notable changes occurred in the landscape over 36 years in the Kovdor iron ore deposit and adjacent areas. In particular, the quarry area (2.88 km² in 1986) has increased significantly. Activity of the mining and processing industry (quarry development) is linked inextricably with the formation of mine dumps and tailings in the adjacent areas, where three dumps and two tailings (total area 9.03 km²) were formed during the considered time interval (Fig. 1b). In addition, analysis of the images revealed that the entire surrounding area is enriched in Fe due to appreciable dust pollution over 20 km around the quarry during this period (Fig. 1b).

Based on the comparison of MNDVI values, we can draw the following conclusions.

1) There was no water within the quarry in 1986. According to the 2022 image, however, water is present at the quarry bottom, indicating the penetration of groundwater into the quarry as a result of its significant deepening. At the same time, it is noticeable that the surrounding rivers became significantly shallower. In order to continue mining operations, the Kovdor MPP installed hydraulic power stations that pump water from the quarry bottom into Lake Kovdor.

2) In 1986, the tailing field 1 was functioning normally. In 2022, however, the MNDWI value decreased sharply due to drainage of the tailing and subsequent mining of the apatite- and baddeleyite-rich raw materials.

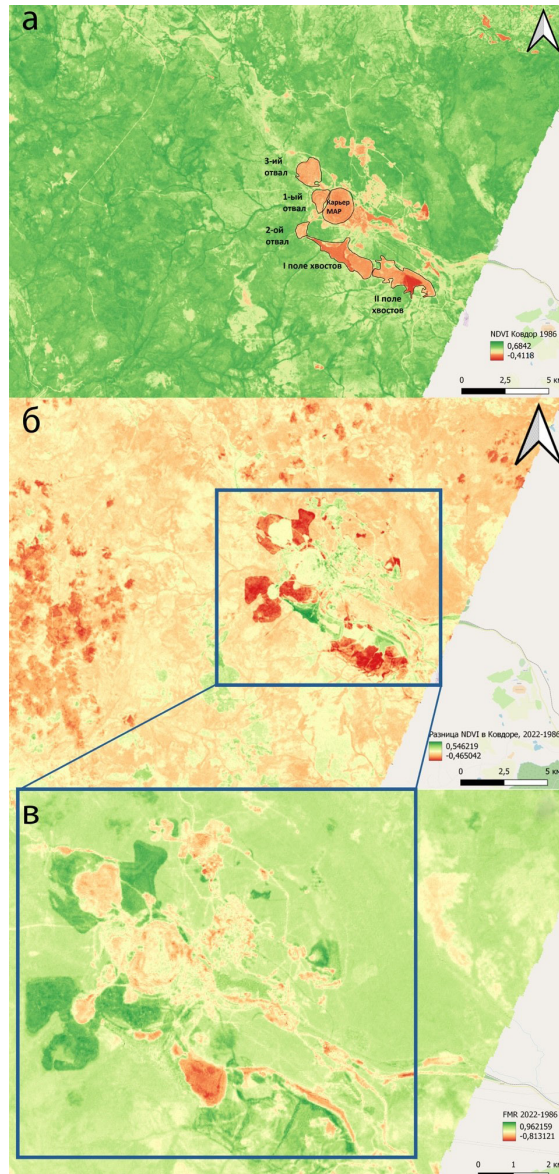


Fig. 1. Spectrozoal satellite images of the Kovdor MPP. a – NDVI values in the image taken in 1986; b – indicator of the NDVI difference between the images taken in 1986 and 2022; c – MNDVI values in images taken in 1986 and 2022.

Iron ore potential of tailings in the Kovdor MPP. Currently, a large amount of iron ore waste, which can be used as an independent raw material, has been accumulated in tailings of the Kovdor deposit. At present, the Kovdor MPP consumes magnetite extracted from the productive horizons of the Kovdor deposit. However, the magnetite reserves will gradually be depleted inevitably. Therefore, iron accumulated in the tailings can be exploited to solve this problem effectively to a certain extent. Modern methods of the satellite image analysis allow us to assess the distribution of Fe and its occurrence mode in the study area.

Comparison of the FMR values in 1986 and 2022 yielded the following results (**Figs. 2a-2c**):

Increase in the content of Fe-bearing minerals in all three dumps, due to a direct growth of the indicator according to the ERS data, is associated with an expansion of dumps. The dramatic decrease in the content of ferrous minerals in the first tailings relative to 1986 is explained by improvement of the technology of Fe extraction from ore. Decrease in the Fe content in the quarry over time indicates a depletion of the Kovdor iron ore deposit.

The above indicator is sensitive to most types of predominantly Fe-containing minerals (silicates,

oxides and hydroxides). The distribution of Fe^{3+} and Fe^{2+} was analyzed to specify the chemical form of Fe in the dumps. The trivalent Fe is marked by a heterogeneous distribution, and its maximum intensity in the images coincides with the corresponding FMR values. Unlike the trivalent iron, the content of ferrous oxides is distributed almost evenly: its content is equally high in all dumps and in the quarry itself (**Fig. 2d**).

For the most accurate detection of the Fe-containing area, we carried out an analysis with the combination of RGB channels using the «false color» (pseudo-color) technique that implies

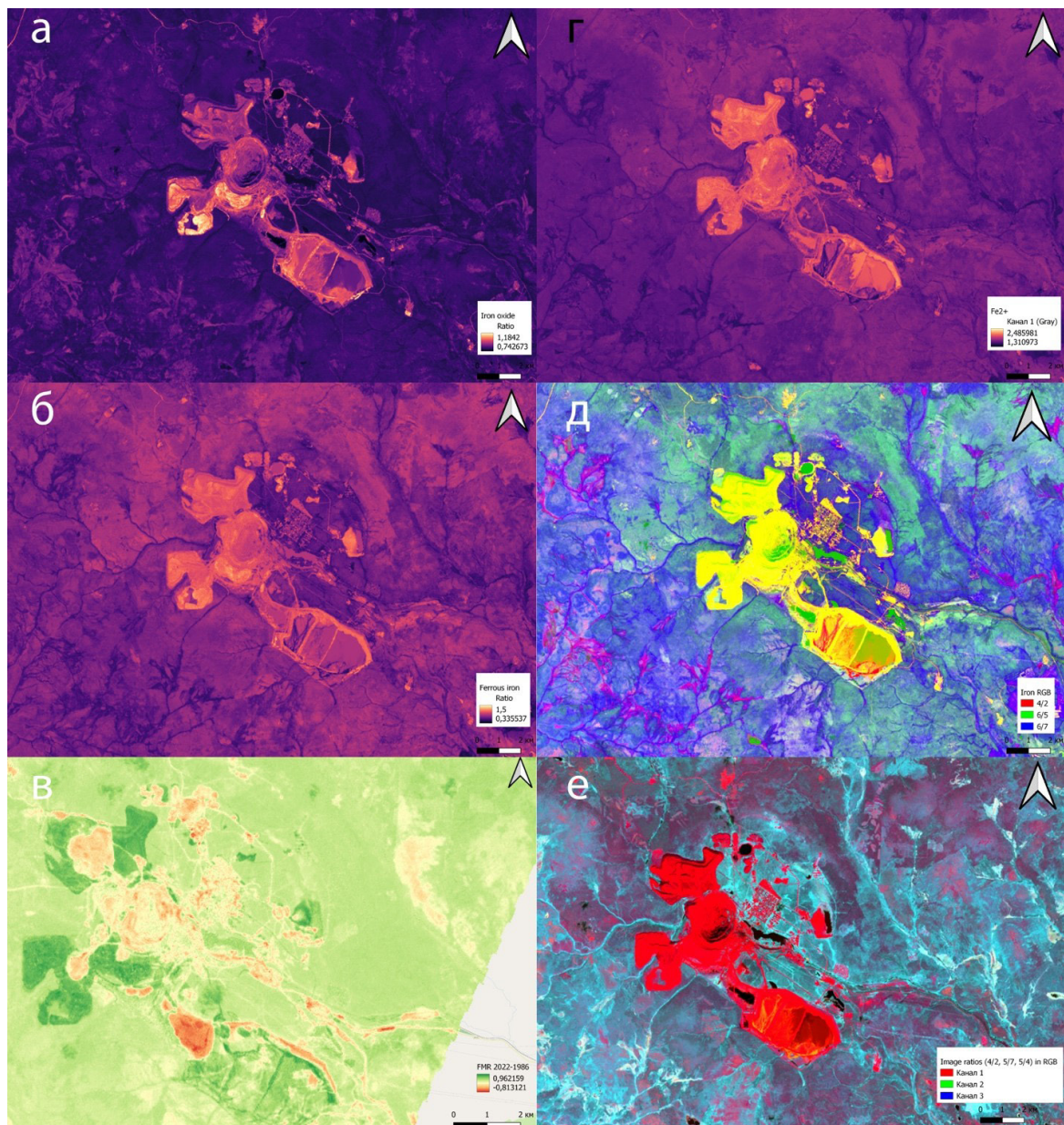


Fig. 2.
Closeup spectrozonal images of the Kovdor MPP.
a – FMR in 1986; b – FMR in 2022; c – change of FMR in 1986–2022; d – intensity of Fe^{2+} in 2022; e – «false color» RGB composition created to trace the Fe distribution (Red – 4/2, Green – 6/5, Blue – 6/7); f – «false color» RGB composition (Red – 4/2, Green – 5/7, Blue – 5/4)

visualization methods applied widely to display the visual information in color recorded in different parts of the electromagnetic spectrum (including its both visible and invisible parts). Iron oxide (4/2) was used as the Red spectrum (Segal, 1982); ferrous iron (6/5), as the Green spectrum; and clay minerals (6/7), as the Blue spectrum (Amro, 2011). Rocks with the highest Fe content are shown here in Yellow; rocks containing a small amount of Fe, in Red; water areas, in Green; and all other areas, in Blue and its shades (**Fig. 2e**).

There is an alternative method to determine the Fe content in rocks (Salem and El Gamal, 2015). This method is also based on the «false color» technology. However, ratio 4/2 here is used as the Red spectrum; ratio 5/4, as the Green spectrum; and ratio 5/4, as the Blue spectrum (**Fig. 2e**). Rocks with highest Fe content rocks are shown in Red; rocks containing a small amount of Fe, in Yellow; water bodies, in Dark Brown or Black; and all other objects, in Blue or Burgundy Red.

Taking into account the indicators of Fe³⁺ along with the FMR value and «false color» images, we can outline clearly the fields enriched with magnetite in comparison with the «background contents» in the dumps. In terms of the magnetite content, most contrasting is the tailing field 1 marked by the maximum difference in intensities of the corresponding indicators.

Chemical composition of samples. The chemical composition was examined to verify the ERS results with the ratio of Fe content in the dumps. Such verification is necessary, because satellite images only make it possible to compare areas with each other, but do not make it possible to obtain the real contents.

The geochemical samples were taken within the tailing field 1 from a dry material. In total, we took six samples in different areas of the tailing (**Fig. 3**).

The results of the chemical analysis demonstrate inhomogeneous the Fe content varies twofold in different parts of the tailing field 1 (**Table 1**). At the same time, increase in the Fe content determined by the X-ray fluorescence analysis coincides with the zones of increased ERS intensity.

Thus, the methods of ERS data interpretation indeed make it possible to distinguish the Fe distribution even at relatively low contents and to identify potential sites for the detailed exploration for magnetite raw materials within the dumps and tailings of the Kovdor MPP.

Conclusion

Over the past 36 years, the ecological stress in the Kovdor massif area has increased significantly. Total area of the polluted zones (quarry, three dumps, and two tailing fields) exceeded 31 km², which is several times more than the area of the city of Kovdor itself. In the future, the polluted area will likely expand until the development of the Kovdor field is completed. At the same time, the images show a significant dust pollution of the entire adjacent area within a radius of 20 km and a considerable impact on the river system of the region. The last two factors have a cumulative effect. As the dust pollution worsens, the soil condition will deteriorate, and the entire ecosystem can actually deteriorate due to changes in the river system of this region.

It is obvious that the quarry mining becomes less economical and less efficient with depth, and the volume of dumps increases exponentially every year. However, this study brings up the following issues:

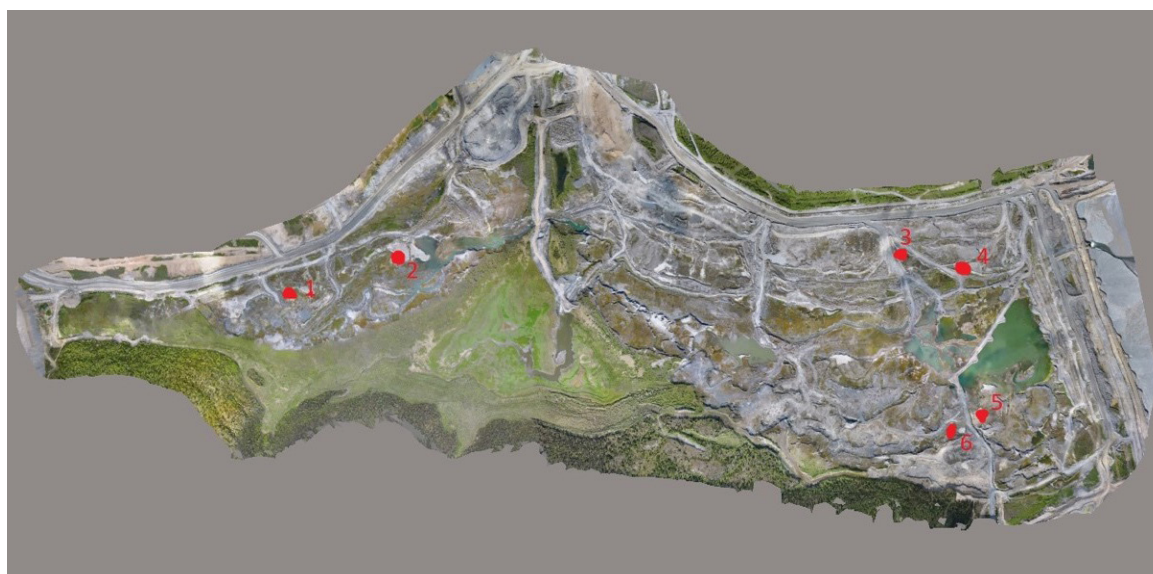


Fig. 3.
Scheme of the tailing field 1 showing the sampling sites

Table 1.*Chemical composition of samples from the tailing field 1, based on the XRF analysis*

Sample no.	Al, %	As, ppm	Ba, %*	Caж, %	Cl, %	Cr, ppm	Cu, ppm	Fe, %	K, %
1	0.8	3	0.14	19.9	0.11	44	172	2.7	0.81
2	1.0	2	0.15	17.6	0.12	40	139	3.4	1.01
3	1.2	4	0.20	15.7	0.10	60	332	5.7	0.66
4	1.3	3	0.18	16.0	0.09	43	246	4.1	0.83
5	0.6	5	0,14	20,0	0,10	58	392	4.1	0.45
6	0.5	4	0.15	22.1	0.11	59	660	2.9	0.50
Sample no.	Mg, %	Si, %	Sn, ppm	Sr, %	Ti, %	U, ppm*	V, ppm	Y, ppm	Zr, %
1	9.8	5.6	9	0.25	0.11	24	41	32	0.11
2	10.4	6.6	11	0.22	0.08	21	38	27	0.14
3	10.5	7.7	8	0.20	0.18	31	65	29	0.16
4	10.9	8.2	6	0.19	0.17	19	58	23	0.16
5	9.0	5.3	11	0.24	0.14	39	61	31	0.17
6	8.5	4.8	12	0.35	0.14	59	55	36	0.17


1) necessity of the ecological monitoring of areas adjacent to the Kovdor deposit by the ERS methods;

2) application of the satellite image data as a prospecting mechanism in the most promising areas for the detailed exploration and the subsequent iron ore mining from the quarry dumps.

The results of the analysis of satellite images presented in our work revealed potential areas with the useful component accumulation. The study and further mining of iron ore from dumps will make it possible to reduce the ecological impact

on the environment and to enhance the economic performance of the Kovdor MPP.

Based on the available geochemical data, it is possible to carry out the actual correlation of the ERS indicators and to estimate the semi-quantitative Fe contents when interpreting the spectral data.

The authors thank all workers of the Kovdor MPP who helped the accomplishment of our field works and the collection of factual material used in the present work. 

References

- Amro F. A. Using Remote Sensing data to identify iron deposits in central western Libya, in Int. Conf. on Emerging Trends in Computer and Image Processing ICETCIP'2011. GloVis USGS portal. <https://glovis.usgs.gov/>
- Grekhnev N.I., Lipina L.N., and Usikov V.I. Assessment of ecological risk by the Earth remote sensing method, in Gornyi Informatsionno-Analicheski Byulletin (Scientific-Technical Journal), 2015, no. S30, pp. 437-447.
- Pozhilenko V.I., Gavrilenko B.V., Zhirov D.V., et al. Geology of Ore Deposits in the Murmansk Region, Apatity: Kola Sci. Center, Russ. Acad. Sci., 2002, 359 p. (in Russian).
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, in 3rd ERTS Symp., NASA SP-351, 1973, pp. 309-317.
- Salem S.M. and El Gamal E.A. Iron ore prospecting East Aswan, Egypt, using remote sensing techniques, in Egypt. J. Remote Sensing and Space Science, 2015, no. 78 (2), pp.195-206.
- Segal D. Theoretical basis for differentiation of ferric-iron bearing minerals, using Landsat MSS data, in Proc. Symp. for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conf. on Remote Sensing for Exploratory Geology, 1982, pp. 949-951.
- Strekalova T.A., Strekalova V.A., and Merenkova E.S. Measures to reduce the hazardous impact of dumps on the environment, in Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya, 2013, no. 4, pp. 118-121.
- Vizigin D.V. Study of the method of automatic prospecting for mineral deposits based on the Earth remote sensing: Evidence from the GeoMed3d system, in Rossiya Molodaya: Advanced Technologies in Industry, 2013, no. 2, pp. 14-16.