

## Особенности дистанционного изучения территорий долговременного складирования промышленных отходов

Е. В. Дробинина, П. А. Белкин, С. С. Ваганов, Р. Д. Перовощиков

*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

*Пермь, 614990, Россия*

*E-mail: alenadrobiniina@yandex.ru*

Работа посвящена ретроспективной оценке изменений техногенного пруда-отстойника, расположенного в промышленной зоне г. Березники (Пермский край). Ранее проведённые исследования накопленных осадков в пруду показали их вертикальную изменчивость, заключающуюся, в том числе, в смене цвета. В настоящей работе на основании визуального анализа космических снимков в естественном цветовом диапазоне за период с 1985 г. по настоящее время проведено сопоставление данных о цвете поверхности изучаемого пруда и цвете накопленных осадков. Выполненный анализ позволил определить временной период формирования верхних слоёв осадка. Совместно с этим в работе проведён расчёт спектральных индексов для поверхности исследуемого пруда, а также прилегающих территорий и акваторий. В результате изучен характер изменения площади водной поверхности пруда в различные периоды и состояние пруда и прилегающей территории. Совмещённый анализ данных об уровне воды в пруду, полученных с применением модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI (*англ.* Modification of Normalized Difference Water Index), и графиков изменения спектральных индексов позволил подтвердить закономерности, выделенные при визуальном анализе снимков, а также конкретизировать отдельные периоды формирования осадка. Результатом проведённого исследования является решение сложной задачи установления временных характеристик образования осадков в заброшенном объекте накопления отходов, проведённое с использованием общедоступных материалов.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, ретроспективный анализ, промышленные отходы, спектральные индексы

Одобрена к печати: 20.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-276-287

### Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) представляет исследователям широкие возможности для изучения геологических и геоэкологических процессов. Важным преимуществом применения данных ДЗЗ, наряду с возможностью удалённого получения информации об изучаемом объекте, является доступность сведений за различные временные периоды. В совокупности с возможностями комплексирования широкого перечня доступных аналитических инструментов (например, в среде Google Engine), обработка данных ДЗЗ становится мощным инструментом, прежде всего, для мониторинга разнообразных объектов и процессов.

Техногенные объекты, а также геологические и геоэкологические процессы, протекающие в условиях техногенного воздействия, характеризуются более резкими и контрастными изменениями в сравнении с природными аналогами. В связи с этим мониторинг состояния участков, преобразованных хозяйственной деятельностью, представляется важной практической задачей.

Один из распространённых видов техногенного воздействия человека на окружающую среду — складирование отходов. Территории долговременного складирования промышленных отходов, в силу особенностей формирования и функционирования, выступают объектами повышенного интереса с целью как мониторинга их современного состояния, так и ретроспективного анализа. В наибольшей степени это утверждение относится к объектам накопленного вреда окружающей среде. Такие территории сформировались в прошлые периоды и на современном этапе не имеют собственников, в связи с чем установление времени и условий образования накопленных отходов существенно затруднено.

Настоящее исследование сфокусировано на одном из подобных объектов. Временный пруд-отстойник промышленных сточных вод был образован в середине XX в. на территории промышленной зоны г. Березники (Пермский край). В течение длительного периода пруд принимал сточные воды целого ряда промышленных предприятий, в результате чего в отстойнике сформировалась толща донных осадков мощностью до 5 м. При изучении осадка методом его бурения и извлечения керна была установлена изменчивость визуальных свойств отдельных слоёв, в первую очередь цвета осадков (Дробинина, Белкин, 2025; Belkin et al., 2024). С целью оценки изменений состояния пруда за период его существования и установления временных границ формирования отдельных слоёв осадков проведён анализ космических снимков в естественном цветовом диапазоне и выполнен расчёт спектральных индексов.

### Исследуемая территория

В качестве исследуемой территории рассматривается техногенный пруд площадью 17,5 га, расположенный на бывшей производственной территории в г. Березники (рис. 1). Местоположение объекта в пределах промышленной зоны разработки Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей обуславливает некоторые особенности его существования и проблемы, связанные с добычей и переработкой водорастворимых руд (Ushakova et al., 2023). В современный период пруд находится на муниципальной территории и не относится к действующим предприятиям.



Рис. 1. Схема расположения участка исследований

Севернее изучаемого объекта расположены шламонакопители предприятия содового производства, из которых один функционировал с середины 1950-х гг. и выведен из эксплуатации в середине 1990-х, второй действует с 1972 г. по настоящее время. Вместе с этим с северной и восточной стороны исследуемый пруд огибает открытый канал отвода промышленных сточных вод. Длительное время он имел гидравлическую связь с прудом, но в 2021 г.

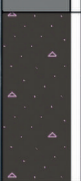
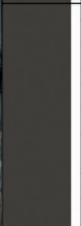
переток из канала в пруд был ликвидирован. На современном этапе пруд не имеет видимой гидравлической связи с окружающими объектами, основным источником его пополнения являются атмосферные осадки.

## Визуальный анализ космических снимков

На территорию объекта в свободном доступе имеются:

- снимки сверхвысокого пространственного разрешения в естественном цветовом диапазоне на портале Google Earth (август 2005 г. — наст. время);
- мультиспектральные снимки Sentinel-2 (A/B) (сентябрь 2015 г. — наст. время);
- мультиспектральные снимки со спутников серии Landsat (1985—2020).

Доступ к открытым спутниковым данным, в том числе высокого разрешения, позволяет визуально оценить цвет поверхности изучаемого водоёма в различные периоды, что косвенно может указывать на цвет донного осадка, сформированного в соответствующее время.

| № слоя | Фото керна                                                                         | Разрез                                                                              | Мощность, м | Описание осадка                                                           | Цвет пруда на кс*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Дата формирования осадка |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1      |  |    | 0,20        | Осадок белый пастообразный с поверхности водоёма                          |                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2017-н.в.                |
| 2      |                                                                                    |    | 0,26        | Масса коричневая пористая землистой текстуры                              |                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2014-2016                |
| 3      |                                                                                    |    | 0,15        | Осадок белый пастообразный                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2000-2013                |
| 4      |                                                                                    |   | 0,60        | Паста светло-коричневого до кремового цвета с розовыми и серыми прослоями | <br><br><br> | 1995-1999                |
| 5      |                                                                                    |  | 0,12        | Паста серо-коричневая с яркими зелеными прослоями                         |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1991-1994                |
| 6      |                                                                                    |  | 0,08        | Осадок ярко-красный                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1987-1990                |
| 7      |                                                                                    |  | 0,26        | Паста зеленовато-серая (хаки) с белыми, черными и зелеными прослоями      |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1985-1986                |
| 8      |                                                                                    |  | 0,70        | Масса серая однородная пастообразная                                      | <br>нет данных                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |
| 9      |                                                                                    |  | 0,50        | Паста тёмно-серая с розовыми включениями                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |
| 10     |                                                                                    |  | 0,93        | Паста однородная тёмно-серая до черного                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |

\*кс - космические снимки акватории пруда-отстойника в естественном цветовом диапазоне, доступные на портале Google Earth

Рис. 2. Сведения о составе, объёме и временных отрезках формирования слоёв осадка техногенного водоёма



В работе проанализированы космические снимки акватории пруда-отстойника в естественном цветовом диапазоне, доступные на портале Google Earth. На период до 2005 г. снимки сверхвысокого пространственного разрешения отсутствуют, при этом на портале есть возможность просмотра скомпилированных алгоритмом Google Earth мультиспектральных снимков Landsat, представленных также в естественном цветовом диапазоне. Доступный период просмотра космоснимков — с 1985 по 2020 г.

Так как толщина слоя воды в изучаемом пруду не превышает 1,0 м, вести визуальный анализ донного осадка по данным ДЗЗ не составляет труда. Визуальный анализ космических изображений, а также анализ данных полевых и лабораторных работ позволяют сделать вывод об отсутствии стационарного режима накопления донного осадка: за время существования пруда его цвет значительно менялся. Изучение данных ДЗЗ позволило уточнить временные рамки формирования отдельных слоёв осадка с 1985 г. (рис. 2, см. с. 278).

С 1985 по 1989 г. поверхность объекта характеризовалась тёмно-бурой, коричневой и желтоватой окраской, в большой степени совпадающей с окраской поверхности шламонакопителя № 2. Вместе с этим поверхность шламонакопителя № 1 отображается преимущественно белой, с голубыми и зелёными «пятнами» участков отстоя технологических вод (рис. 3).



*а*

*б*

Рис. 3. Космические снимки со спутника Landsat: *а* — 1985 г.; *б* — 1990 г.

Фотография со спутника Landsat 1990 г. свидетельствует об изменении окраски содержащегося в пруду (и шламонакопителя № 2) в насыщенный рыжевато-красный оттенок. В следующий период (1991–1996) поверхность пруда характеризуется зеленоватым оттенком различной насыщенности, который после 1997 г. меняется на светло-бурый и грязно-белый (до 2005 г.).

С 2005–2006 гг. до 2014 г. с разной периодичностью становятся доступны снимки сверхвысокого разрешения, с 2014 г. — ежегодно. В период с 2005 по 2010 г. окраска поверхности объекта представлена преимущественно светлыми голубовато-белыми цветами (рис. 4а, см. с. 280). Тёмные пятна на снимках Landsat того времени (доступны ежегодные фото) свидетельствуют о заполнении объекта водой.



Рис. 4. Космические снимки высокого разрешения: а — 2006 г.; б — 2020 г.

С 2011 по 2016 г. бело-голубая окраска поверхности объекта сменяется частично или полностью на рыжевато-коричневую, жёлтую, что отражено как на снимках высокого разрешения (ряд снимков с 25.07.2011 по 15.08.2017), так и на снимках Landsat (2011–2016). После 2017 г. поверхность техногенного пруда на космических снимках представлена ярко-голубыми цветами воды и светлыми (белыми) цветами прибрежной зоны (см. рис. 4б). Сейчас пруд всё больше приобретает вид естественного водного объекта, что может быть связано с ликвидацией перетока к промышленному каналу и поступлением в него, на данный момент, исключительно природных вод.

Визуальный анализ космических снимков в естественном цветовом диапазоне, доступных за период 1985–2024 гг., свидетельствует о периодическом изменении цвета поверхности изучаемого объекта, связанном со спецификой поступающих в него стоков. Цвета поверхности изучаемого объекта в различные периоды в значительной мере соответствуют цветам донного осадка при его послойном отборе.

### Расчёт спектральных индексов

Вместе с визуальной оценкой изменения цвета осадка выполнен расчёт спектральных индексов. В качестве изучаемых выбраны следующие:

1. Индекс оценки степени загрязнения поверхностных вод AMWI (*англ.* Acid Mine Water Index), который использует соотношение красного и синего диапазона. Установлено, что значения AMWI увеличиваются с ростом концентрации  $Fe_{общ}$  в поверхностных водах (Березина и др., 2018; Деменев и др., 2024), также монотонно увеличиваются с ростом загрязнения водоёма (Ермаков и др., 2021).

2. Индекс мутности NDTI (*англ.* Normalized Difference Turbidity Index). Использует соотношение красного и зелёного диапазона в качестве косвенного показателя мутности воды во внутренних водоёмах (Elhag et al., 2019; Lacaux et al., 2007; Lizcano-Sandoval et al., 2022).

3. Индекс железистых минералов FM (*англ.* Ferrous Minerals ratio), который позволяет выделить железосодержащие тёмные рудные минералы. Для расчёта используется соотношение SWIR (*англ.* Short Wave InfraRed) и NIR (*англ.* Near InfraRed) диапазона (Segal, 1982).

4. Индекс оксида железа IO (*англ.* Iron Oxide Ratio) — это отношение красного и синего диапазона волн, которое позволяет выделять на поверхности Земли участки окисления железосодержащих пород (Segal, 1982).

5. Нормализованный разностный водный индекс NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996).

6. Модифицированный нормализованный разностный водный индекс MNDWI (*англ.* Modification of Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006).

7. Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974).

Первые четыре спектральных индекса использованы для изучения динамики изменения вещественного состава, которая находит отражение в изменении цвета, в то время как последние три рассчитаны для общей оценки состояния водоёма и опосредованно прилегающей территории и для создания маски водной поверхности. Водные объекты принимают значения NDWI от 0,2 до 1; объекты, не содержащие воду, — меньше 0. Для водоёмов MNDWI достигает также положительных значений, NDVI — от 0 и ниже.

Для оценки изменения состояния водоёма по значениям спектральных индексов использован многолетний ряд спутниковых снимков Landsat TM (*англ.* Thematic Mapper), Landsat ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat OLI (*англ.* Operational Land Imager) за 1986–2020 гг. и Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument) за 2016–2024 гг. Отбор снимков проводился по критериям минимальной облачности, отсутствия дымки, также с учётом особенностей формирования слоёв осадка в заданный период (*табл. 1*).

Таблица 1. Сведения об используемых для расчётов снимках

| Спутник, сенсор | Дата съёмки | Спутник, сенсор | Дата съёмки | Особенности осадконакопления                                           |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|------------------------------------------------------------------------|
| Sentinel-2, MSI | 31.07.2024  |                 |             | Поступление атмосферных осадков                                        |
| Sentinel-2, MSI | 29.07.2023  |                 |             |                                                                        |
| Sentinel-2, MSI | 08.08.2022  |                 |             |                                                                        |
| Sentinel-2, MSI | 03.08.2021  |                 |             | Ликвидация перетока между промканалом и прудом                         |
| Sentinel-2, MSI | 12.07.2020  | Landsat-8, OLI  | 04.06.2020  | Стабилизация уровня воды в пруду                                       |
| Sentinel-2, MSI | 20.07.2019  |                 |             |                                                                        |
| Sentinel-2, MSI | 15.07.2018  |                 |             |                                                                        |
| Sentinel-2, MSI | 04.08.2017  |                 |             | Повышение уровня воды в пруду                                          |
| Sentinel-2, MSI | 02.08.2016  |                 |             |                                                                        |
|                 |             | Landsat-8, OLI  | 28.06.2014  | Снижение уровня воды в техногенном пруду                               |
|                 |             | Landsat-5, TM   | 15.06.2009  | Период отстаивания отходов                                             |
|                 |             | Landsat-5, TM   | 08.08.2004  |                                                                        |
|                 |             | Landsat-5, TM   | 10.07.1998  | Снижение уровня воды в пруду                                           |
|                 |             | Landsat-5, TM   | 17.06.1993  | Формирование осадка специфических цветов (ярко-зелёный)                |
|                 |             | Landsat-5, TM   | 17.07.1989  | Формирование осадка специфических цветов (ярко-красный)                |
|                 |             | Landsat-5, TM   | 07.06.1986  | Использование пруда в качестве временного и резервного шламонакопителя |

### Использование спектральных индексов для оценки состояния водоёма

С целью общей оценки состояния исследуемого пруда в период его использования в качестве временного и резервного накопителя (1986) и в настоящее время (2023), когда в него осуществляется поступление исключительно природных вод, проведён анализ изменения спектральных индексов NDWI, MNDWI, NDVI по линии «р. Кама — суша — изучаемый водоём — суша — болото» (см. *рис. 1*). Линия выбрана таким образом, чтобы сравнить значения индекса на изучаемой территории и на территории естественного водного объекта и прилегающих безводных или заболоченных участков.



Нетрудно заметить, что характер изменения индексов значительно различается: так, в 2023 г. отмечаются отрицательные или нулевые значения NDVI в пределах как реки, так и изучаемого пруда и положительные значения NDWI на этих же участках. Иными словами, исследуемый пруд спектральными индексами маркируется максимально похоже с естественным водотоком. В целом MNDWI избавлен от резких флуктуаций, на участках суши равен 0, на покрытых водой — положительный, не сильно различается как для р. Камы, так и для изучаемого водного объекта. Прилегающая территория отличается высокими значениями NDVI, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии растительного покрова, кроме того, отмечается зарастание растительностью болота (рис. 5б). Изменения индексов в 1986 г. отличаются по характеру. Если с использованием водных индексов участки, покрытые водой, также хорошо маркируются, то вегетационный индекс не соответствует водоёму, а, наоборот, в силу пёстрого цвета донного осадка принимает относительно высокие значения. Растительность на прилегающей территории преимущественно угнетённая (см. рис. 5а).

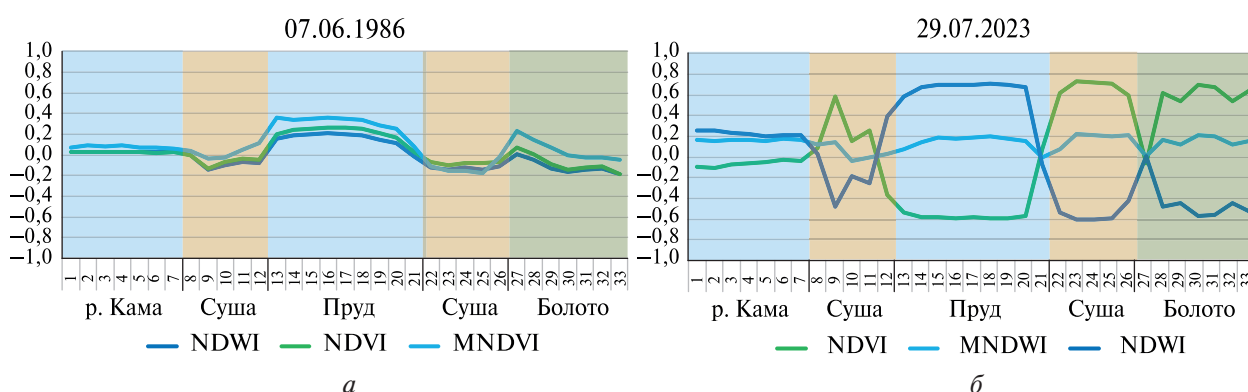


Рис. 5. Характер изменения спектральных индексов на изучаемой территории: а — 1986 г.; б — 2023 г.

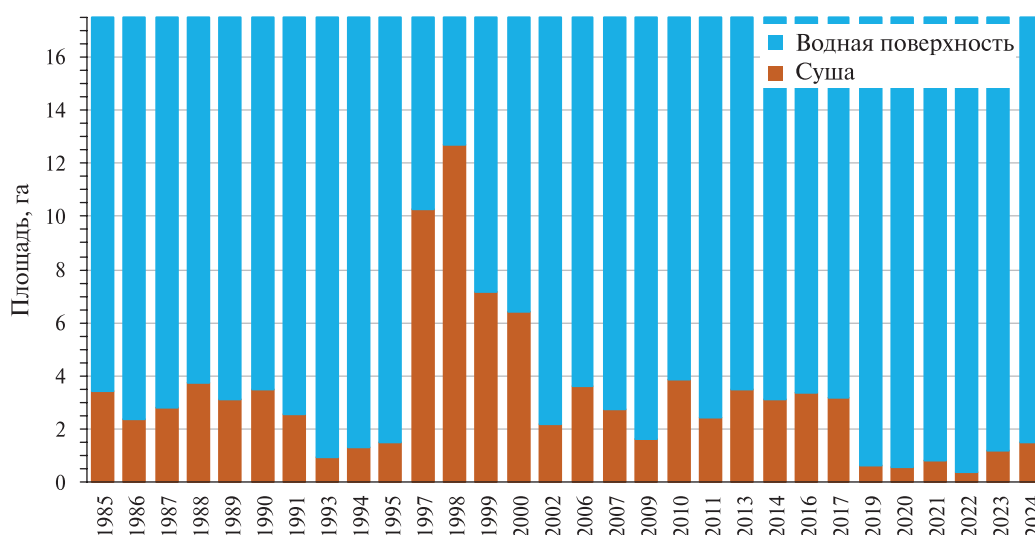


Рис. 6. Соотношение водной поверхности и суши в границах площади исследования

Для оценки изменения площади водной поверхности пруда за время его существования выбран индекс MNDWI, так как на застроенной территории это соотношение каналов позволит сгладить ошибки, связанные с разделением водных объектов и сооружений. По серии данных спутников с 1985 г. по настоящее время, с помощью индекса MNDWI и его порогового значения — 0, определена маска воды, проведена её векторизация с последующей оценкой площади водной поверхности объекта (рис. 6). Значительное снижение уровня воды

в объекте отмечается в период 1997–1999 гг., вплоть до осушения свыше 50 % его площади. При этом в остальные периоды заполнение объекта водой происходило не менее чем на 90 % (по площади).

### Использование спектральных индексов для установления интервалов формирования различных слоёв осадка

Для изучения динамики изменения вещественного состава осадка, которое находит отражение в изменении спектральных индексов, рассмотрены многолетние ряды данных космической съёмки. Для каждого этапа формирования осадка выбраны 1–2 характерные изображения и рассчитан спектральный индекс. Затем проведено сравнение спектральных оценок. Так как в анализе динамики использовались спутники с разными сенсорами (табл. 1), для сравнения различных изображений была проведена их предварительная нормализация методом линейной регрессии, который основан на предположении, что атмосферные различия между разновременными изображениями одного и того же положения линейно коррелируются (Hall et al., 1991; Rahman et al., 2015; Schott et al., 1988). Согласно этому, авторами получены коэффициенты ( $A$ ,  $B$ ) для пересчёта индексов:

$$\text{Index}_n = A \cdot \text{Index}_{\text{исх}} + B,$$

где  $\text{Index}_n$  — значение индекса нормализованного изображения;  $\text{Index}_{\text{исх}}$  — значение индекса исходного нормализуемого изображения;  $A$  и  $B$  — коэффициенты.

Коэффициенты  $A$  и  $B$  могут быть рассчитаны на основе линейных уравнений аппроксимации, характеризующих связь между значениями параметров опорного изображения  $\text{Index}_{\text{оп}}$ , в качестве которого принят в работе 1993 г., и нормализуемого изображения  $\text{Index}_{\text{исх}}$  (Rahman et al., 2015). Коэффициенты  $A$  и  $B$  получены по серии графиков, в свою очередь представлявших собой диаграммы рассеяния средних значений рассматриваемых спектральных индексов в пределах каждого квадрата регулярной сетки  $200 \times 200$  м, на которые была поделена изучаемая территория с целью нормализации индексных оценок.

По нормализованным данным построены графики изменения спектральных индексов в точках отбора проб осадка (см. рис. 1). Ниже (рис. 7) продемонстрированы графики изменения NDTI и IO, как самые представительные. Можно заметить, что период формирования осадка специфических цветов (ярко-зелёного) маркируется на всех графиках изменения индексов — изображение 1993 г. Кроме того, период снижения уровня воды в пруду в 2010–2017 гг. также выражен в незначительном увеличении мутности и повышении содержания охристых компонентов. Примечательно, что в точке  $N$ , на севере территории (см. рис. 1), условия формирования донного осадка отличались от остальной территории в период до 2000 г. и в 2021 г., что может быть связано с особенностями в путях пополнения этой части пруда.

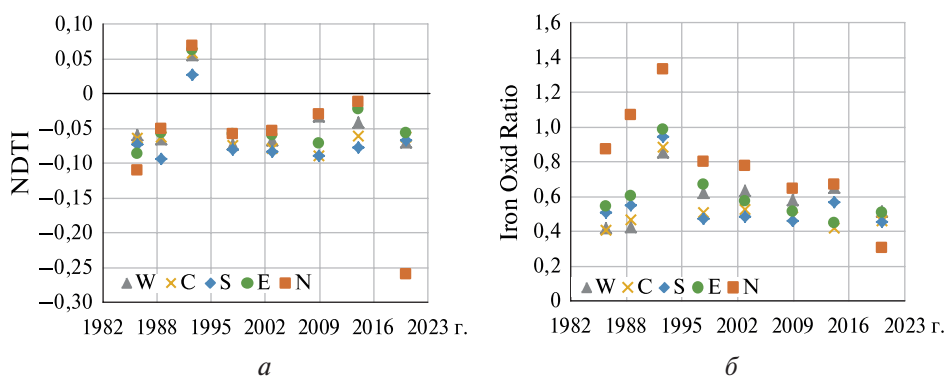


Рис. 7. График изменения спектральных индексов за период 1986–2020 гг.: а — NDTI; б — Iron Oxid Ratio



Появление космических снимков миссии Sentinel-2 позволило повысить детальность изучения объекта с 2015 г. как в пространстве, так и во времени (рис. 8).

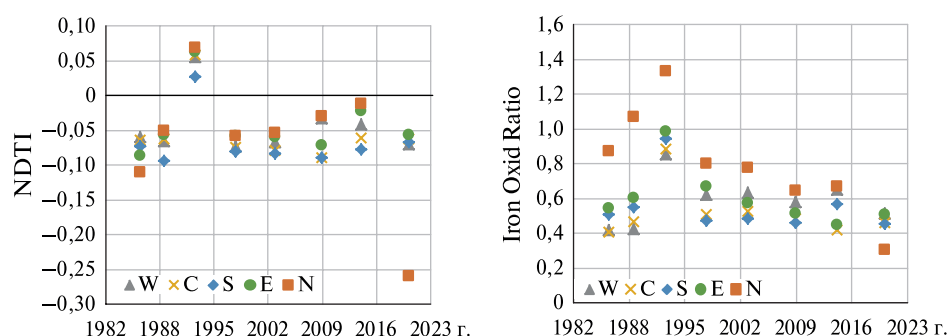


Рис. 8. График изменения значений Iron Oxid Ratio за период 2015 г. – наст. время

Так, по данным изменения изучаемых индексов, заметно снижение концентрации загрязняющих веществ в настоящее время, что особенно видно после 2021 г., когда была ликвидирована протока между промканалом и прудом. Слабое их увеличение в 2022–2024 гг. может быть свидетельством незначительного снижения уровня воды в пруде, в целом это связано с сезонными и годовыми колебаниями уровня воды. Следует отметить, что с прекращением поступления в водоём промстоков все точки характеризуются схожими условиями формирования осадка.

Приведённые выше аналитические данные весьма гармонично увязываются с историей образования донного осадка. С их помощью уточнены временные границы формирования каждого слоя донных отложений.

## Обсуждение результатов

Использование спектральных индексов, показывающих степень загрязнения водоёма, содержание окисленного железа или тёмноцветных минералов, весьма информативно в установлении чётких временных границ формирования слоёв техногенных осадков в водоёмах с динамичной сменой условий функционирования. Например, в период 2000–2017 гг. при снижении уровня воды в изучаемом техногенном пруде (преимущественно, после 2011 г.) происходило накопление слоя осадка, представленного коричневой рыхлой массой землистой текстуры (слой № 2). Слой развит повсеместно по площади водоёма, достигает наибольшей мощности в западной части (точка *W*, см. рис. 1). Его химический состав в сравнении с выше- и нижележащими слоями (белый осадок карбоната кальция) обогащён соединениями кремния, алюминия, магния, железа, хрома и ряда микроэлементов.

Исследования, проведённые на прилегающей к заброшенному пруду территории, свидетельствуют о возможности формирования отложений указанного слоя за счёт поступления песчано-глинистого материала из почвогрунтов прилегающей территории (посредством плоскостного смыва атмосферными осадками) и при выносе песчано-глинистых частиц из окружающей его дамбы. Данные ДЗЗ подтверждают эту гипотезу: период образования рыхлого землистого слоя совпадает с периодом низкого уровня воды в техногенном пруде, при которых могли активизироваться процессы выноса частиц с потоком грунтовых вод. Таким образом, формирование слоя осадка № 2, в отличие от других слоёв, связано преимущественно с поступлением терригенного материала, а не выпадением минеральных компонентов из насыщенного раствора. На этот факт указывают отличия в консистенции осадка (рыхлая землистая масса) от других слоёв (плотная паста). В последующий период, по данным анализа космических снимков после 2017 г., в техногенном пруде установился высокий уровень воды, что обеспечило подпор грунтовых вод. В таких условиях формирование слоя осадка, содержащего в значительном количестве песчано-глинистые частицы, прекратилось. На графиках

(см. рис. 7, 8) чётко прослеживается тенденция «осветления осадка» и сокращения охристых компонентов по снижению значений спектральных индексов с 2017 г.

## Выводы

Исследованный пруд за период своего существования был связан с различными источниками его пополнения, что нашло отражение в его вещественном составе осадка и его цвете. Современные инструменты обработки пространственных данных и наличие широкого спектра открытых данных ДЗЗ предоставляют хороший инструментарий для аналитических операций, в том числе ретроспективного плана.

Анализ космических снимков как в естественном цветовом диапазоне, так и посредством расчёта спектральных индексов свидетельствует о периодическом изменении состояния объекта, площади, покрытой водой. Комплексное изучение этих изменений и установление чётких временных границ формирования различных слоёв осадка способствуют определению условий образования и накопления отходов, что является полезным при выборе стратегий их утилизации.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-77-10062, <https://rscf.ru/project/24-77-10062/>.

## Литература

1. Березина О. А., Шихов А. Н., Абдуллин Р. К. Применение многолетних рядов данных космической съёмки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 144–158. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158.
2. Деменев А. Д., Березина О. А., Максимович Н. Г., Мизев А. А. Оценка состояния поверхностных вод в зоне интенсивного техногенного воздействия на основе данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 271–285. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-271-285.
3. Дробинина Е. В., Белкин П. А. Моделирование как средство ретроспективного анализа геоэкологических процессов в пределах техногенного объекта // Сергеевские чтения. Вып. 26. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (27–28 марта 2025 г.). М.: Геоинфо, 2025. С. 80–83.
4. Ермаков Д. М., Деменев А. Д., Мещерякова О. Ю., Березина О. А. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 222–237. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-222-237.
5. Belkin P., Nechaeva Y., Blinov S. et al. Sediment microbial communities of a technogenic saline-alkaline reservoir // Heliyon. 2024. V. 10. Iss. 13. Article e33640. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33640>.
6. Elhag M., Gitas I., Othman A. et al. Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid environments, Saudi Arabia // Water. 2019. V. 11. Iss. 3. Article 556. <https://doi.org/10.3390/w11030556>.
7. Hall F. G., Sterbel D. E., Nickeson J. E., Goetz S. J. Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multirate, multisensory images // Remote Sensing of Environment. 1991. V. 35. Iss. 1. P. 11–27. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90062-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90062-B).
8. Lacaux J. P., Turre Y. M., Vignolles C. et al. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 106. Iss. 1. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>.
9. Lizcano-Sandoval L., Anastasiou C., Montes E. et al. Seagrass distribution, areal cover, and changes (1990–2021) in coastal waters off West-Central Florida, USA // Estuarine Coastal and Shelf Science. 2022. V. 279. Article 108134. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108134>.
10. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. Iss. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

11. Rahman M. M., Hay G. J., Couloigner I. et al. A comparison of four radiometric normalization (RRN) techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared (TIR) flight lines of a complex urban scene // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 106. P. 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002>.
12. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Proc. 3<sup>rd</sup> Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp. 1974. V. 1. P. 309–317.
13. Schott J. R., Salvaggio C., Volchok W. J. Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features // Remote Sensing of Environment. 1988. V. 26. Iss. 1. P. 1–16. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2).
14. Segal D. B. Theoretical basis for differentiation of ferric-iron bearing minerals, using Landsat MSS data // Proc. Symp. Remote Sensing of Environment. 2<sup>nd</sup> Thematic Conf. on Remote Sensing for Exploratory Geology. Environmental Research Institute of Michigan, 1982. P. 949–951.
15. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E. et al. Environmental aspects of potash mining: A case study of the Verkhnekamskoe potash deposit // Mining. 2023. V. 3. Iss. 2. P. 176–204. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.
16. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. Iss. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

## Study of long-term industrial waste storage areas using remote sensing data

E. V. Drobina, P. A. Belkin, S. S. Vaganov, R. D. Perevoshchikov

*Perm State University, Perm 614990, Russia*  
*E-mail: alenadrobinina@yandex.ru*

The work is devoted to retrospective assessment of changes in a technogenic settling pond located in the industrial zone of Berezniki (Perm Territory). Earlier studies of accumulated sediments in the pond showed vertical variability of sediments, including color change. Data on surface color of the studied pond and color of accumulated sediments were compared on the basis of visual analysis of space images in true color for the period from 1985 to the present day. The analysis made it possible to determine the time period of the upper sediment layers formation. Together with this, the calculation of spectral indices for the surface of the studied pond, as well as for the adjacent territories and water areas was performed. As a result, the character of changes in the water surface area of the pond during different periods and the condition of the pond and the adjacent territory were studied. Combined analysis of pond water level data obtained using Modification of Normalized Difference Water Index (MNDWI) and analysis of spectral index change plots allowed us to confirm the regularities identified during visual image analysis and to specify certain periods of sediment formation. The result of the study is a solution to the difficult problem of establishing the time period of sediment layers formation in abandoned waste storage areas, obtained using open remote sensing data.

**Keywords:** remote sensing, retrospective analysis, industrial waste, spectral indices

Accepted: 20.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-276-287

## References

1. Berezina O. A., Shikhov A. N., Abdullin R. K., The use of multi-temporal satellite images for environmental assessment in coal mining areas (by example of closed Kizel coal basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 144–158 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-144-158.



2. Demenev A. D., Berezina O. A., Maksimovich N. G., Mizev A. A., Applying remote sensing data to assess water quality in a mining area, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 271–285 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-271-285.
3. Drobina E. V., Belkin P. A., Modelling as a means of retrospective analysis of geoeological processes within the technogenic object, *Sergeevskie chteniya. Vypusk 26. Massivy gruntov kak zhizneobespechivayushchii resurs obshchestva. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geohkologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii (27–28 marta 2025 g.)* (Sergeev Readings. Iss. 26. Soil massifs as a life-supporting resource of the society. Proc. Annual Session of the Scientific Council of the RAS on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology (27–28 March 2025)), Moscow: Geoinfo, 2025, pp. 80–83 (in Russian).
4. Ermakov D. M., Demenev A. D., Meshcheriakova O. Yu., Berezina O. A., Features of the development of a regional water index for monitoring the impact of acid mine water discharges on river systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 222–237 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-222-237.
5. Belkin P., Nechaeva Y., Blinov S. et al., Sediment microbial communities of a technogenic saline-alkaline reservoir, *Heliyon*, 2024, V. 10, Iss. 13, Article e33640, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33640>.
6. Elhag M., Gitas I., Othman A. et al., Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid environments, Saudi Arabia, *Water*, 2019, V. 11, Iss. 3, Article 556, <https://doi.org/10.3390/w11030556>.
7. Hall F. G., Sterbel D. E., Nickeson J. E., Goetz S. J., Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multirate, multisensory images, *Remote Sensing of Environment*, 1991, V. 35, Iss. 1, pp. 11–27, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90062-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90062-B).
8. Lacaux J. P., Tourre Y. M., Vignolles C. et al., Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal, *Remote Sensing of Environment*, 2007, V. 106, Iss. 1, pp. 66–74, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>.
9. Lizcano-Sandoval L., Anastasiou C., Montes E. et al., Seagrass distribution, areal cover, and changes (1990–2021) in coastal waters off West-Central Florida, USA, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2022, V. 279, Article 108134, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108134>.
10. McFeeters S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, V. 17, Iss. 7, pp. 1425–1432, <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
11. Rahman M. M., Hay G. J., Couloigner I. et al., A comparison of four radiometric normalization (RRN) techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared (TIR) flight lines of a complex urban scene, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, V. 106, pp. 82–94, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002>.
12. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proc. 3<sup>rd</sup> Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp.*, 1974, V. 1, pp. 309–317.
13. Schott J. R., Salvaggio C., Volchok W. J., Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features, *Remote Sensing of Environment*, 1988, V. 26, Iss. 1, pp. 1–16, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2).
14. Segal D. B., Theoretical basis for differentiation of ferric-iron bearing minerals, using Landsat MSS data, *Proc. Symp. for Remote Sensing of Environment, 2<sup>nd</sup> Thematic Conf. on Remote Sensing for Exploratory Geology*, Environmental Research Institute of Michigan, 1982, pp. 949–951.
15. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E. et al., Environmental aspects of potash mining: A case study of the Verkhnekamskoe potash deposit, *Mining*, 2023, V. 3, Iss. 2, pp. 176–204, <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.
16. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, V. 27, Iss. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.