

УДК 622.85:622.271.45:550.814

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ
ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Ю. П. Галченко¹, Ю. А. Озарян², Т. В. Кожевникова³, В. Е. Окладников³

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,*

E-mail: schtrek33@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²*Институт горного дела ДВО РАН — обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН,*

E-mail: ozaryanigd@gmail.com, ул. Тургенева 51, 680000, г. Хабаровск, Россия

³*Вычислительный центр ДВО РАН — обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН,*

E-mail: ktvsl@mail.ru, ул. Ким Ю Чена, 65, 680000, г. Хабаровск, Россия

Предложена методика анализа спутниковых снимков для мониторинга состояния поверхности объектов согласно данным дистанционного зондирования Земли. Представлены результаты исследований по разработке алгоритма выделения объектов размещения горнопромышленных отходов. В качестве исходных данных рассмотрены снимки территорий юга Дальнего Востока со спутников Sentinel 2, Landsat 5–8. На базе облачной платформы Earth Engine рассчитано значение вегетационного индекса для каждого пикселя с помощью функции нормализованной разности и создана исследуемая область посредством стандартного инструмента. Для преобразования пикселей в площадь использован метод reduce. Разработанный метод актуален для мониторинга различных объектов (хвостохранилищ, карьеров, отвалов и т. д.), находящихся в разных стадиях развития.

Алгоритм, отходы, спутниковый снимок, дистанционное зондирование Земли, рекультивация, нарушенные земли, геоинформационная система, вегетационный индекс

DOI: 10.15372/FTPRPI20240415

EDN: ZDBAQY

В рамках постоянного антропогенного преобразования общего географического пространства понятие пространства минеральных ресурсов представляет собой систему территориальных сочетаний конкретных месторождений полезных ископаемых, дислокация которых на земной поверхности обусловлена геологической заданностью положения минеральной аномалии в литосфере. Освоение новых месторождений чаще всего связано с необходимостью техногенного разрушения определенных участков экосистем естественной биоты Земли. Антагонистический характер противоречий между природной и технической составляющими систем освоения минеральных ресурсов недр предопределяет необходимость обеспечения коэволюционной стратегии геоэкологического управления развитием как технологий добычи полезных ископаемых,

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 24-11-20029 (<https://rscf.ru/project/24-11-20029/>).

так и технологий размещения и биологической реабилитации техногенных новообразований в виде хранилищ твердых отходов различной дисперсности. Необходимым условием такого управления является достоверная идентификация этих экологических объектов по их расположению и по интенсивности самовосстановления фитоценозов на их поверхности.

С помощью спутниковых снимков решаются разнообразные задачи, в том числе оценивается воздействие деятельности человека на окружающую среду. Горнодобывающий комплекс Дальнего Востока России удален от крупных населенных пунктов. Подъездные пути к некоторым месторождениям расположены в условиях сезонной мерзлоты и доступны только в зимний период. В этой связи дистанционный мониторинг приобретает особую актуальность.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

В отечественной литературе описываются различные методы определения и дешифрирования объектов с помощью данных дистанционного зондирования Земли, большая часть которых проводится вручную. Основными можно считать проведение визуальной оценки границ территории объектов [1] и расчет различных индексов для лучшего выделения границ объектов [2]. Отдельно можно отметить применение анализа дескрипторов для более точной классификации объектов [3]. Что касается методов искусственного интеллекта, то их использование рассматривается обычно как перспективный инструмент исследования объектов [4].

В зарубежных исследованиях методы искусственного интеллекта и детектирования объектов по данным дистанционного зондирования Земли для решения выбранного класса задач внедряются гораздо чаще. Описываются и сравниваются модели нейронных сетей для сегментации различных объектов по данным дистанционного зондирования Земли [5]. Разрабатываются и применяются модели, сфокусированные на определении границ объектов горной промышленности [6–8]. Дешифрирование самих объектов горной промышленности также проводится без участия машин [9].

На основе спутниковых данных и снимков с беспилотных летательных аппаратов с помощью спектрально-динамических признаков, извлекаемых из серий значений вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) за определенный временной период, успешно проводится экологический мониторинг угольных разрезов [10]. Похожим образом выполняются наблюдения за другими открытыми карьерами. Благодаря совместному использованию спутниковых каналов получены изображения, на которых легко распознаются загрязнения продуктами разложения сульфидов и наличие водных объектов. Это позволило провести мониторинг геоэкологического состояния территории в горнопромышленных районах [11]. Оценивалось изменение растительного покрова в различных временных и пространственных масштабах с использованием данных дистанционного зондирования Земли и географических информационных систем в районах добычи бора [12] и золота [13–14]. Рассматривалось применение кластерного анализа с целью выявления ключевых параметров, оказывающих влияние на растительность [15].

Увеличение объемов добычи становится причиной роста количества отходов и площади земель, отчуждаемых под их размещение. Большая часть территорий земельного отвода предприятия занимается отвалами вскрышных пород. Отходы горных предприятий являются потенциальными техногенными месторождениями и представляют ценность для недропользователей. Необходимы мониторинговые исследования, направленные на выявление участков размещения горнопромышленных отходов и реализацию процессов восстановления растительности на их поверхности [16].

Цель работы — разработка методов идентификации объектов размещения отходов горно-промышленного комплекса по данным дистанционного зондирования Земли. Рассматриваются и решаются следующие задачи: выбор спутниковых снимков исследуемой территории; первичная обработка полученных данных; расчет NDVI; выделение объектов в Google Earth Engine на слое NDVI (карьер, отвал, хвостохранилище и др.); классификация пикселей изображения объекта по значениям NDVI для определения его площади и территории зарастания.

Объекты изучения — природно-технические системы горнопромышленного комплекса юга Дальнего Востока. Для решения поставленных задач предложена методика и алгоритм анализа спутниковых снимков для мониторинга состояния поверхности объектов по данным дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных данных рассматривались снимки исследуемых территорий со спутников Sentinel 2, Landsat 5–8. Анализ исходных данных выполнялся в Google Earth Engine — облачной платформе для обработки пространственных данных и материалов дистанционного зондирования Земли [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для апробации метода выбраны типовые объекты: карьер по добыче гравия и хвостохранилище отходов переработки полиметаллических руд. Оценка качества вторичных растительных сообществ проводилась с помощью композита изображения в интервале с 15 июня по 10 августа (с 1 июня по 30 августа на спутнике Landsat из-за малого количества снимков) за каждый исследуемый год (2019–2022 гг. — Sentinel-2; 2013–2018 гг. — Landsat 8; 2011–2012 гг. — Landsat 7; 2003–2010 гг. — Landsat 5). Набор снимков за указанный промежуток времени выбранной территории проходил через атмосферную коррекцию с использованием встроенных методов Earth Engine.

Для разных спутников выбирались разные каналы. С использованием полученного изображения рассчитывалось значение NDVI для каждого пикселя посредством функции нормализованной разности на базе Earth Engine и создавалась исследуемая область с помощью стандартного инструмента. Код ее формы использовался во всех программах для расчета изменения площади зарастания на протяжении заданного временного интервала. Преобразование пикселей в площадь осуществлялось методом reduce [18]. Для разработки и тестирования алгоритма выбран карьер по добыче строительного камня.

На первом этапе проводилась атмосферная коррекция набора снимков за указанный промежуток времени исследуемой территории. Для снимков с разных спутников использовались различные технологии очистки. Снимки с Sentinel-2 очищались от облаков с помощью стандартных инструментов Earth Engine, для снимков с Landsat применялись маски облаков. В результате создавался композит из набора снимков, где значением канала в каждом пикселе является медиана этого пикселя среди всех снимков (рис. 1а). После этого в каждом пикселе изображения рассчитывался NDVI.

В табл. 1 приведен список используемых спутников и соответствующие им каналы для красного (Red) и ближнего инфракрасного (NIR near-infrared) спектра электромагнитного излучения.

ТАБЛИЦА 1. Используемые каналы для различных спутников

Спутник	Канал Red	Канал NIR
Sentinel-2	B4	B8
Landsat 8	SR_B4	SR_B5
Landsat 5	SR_B3	SR_B4

Расчет значений NDVI для каждого пикселя выполнялся с помощью функции нормализованной разности Earth Engine и с использованием соответствующих каналов для разных спутников (рис. 1б).

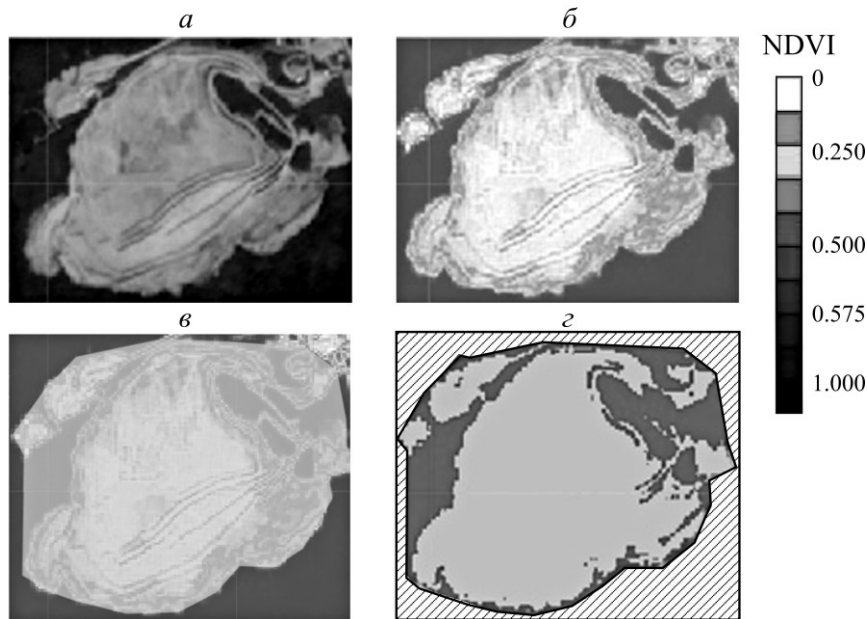


Рис. 1. Изображение карьера со спутника Sentinel-2: а — реальное изображение; б — рассчитанный индекс NDVI; в — выделенная область исследования; г — бинаризация индекса NDVI в области исследования по порогу 0.35.

Далее выделялась область наблюдения (объект), зафиксированная в 2022 г., и максимальная площадь карьера, определенная в 2023 г., с обрисовкой полигона карьера. Для этого с помощью стандартного инструмента Earth Engine получалась нужная фигура и код этой фигуры вставлялся во все программы для расчета изменения площади зарастания карьера предыдущих лет (рис. 1в). После расчета индекса проводилась классификация пикселей по изображению (рис. 1г): 1, если NDVI более 0.35 (темно-серый цвет); 0, если NDVI менее 0.35 (серый цвет). Таким образом создавалось новое изображение на основе NDVI — с обрезкой его по области интереса (по карьере) и классификацией пикселей.

Для расчета пиксели разных классов преобразовывались в их площадь. Метод reduce из стандартных инструментов Google Earth Engine использовался для суммирования площади пикселей нужных классов. Данные с каждого снимка агрегировались в таблицу, строились графики (рис. 2) для последующего анализа процесса зарастания отвалов и изменения площади объекта.

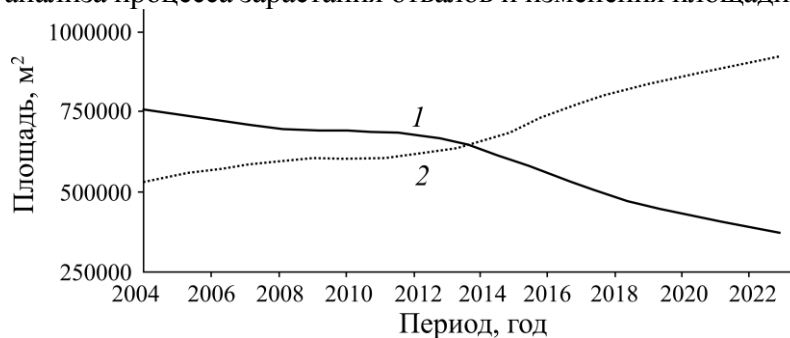


Рис. 2. Динамика биологического изменения площади карьера с системой отвалов: 1 — занятой растительностью; 2 — свободной от растительности

В табл. 2 представлены данные по площади зарастания карьера с 2004 по 2023 г. Значение $Sq / \max(Sq)$ — площадная характеристика объекта (в долях). За единицу взята максимальная площадь объекта без растительности. Рассчитывалось отношение площади без растительности в этот год к максимальной площади без растительности за весь исследуемый период, описывающее долю не заросшей площади объекта.

ТАБЛИЦА 2. Изменение площади зарастания карьера с 2004 по 2023 г.

Год	Спутник	Sp , м ²	Sq , м ²	$Sq / \max(Sq)$	$Sp / \max(Sq)$	$Sq / (Sq + Sp)$	$Sp / (Sq + Sp)$
2004	Landsat 5	757324	534514	0.58	0.42	0.41	0.59
2008	Landsat 5	698268	593571	0.65	0.35	0.46	0.54
2013	Landsat 5	662290	629548	0.68	0.32	0.49	0.51
2018	Landsat 8	482444	809394	0.88	0.12	0.63	0.37
2023	Sentinel-2	371996	919842	1	0	0.71	0.29

Примечание. Sp — площадь с растительностью, кв. м; Sq — площадь без растительности, кв. м.

В табл. 2 $Sp / \max(Sq)$ — обратное значение площадной характеристики объекта к значениям предыдущего столбца, т. е. доля заросшей площади объекта. Значение $Sq / (Sq + Sp)$ — площадная характеристика объекта (в процентах). За единицу берется вся область интереса и рассчитывается отношение площади без растительности ко всей площади, таким образом высчитывается доля не заросшей площади объекта. В последнем столбце $Sp / (Sq + Sp)$ приведено обратное значение площадной характеристики объекта к значениям предыдущего столбца, которое определяет долю заросшей площади объекта.

Алгоритм мониторинга изменения площади объекта может быть использован на различных объектах. В табл. 3 приводятся данные по площади зарастания хвостохранилища с 1990 по 2023 г.

ТАБЛИЦА 3. Изменение площади зарастания хвостохранилища

Год	Спутник	Sp , м ²	Sq , м ²	$Sq / \max(Sq)$	$Sp / \max(Sq)$	$Sq / (Sq + Sp)$	$Sp / (Sq + Sp)$
1990	Landsat 5	195917	205353	0.55	0.45	0.51	0.49
1996	Landsat 5	121214	280057	0.75	0.25	0.70	0.30
2004	Landsat 5	76845	324426	0.87	0.13	0.81	0.19
2011	Landsat 5	94509	306761	0.83	0.17	0.76	0.24
2019	Sentinel-2	81305	319966	0.86	0.14	0.80	0.20
2023	Sentinel-2	30010	371261	1	0	0.93	0.07

На рис. 3 показано изменение площади объекта свободной от растительности и площади зарастания хвостохранилища.

С помощью разработанной методики выделены объекты инфраструктуры, в том числе карьеры и хвостохранилища, расположенные на территории юга Дальнего Востока. Представленный алгоритм выделения объектов горнопромышленных отходов позволил определить не только площадные характеристики полигонов, но и объем размещенных в них отходов, а также наличие процессов естественного восстановления растительности на их поверхности.

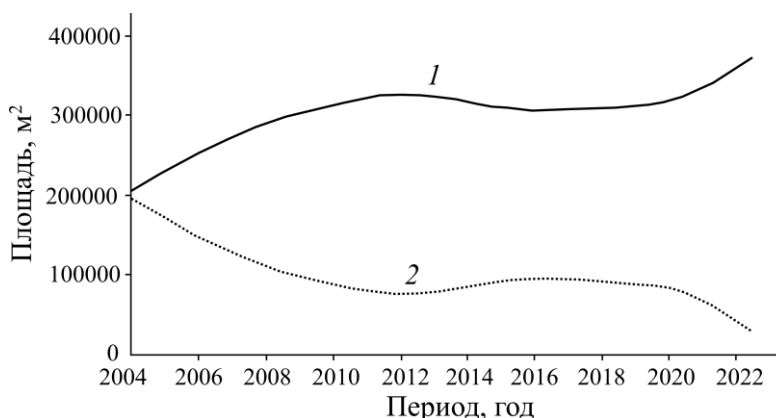


Рис. 3. Динамика биологического изменения площади хвостохранилища: 1 — занятой растительностью; 2 — свободной от растительности

Установлена пространственно-временная динамика площади исследуемых объектов. За период наблюдений площадь карьера увеличилась на 385328 кв. м, а прилегающих территорий, покрытых растительностью, снизилась. По полученным ранее данным, за это же время произошло естественное восстановление растительности на отвалах, расположенных по периметру карьера.

Аналогичные результаты получены при апробации методики на примере хвостохранилища, площадь которого за 33 года увеличилась на 165 908 м². Данный метод может быть использован для оценки площади любых техногенных объектов с целью выявления границ участков горных работ, определения объемов добычи и процессов восстановления растительности.

ВЫВОДЫ

Использование спутниковых снимков для идентификации объектов размещения отходов горнотехнических работ позволяет решать поставленную задачу с минимальными экономическими и временными затратами. Несмотря на то, что методы идентификации объектов по данным дистанционного зондирования Земли достаточно подробно описаны и применяются для детектирования горнопромышленных объектов, они обладают рядом недостатков. Более того, при обзоре не обнаружены методы автоматического определения необходимых параметров объектов, в том числе дражных отвалов, выведенных из эксплуатации.

Предлагаемый метод хорошо зарекомендовал себя в пилотных исследованиях. Он отличается простотой применения и реализации, не требует мощных вычислительных ресурсов, так как используются облачные технологии Google Earth Engine. С его помощью можно работать со снимками разрешения выше 30 м, что позволяет с приемлемой точностью определять границы техногенных новообразований и площадь проективного покрытия.

Апробация метода подтвердила его актуальность для экологических объектов, находящихся на разных стадиях своего развития, и депонирующих экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарифзянов Р. Д., Батракова Г. М. Идентификация и оценка экологического состояния территорий размещения отходов методом дешифрования космических снимков // Вестн. ПНИПУ. Прикл. экология. Урбанистика. — 2014. — № 3 (15). — С. 86–95.
2. Иванов А. В., Стриженок А. В., Супрун И. К. Методы дешифрирования геоэкологических условий территорий горнопромышленных комплексов на основании данных дистанционного зондирования земли // Геология и Геофизика Юга России. — 2019. — Т. 9. — №. 4. — С. 102–110.

3. **Ямашкин С. А., Ямашкин А. А.** Повышение эффективности процесса интерпретации данных дистанционного зондирования Земли за счет анализа дескрипторов окрестности // Инженерные технологии и системы. — 2018. — Т. 28. — №. 3. — С. 352—365.
4. **Корихин Н. Н., Ковязин В. Ф.** Необходимость применения искусственного интеллекта для обработки данных дистанционного зондирования Земли // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2023. — №. 64. — С. 61—66.
5. **Li K., Wan G., Cheng G., Meng L., and Han J.** Object detection in optical remote sensing images: A survey and a new benchmark, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2020, Vol. 159. — С. 296—307.
6. **MacDonald E., Jacoby D., and Coady Y.** MineSegSAT: An automated system to evaluate mining disturbed area extents from Sentinel-2 imagery, *Environ. Sci. Proc.*, 2024.
7. **Jabłońska K., Maksymowicz M., Tanajewski D., Kaczan W., Zięba M., and Wilgucki M.** MineCam: Application of combined remote sensing and machine learning for segmentation and change detection of mining areas enabling multi-purpose monitoring, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, No. 6. — С. 955.
8. **Ren Z., Wang L., and He Z.** Open-pit mining area extraction from high-resolution remote sensing images based on EMANet and FC-CRF, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 15. — С. 3829.
9. **Werner T. T., Mudd G. M., Schipper A. M., Huijbregt M. A. J., Taneja L., and Northey S. A.** Global-scale remote sensing of mine areas and analysis of factors explaining their extent, *Global Environmental Change*, 2020, Vol. 60. — С. 102007.
10. **Мусина Г. А., Ожигин Д. С., Ожигина С. Б.** Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 4. — №. 2. — С. 196—204.
11. **Миков Л. С., Счастливцев Е. Л., Андроханов В. А.** Оценка эффективности рекультивации на участках разреза “Назаровский” с помощью данных дистанционного зондирования // ГИАБ. — 2023. — № 1. — С. 70—83.
12. **Wei L., Yuan Z., Zhong Y., Yang L., Hu X., and Zhang Y.** An improved gradient boosting regression tree estimation model for soil heavy metal (Arsenic) pollution monitoring using hyperspectral remote sensing, *Appl. Sci.*, 2019, Vol. 9, No. 9. — С. 1943.
13. **Orimoloye I. R. and Ololade O. O.** Spatial evaluation of land-use dynamics in gold mining area using remote sensing and GIS technology, *Int. J. Env. Sci. Technol.*, 2020, Vol. 17. — С. 4465—4480.
14. **Cetin M. S., Isik P. O., Bilge O. G., Senyel K. M. A., Kucukpehlivan T., and Cabuk A.** Examination of the change in the vegetation around the Kirka Boron mine site by using remote sensing techniques, *Water, Air, Soil Pollut.*, 2022, Vol. 233, No. 7. — С. 254.
15. **Ozaryan Y. A., Kozhevnikova T. V., and Manzhula I. S.** Information and computational technologies for research of natural recovery of vegetation cover, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2021, Vol. 895, No. 1. — С. 012035.
16. **Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П.** Природоподобная технология комплексного освоения недр — проблемы и перспективы. — М.: Научтехлитиздат, 2020. — 367 с.
17. **Google Earth Engine** Google for Developers [Электронный ресурс]. URL: <https://developers.google.com/earth-engine> (дата обращения: 13.02.2024).
18. **Reducer Overview** Google Earth Engine | Google for Developers [Электронный ресурс]. URL: https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_intro (дата обращения: 13.02.2024).

Поступила в редакцию 06/V 2024

После доработки 15/VI 2024

Принята к публикации 27/VI 2024