Научная статья

УДК 504.06:622.1:528.88

МОНИТОРИНГ ТРАЕКТОРИЙ ДЕГРАДАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НАРУШЕННЫХ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ТЕРРИТОРИЙ ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ LANDSAT И SENTINEL-2

Майсс Артур Айварович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Россия, Владивосток, artur_aivarovich@yandex.ru

Аннотация. Традиционные методы оценки биологической рекультивации часто ограничиваются фиксацией факта появления растительности, игнорируя скрытые вторичные деградационные процессы и климатические флуктуации. Цель работы — выявить и типологизировать устойчивые траектории восстановления фитоценозов на нарушенных горными работами территориях с разделением эффектов рекультивации и естественной изменчивости. Исследование выполнено на территории крупного угольного разреза. Автор стратифицировал техногенный массив на действующие нарушения, молодые и старые рекультивации, а также ненарушенный естественный референс. Для устранения фенологических и топографических искажений рассчитаны индексы NDVI, NDMI, BSI и NDRE с обязательными поправками на рельеф. Экологическую интерпретацию спектральных данных обеспечили многолетние наземные геоботанические описания. Установлено, что пиковые значения NDVI не эквивалентны восстановлению исходного сообщества и часто маскируют доминирование рудеральной фракции. Выделены четыре типа сукцессионных траекторий: от быстрого устойчивого развития до временного озеленения с последующей деградацией, обусловленной самовозгоранием породных отвалов. Индексы красного края и влажности достоверно коррелируют с надземной фитомассой и влагозапасом почвы, тогда как классический NDVI отражает лишь

общее проективное покрытие. Показано, что достижение референсных значений биомассы занимает 15–18 лет, однако видовое богатство не выходит на фоновый уровень даже спустя 25 лет. Результаты обосновывают необходимость перехода от эпизодического картирования к непрерывному отслеживанию динамики восстановления с обязательной наземной верификацией.

Ключевые слова: горная рекультивация; дистанционное зондирование; Landsat; Sentinel-2; траектории восстановления; спектральные индексы.

Original article

MONITORING DEGRADATION AND RESTORATION TRAJECTORIES OF VEGETATION COVER IN AREAS DISTURBED BY MINING OPERATIONS USING LONG-TERM LANDSAT AND SENTINEL-2 DATA

Maiss Artur Aivarovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia, artur_aivarovich@yandex.ru

Abstract. Traditional methods for assessing biological reclamation are often limited to recording the appearance of vegetation, ignoring hidden secondary degradation processes and climatic fluctuations. The aim of this study is to identify and classify sustainable trajectories of phytocenoses restoration in areas disturbed by mining, distinguishing between the effects of reclamation and natural variability. The study was conducted at a large open-pit coal mine. The authors stratified the man-made massif into active disturbances, recent and past reclamation sites, and an undisturbed natural reference. To eliminate phenological and topographic distortions, the NDVI, NDMI, BSI, and NDRE indices were calculated, with mandatory corrections for relief. Long-term ground-based geobotanical descriptions provided an ecological interpretation of the spectral data. It was established that peak NDVI values are not equivalent to the restoration of the original community and often mask the dominance of the ruderal fraction. Four types of successional trajectories were identified: from

rapid sustainable development to temporary greening followed by degradation caused by spontaneous combustion of waste dumps. The red edge and moisture indices significantly correlate with aboveground phytomass and soil moisture content, while the classic NDVI reflects only the total projective cover. It was shown that reaching reference biomass values takes 15–18 years, but species richness does not reach background levels even after 25 years. The results substantiate the need to move from episodic mapping to continuous tracking of ecological trajectories with mandatory ground-based testing.

Keywords: mine land reclamation; remote sensing; Landsat; Sentinel-2; recovery trajectories; spectral indices.

Введение. Открытая разработка месторождений сопровождается тотальным преобразованием земной поверхности, в ходе которого деградируют почвы, перестраивается гидрологическая сеть и уничтожаются существующие фитоценозы. Изъятие горных масс и формирование отвалов нарушают естественные геохимические и биогеоценотические связи, восстановление которых занимает десятилетия [1], [2]. В качестве компенсирующей меры горнодобывающие предприятия осуществляют техническую и биологическую рекультивацию, чтобы сформировать новый растительный покров [3], [4]. Однако процесс становления искусственных экосистем растянут во времени и часто осложняется вторичными деструктивными явлениями. К таким факторам относят просадки земной поверхности, эрозию склонов и термическое воздействие горящих породных отвалов, которые способны многократно уничтожать уже сформированные насаждения [5-7]. Следовательно, начальный этап озеленения не гарантирует долгосрочной устойчивости нарушенных земель.

Чтобы объективно оценить успешность восстановительных мероприятий, необходимо непрерывно наблюдать за динамикой растительности на протяжении десятилетий. Традиционные наземные геоботанические описания,

обладая высокой точностью, отличаются значительной трудоемкостью и охватывают лишь незначительную часть территории [8]. Стационарные пробные площади не способны отразить мозаичность процессов, развивающихся на сотнях гектаров горных отводов [9]. В этих условиях необходимы методы, обеспечивающие регулярный сбор данных на обширных территориях без непосредственного воздействия на техногенные ландшафты.

Оптимальным решением данной задачи выступает космическая съемка, поскольку она позволяет отслеживать фенологические и структурные изменения фитоценозов в ретроспективе [10]. Архивы мультиспектральных снимков Landsat и Sentinel-2 содержат многолетние данные с высоким пространственным и временным разрешением. Анализ таких данных дает возможность рассчитывать вегетационные индексы, выявлять скрытые тренды усыхания и фиксировать моменты, когда растения достигают состояния относительной стабильности [11]. Объединение многолетних рядов наблюдений позволяет перейти от отдельных временных срезов к анализу непрерывной динамики экологического восстановления.

Обзор литературы. Горнодобывающая промышленность формирует обширные техногенные ландшафты, где исходные биогеоценозы уничтожаются, а почвенно-растительный покров заменяется субстратами с экстремальными физико-химическими свойствами [12-14]. Традиционные подходы к оценке успешности биологической рекультивации часто сводятся к констатации факта появления растительности. Однако для формирования устойчивой экосистемы недостаточно первичного озеленения отвалов. Современные исследователи всё чаще обращают внимание на то, что методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют отслеживать эти процессы в многолетней динамике [15].

Тем не менее, анализ современных публикаций выявляет существенные методические ограничения. Большинство работ ограничивается картированием земного покрова или расчетом стандартных вегетационных индексов без глубокой экологической интерпретации [16-18]. Как показывают

систематические обзоры, лишь малая часть исследований оценивает сложные экологические атрибуты, такие как видовое разнообразие или устойчивость фитоценозов к вторичным нарушениям. При этом высокие значения NDVI часто отражают интенсивное развитие рудеральных видов, а не восстановление целевого сообщества [19], [20]. Кроме того, климатические колебания и топографические факторы (экспозиция, затенение) искажают спектральную картину, что затрудняет отделение эффекта рекультивации от естественной межгодовой изменчивости. Возникает необходимость комплексного методического подхода, где спутниковые данные используются для решения конкретных экологических задач.

Методы исследования. Объектом исследования послужила территория угольного разреза «Красногорский» (Кузбасс) и сопряженные с ним техногенные массивы. Для обеспечения репрезентативности выборки изучаемый массив был стратифицирован на четыре функциональные зоны:

1) действующие нарушения (свежие породные отвалы без растительности);

2) недавно рекультивированные участки (срок 3–5 лет после отсыпки и планировки);

3) старые рекультивированные участки (срок 15–25 лет, прошедшие этап первичного озеленения);

4) естественные референсные территории (ненарушенные участки степной растительности, расположенные в буферной зоне).

В качестве исходных данных использованы архивные снимки Landsat (1990–2022 гг.) и современные данные Sentinel-2 (2017–2023 гг.). Для исключения фенологических искажений отбор изображений проводился строго в период максимума биомассы (третья декада июля — первая декада августа). Топографические поправки на экспозицию, крутизну склонов и теневые эффекты вносились с использованием цифровых моделей рельефа (SRTM и ALOS PALSAR).

Помимо стандартного NDVI, рассчитывались индекс влажности

растительности NDMI, индекс обнаженного грунта BSI, а также для данных Sentinel-2 — индексы красного края (NDRE), чувствительные к содержанию хлорофилла и физиологическому стрессу. Анализ временных рядов проводился с применением непараметрического теста Sen+Mann-Kendall для выявления значимых трендов. Классификация земного покрова выполнялась с использованием алгоритма случайного леса; ее точность оценивалась по матрице ошибок, общей точности (Overall Accuracy, OA), точности производителя (Producer's Accuracy, PA) и точности пользователя (User's Accuracy, UA).

Наземные работы (2020–2023 гг.) включали закладку постоянных пробных площадей. Измерялись общее проективное покрытие, видовой состав, видовое богатство, доля рудеральных и инвазивных видов, надземная фитомасса, а также влажность и температура верхнего почвенного горизонта (0–10 см). Полевые данные использовались для оценки достоверности классификации и экологической интерпретации спектральных индексов.

Результаты исследования и их обсуждение. Для оценки качества тематической классификации использованы показатели точности производителя (PA), точности пользователя (UA) и общей точности (OA). Согласно представленной таблице 1, общая точность составляет 88,4 %, при этом для отдельных классов наблюдается неодинаковая выраженность ошибок смешения. Наиболее существенные затруднения связаны с разграничением молодой рекультивации и близких по спектральным характеристикам рудеральных местообитаний.

Таблица 1 - Показатели точности классификации земного покрова (данные Sentinel-2, август 2022 г.)

Класс земного покрова	Точность производителя (PA), %	Точность пользователя (UA), %	Основная причина ошибок смешения
Референсная степь	91.2	89.5	Ошибки на границах с залежами
Старая рекультивация	86.5	82.1	Смешение с участками доминирования Lepidium draba
Молодая рекультивация	84.0	76.4	Спектральная схожесть с рудеральной фракцией

Обнаженный грунт / отвал	94.5	92.0	Теневые эффекты на крутых склонах
Общая точность (OA)	88.4	Kappa = 0.85	

Источник: разработано автором.

Сопоставление временных рядов NDVI референсных участков с рекультивируемыми зонами позволило отделить эффект рекультивации от климатической вариабельности. В засушливые годы (2010, 2012, 2021) индекс NDVI на всех типах территорий синхронно снижался. Однако на старых рекультивированных участках амплитуда этих колебаний была значительно выше, чем на референсе, что указывает на низкую буферную емкость искусственных почв и их высокую зависимость от атмосферного увлажнения.

Анализ многолетних рядов данных выявил, что восстановление не является линейным процессом. Выделены четыре устойчивые траектории, которые отражают не только скорость роста биомассы, но и экологическую стабильность формирующихся сообществ (Таблица 2).

Таблица 2 - Типология траекторий восстановления растительного покрова на нарушенных территориях

Тип траектории	Спектральная динамика (NDVI/NDRE)	Экологическая характеристика (по полевым данным)	Доля площади, %
I. Быстрое устойчивое	Выход на плато за 4-5 лет, стабильно высокие значения NDRE	Формирование сомкнутого покрова, низкая доля рудералов (<15%), высокое видовое богатство	28
II. Медленное восстановление	Постепенный рост без выхода на плато к 20 годам	Разреженный покров, доминирование пионерных видов, медленное накопление гумуса	41
III. Временное озеленение с деградацией	Резкий пик NDVI на 2-3 год, последующее падение и флуктуации	Вспышка роста сорняков с последующей гибель из-за токсикоза или самовозгорания пород	19
IV. Отсутствие устойчивого восстановления	Низкие фоновые значения, высокая доля BSI	Фрагментарный покров, эрозионные процессы, преобладание обнаженного грунта	12

Источник: разработано автором.

По отдельным снимкам участки с траекторией третьего типа могут

ошибочно восприниматься как успешно восстановленные. Однако временной ряд четко показывает, что высокий NDVI в первые годы обеспечивается однолетними рудеральными видами, которые быстро истощают ресурсы субстрата и погибают, оставляя поверхность уязвимой для эрозии.

Для оценки согласованности наземных и дистанционных характеристик рассматриваются коэффициенты статистической связи между спектральными индексами и характеристиками растительного покрова. В представленной таблице 3 значения показателей BSI включают отрицательные величины −0,65; −0,18; −0,41; −0,58 и −0,61 (Таблица 3). Индекс NDMI оказался наиболее чувствительным к влажности верхнего почвенного горизонта, что критически важно для оценки водоудерживающей способности рекультивированных почв.

Таблица 3 - Коэффициенты корреляции r между спектральными индексами и наземными экологическими характеристиками

Наземный показатель	NDVI	NDMI	BSI	NDRE (Sentinel-2)
Общее проективное покрытие	0.78**	0.45*	-0.65**	0.62**
Видовое богатство	0.12 (н/з)	0.21 (н/з)	-0.18 (н/з)	0.34*
Доля рудеральных видов	0.68**	0.31	-0.41*	0.15 (н/з)
Влажность почвы (0-10 см)	0.35*	0.82**	-0.58**	0.28
Надземная фитомасса	0.74**	0.51*	-0.61**	0.81**

Источник: разработано автором.

Особенно информативными оказались индексы красного края (NDRE), рассчитываемые по данным сенсоров MSI спутников Sentinel-2. Индексы красного края NDRE, вычисляемые по данным Sentinel-2, позволяют дополнить анализ состояния растительного покрова информацией об изменении спектральных характеристик, связанных с содержанием хлорофилла и физиологическим состоянием растений. В рассматриваемом материале NDRE демонстрирует статистическую связь с надземной фитомассой, однако изменение индекса само по себе не определяет конкретную причину нарушения состояния растений. Потенциальными факторами могут выступать недостаток влаги, особенности субстрата, температурный режим, химическое загрязнение и сезонная изменчивость.

Одной из ключевых задач являлась оценка времени, необходимого для

достижения референсного состояния. Анализ ретроспективных спектральных рядов позволяет оценивать изменение характеристик растительного покрова по мере увеличения времени, прошедшего после рекультивации. В рассматриваемом наборе условий сближение значений NDVI с референсными территориями отмечается на интервале порядка 15–18 лет. Однако полевые данные свидетельствуют, что видовой состав и структура фитоценоза даже спустя 25 лет не достигают полного сходства с естественной степью. Доля рудеральных видов на старых отвалах остается на уровне 25–30%, а видовое богатство на 40% ниже, чем на ненарушенных территориях.

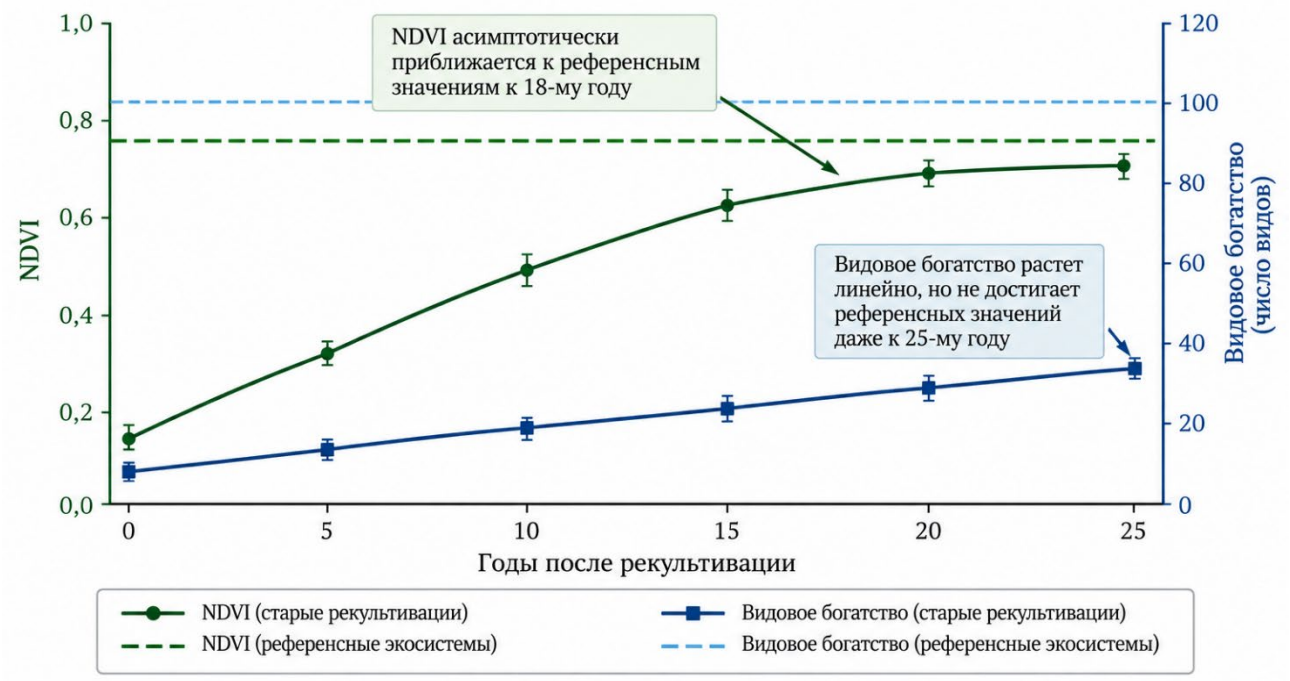


Рисунок 1 – Кривые восстановления (источник: разработано автором)

Проведенное исследование показывает, что при спутниковом мониторинге следует переходить от простого картирования к анализу экологических траекторий. Использование исключительно индекса NDVI без учета фенологии, топографии и наземной верификации приводит к ложным выводам об успешности рекультивации. Высокая спектральная яркость часто маскирует деградационные процессы и доминирование рудеральной фракции.

Научным результатом работы является разработка типологии траекторий восстановления, позволяющей прогнозировать долгосрочную устойчивость

рекультивированных земель. Интеграция данных Sentinel-2 (в частности, индексов красного края) с полевыми экологическими измерениями позволяет различать формирование растительного покрова и экологическое восстановление. Установлено, что достижение референсных значений биомассы происходит за 15–18 лет, тогда как восстановление видового разнообразия требует существенно большего времени и целенаправленного управления сукцессионными процессами.

Выводы. Проведенный ретроспективный анализ многолетних спутниковых данных позволяет утверждать, что процесс становления растительного покрова на техногенных массивах не подчиняется линейной динамике. Выявленные траектории свидетельствуют о том, что первичное увеличение индексов озеленения далеко не всегда эквивалентно достижению экологической устойчивости. Напротив, временные ряды фиксируют случаи вторичной деградации, обусловленной эндогенными факторами, такими как самовозгорание породных отвалов или просадки земной поверхности. Подобные явления могут повторяться и распространяться на новые участки, что показывает ограниченность представления о завершении восстановительных работ сразу после формирования сомкнутого травянистого или кустарникового яруса.

В связи с этим при организации экологического контроля следует сместить акцент с картирования пространственной структуры на оценку функциональных параметров формирующихся экосистем. Традиционная практика, основанная преимущественно на расчете нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), имеет ограниченную диагностическую ценность. Для объективной оценки состояния биоты необходимо внедрение комплексных методик, включающих использование индексов красного края, доступных благодаря сенсорам нового поколения, а также обязательную интеграцию дистанционных измерений с наземными геоботаническими описаниями. Такое сочетание методов позволит различать восстановление видового разнообразия и временное массовое развитие рудеральных видов.

При планировании рекультивационных мероприятий следует учитывать различия в сроках достижения стабильного состояния у разных жизненных форм растений. Установлено, что травянистые сообщества выходят на уровень устойчивого развития в течение первого вегетационного сезона, тогда как для формирования жизнеспособных древесно-кустарниковых насаждений требуется не менее трех лет. Следовательно, нормативные периоды последующего ухода и мониторинга необходимо устанавливать индивидуально для каждого типа посадок, избегая унифицированных сроков. При выборе ассортимента растений для закрепления откосов приоритет следует отдавать комбинированным схемам, в которых быстрое формирование травяного покрова сочетается с укреплением грунта корневыми системами кустарников, что снижает риск водной эрозии и оползней.

Стратегия долгосрочного экологического сопровождения закрытия горных предприятий должна предусматривать непрерывный мониторинг с применением алгоритмов выявления трендов и точек изменения во временных рядах. Подобный подход обеспечивает раннее обнаружение проблемных зон, где динамика восстановления отстает от фоновых значений или демонстрирует признаки угасания. Своевременная фиксация таких аномалий дает возможность точечно корректировать агротехнические мероприятия, проводить дополнительную подсадку сеянцев или применять инженерные методы изоляции горящих породных масс до того, как очаги деградации приобретут необратимый характер. Переход от эпизодических проверок к систематическому мониторингу динамики экологического восстановления будет способствовать достижению целевых показателей землепользования и устойчивому функционированию рекультивированных ландшафтов.

Список литературы

1. Wang B., Li P., Zhu X. Quantification of Vegetation Phenological Disturbance Characteristics in Open-Pit Coal Mines of Arid and Semi-Arid Regions Using Harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 21. Art.

5257. DOI: 10.3390/rs15215257.

2. Миков Л. С., Счастливцев Е. Л., Андроханов В. А. Оценка эффективности рекультивации на участках разреза «Назаровский» с помощью данных дистанционного зондирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 70–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_70.

3. Wang H., Zhou W., Guan Y., Wang J., Ma R. Monitoring the Ecological Restoration Effect of Land Reclamation in Open-Pit Coal Mining Areas: An Exploration of a Fusion Method Based on ZhuHai-1 and Landsat 8 Data // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 904. Art. 166324. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166324.

4. Митракова Н. В., Хайрулина Е. А., Перевощикова А. А., Порошина Н. В., Малышкина Е. Е., Яковлева Е. С., Кобелев Н. А. Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернистоугольных отвалах бореальной зоны // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9. № 4. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206.

5. Himmy O., Nguyen T. T., Hemmler K. S., Loulad S., Rhinane H., Buerkert A. Leveraging Machine Learning and Landsat Time Series for High-Resolution Mapping of Mining-Induced Vegetation Changes in Ouagadougou, Burkina Faso // Environmental Challenges. 2024. Vol. 17. Art. 101026. DOI: 10.1016/j.envc.2024.101026.

6. Жуков А. А., Жукова Е. Ю. Картографирование растительности отвалов угольных разрезов Хакасии по данным Sentinel-2 // Рекультивация нарушенных земель: технологии, эффективность и биоразнообразие: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. 2024. С. 100–103. DOI сборника: 10.31251/conf-2-2024.

7. Syarief A., Bagus M. I., Wilis R. Analysis of Land Exploitation and Reclamation in Coal Mining Land Based on Vegetation Index Using Sentinel-2 Data // Proceedings of ICGEO. 2023. DOI: 10.4108/eai.19-11-2022.2332155.

8. Колесников А. А., Косарев Н. С., Резник А. В., Немова Н. А.

Автоматизированный дистанционный мониторинг техногенно измененных территорий с использованием методов машинного обучения // Геодезия и картография. 2025. № 12 (1026). С. 29–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1026-12-29-37.

9. Liu W., Xu Y., Xie H., Zhang H., Guo L., Li J., Zhang C. 30-Year Dynamics of Vegetation Loss in China's Surface Coal Mines: A Comparative Evaluation of CCDC and LandTrendr Algorithms // Sustainability. 2025. Vol. 17. No. 20. Art. 9011. DOI: 10.3390/su17209011.

10. Гальченко Ю. П., Цыгулев К. С., Озарян Ю. А., Кожевникова Т. В., Орлов С. А. Assessment Algorithm for Plant Communities of Natural Biota in Areas of Mine Dust Deposition // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2025. № 3. С. 195–201. DOI: 10.15372/FTPRPI20250319; англ. версия: Journal of Mining Science. Vol. 61. No. 3. P. 518–524.

11. Zhen X., Yu Z., Shi Y., Zhao Y. Fusing LandTrendr BCI and Machine Learning for Spoil Dump Mapping // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 44060. DOI: 10.1038/s41598-025-32957-0.

12. Сизов О. С. Динамика зарастания сухоройных песчаных карьеров в северо-таёжных условиях Западной Сибири за период с 1985 по 2021 гг. // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1.

13. Ivanova O. A. / Иванова О. А. Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11. № 2. С. 49–60. DOI: 10.17072/2410-8553-2025-2-49-60.

14. Hui J., Cheng Y. Detecting Disturbance and Recovery in Mining Landscapes: A Novel Time-Series Framework Based on Improved LandTrendr and Machine Learning // Environmental Research. 2026. Vol. 295. Art. 123868. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123868.

15. Wang Y., Zhou J., Shi X., Meng L. Remote Sensing Diagnosis of Vegetation Degradation and Recovery in Mining Disturbed Domain of China's Core Ionic Rare

Earth Mining Area from 1982 to 2025 // Geocarto International. 2026. Vol. 41. No. 1. DOI: 10.1080/10106049.2026.2650870.

16. Xu S., Zhou J., Wang K., Giljum S., Maus V., Werner T. T., Tang L., Guo J., Xiao W. Global Surface Mining and Land Reclamation of Time Series from 1985–2022 // Earth System Science Data. 2026. Vol. 18. P. 6293–6320. DOI: 10.5194/essd-18-6293-2026.

17. Wang H., Li J., Zhang R., Lan Y., Zhang J., Chen P., Wang L., Zhang C. Heterogeneous Vegetation Resilience Trajectories Beneath Greening During Open-Pit Mine Reclamation // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 151. Art. 105408. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105408.

18. Wang G., Xiao W., Zhang W., Guo J. Time-Series Monitoring of Vegetation Disturbance and Recovery over Surface Mining Patches in the Yellow River Basin // GeoEnergy Communications. 2026. Vol. 2. Art. 5. DOI: 10.1007/s44421-026-00018-5.

19. Yang Z., Tian W., He T., Ren H., Wang X., Jiang H., Zhao L., Zhao Y., Chen Y. A Global Perspective: Quantifying Disturbance and Reclamation of Surface Coal Mining Through Remote Sensing Innovations // Global Environmental Change. 2026. Vol. 98. Art. 103138. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2026.103138.

20. Yuan Y., Yu Z., Pan Z., Guo J., Fan G., Lü Z., He Y., Zhang C., Tang Y. A Context-Specific Index Accurately Tracks the Decadal Trajectory of Mining Impacts and Ecological Rehabilitation // Environmental and Sustainability Indicators. 2026. Vol. 29. Art. 101117. DOI: 10.1016/j.indic.2026.101117.

References

1. Wang B., Li P., Zhu X. Quantification of Vegetation Phenological Disturbance Characteristics in Open-Pit Coal Mines of Arid and Semi-Arid Regions Using Harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 21. Art. 5257. DOI: 10.3390/rs15215257.

2. Mikov L. S., Schastlivcev E. L., Androxanov V. A. Ocenka e`ffektivnosti rekul`tivacii na uchastkax razreza «Nazarovskij» s pomoshh`yu danny`x

distancionnogo zondirovaniya // Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten`. 2023. № 1. S. 70–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_70.

3. Wang H., Zhou W., Guan Y., Wang J., Ma R. Monitoring the Ecological Restoration Effect of Land Reclamation in Open-Pit Coal Mining Areas: An Exploration of a Fusion Method Based on ZhuHai-1 and Landsat 8 Data // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 904. Art. 166324. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166324.

4. Mitrakova N. V., Xajrulina E. A., Perevoshhikova A. A., Poroshina N. V., Maly`shkina E. E., Yakovleva E. S., Kobelev N. A. Ximiko-e`kologicheskie svojstva pochv i indeks NDVI na rekul`tivirovanny`x sernistougol`ny`x otvalax boreal`noj zony` // Gorny`e nauki i texnologii. 2024. T. 9. № 4. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206.

5. Himmy O., Nguyen T. T., Hemmler K. S., Loulad S., Rhinane H., Buerkert A. Leveraging Machine Learning and Landsat Time Series for High-Resolution Mapping of Mining-Induced Vegetation Changes in Ouagadougou, Burkina Faso // Environmental Challenges. 2024. Vol. 17. Art. 101026. DOI: 10.1016/j.envc.2024.101026.

6. Zhukov A. A., Zhukova E. Yu. Kartografirovanie rastitel`nosti otvalov ugol`ny`x razrezov Xakasii po danny`m Sentinel-2 // Rekul`tivaciya narushenny`x zemel`: texnologii, e`ffektivnost` i bioraznoobrazie: sbornik nauchny`x trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2024. S. 100–103. DOI sbornika: 10.31251/conf-2-2024.

7. Syarief A., Bagus M. I., Wilis R. Analysis of Land Exploitation and Reclamation in Coal Mining Land Based on Vegetation Index Using Sentinel-2 Data // Proceedings of ICGEO. 2023. DOI: 10.4108/eai.19-11-2022.2332155.

8. Kolesnikov A. A., Kosarev N. S., Reznik A. V., Nemova N. A. Avtomatizirovanny`j distancionny`j monitoring texnogenno izmenenny`x territorij s ispol`zovaniem metodov mashinnogo obucheniya // Geodeziya i kartografiya. 2025. № 12 (1026). S. 29–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1026-12-29-37.

9. Liu W., Xu Y., Xie H., Zhang H., Guo L., Li J., Zhang C. 30-Year Dynamics of Vegetation Loss in China's Surface Coal Mines: A Comparative Evaluation of CCDC and LandTrendr Algorithms // Sustainability. 2025. Vol. 17. No. 20. Art. 9011. DOI: 10.3390/su17209011.

10. Galchenko Yu. P., Tsygulev K. S., Ozaryan Yu. A., Kozhevnikova T. V., Orlov S. A. Assessment Algorithm for Plant Communities of Natural Biota in Areas of Mine Dust Deposition // Journal of Mining Science. Vol. 61. No. 3. P. 518–524.

11. Zhen X., Yu Z., Shi Y., Zhao Y. Fusing LandTrendr BCI and Machine Learning for Spoil Dump Mapping // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 44060. DOI: 10.1038/s41598-025-32957-0.

12. Sizov O. S. Dinamika zarastaniya suxorojny`x peschany`x kar`erov v severo-tayozhny`x usloviyax Zapadnoj Sibiri za period s 1985 po 2021 gg. // Geograficheskaya sreda i zhivy`e sistemy`. 2025. № 1.

13. Ivanova O. A. / Иванова О. А. Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11. № 2. С. 49–60. DOI: 10.17072/2410-8553-2025-2-49-60.

14. Hui J., Cheng Y. Detecting Disturbance and Recovery in Mining Landscapes: A Novel Time-Series Framework Based on Improved LandTrendr and Machine Learning // Environmental Research. 2026. Vol. 295. Art. 123868. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123868.

15. Wang Y., Zhou J., Shi X., Meng L. Remote Sensing Diagnosis of Vegetation Degradation and Recovery in Mining Disturbed Domain of China's Core Ionic Rare Earth Mining Area from 1982 to 2025 // Geocarto International. 2026. Vol. 41. No. 1. DOI: 10.1080/10106049.2026.2650870.

16. Xu S., Zhou J., Wang K., Giljum S., Maus V., Werner T. T., Tang L., Guo J., Xiao W. Global Surface Mining and Land Reclamation of Time Series from 1985–2022 // Earth System Science Data. 2026. Vol. 18. P. 6293–6320. DOI: 10.5194/essd-18-6293-2026.

17. Wang H., Li J., Zhang R., Lan Y., Zhang J., Chen P., Wang L., Zhang C. Heterogeneous Vegetation Resilience Trajectories Beneath Greening During Open-Pit Mine Reclamation // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 151. Art. 105408. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105408.
18. Wang G., Xiao W., Zhang W., Guo J. Time-Series Monitoring of Vegetation Disturbance and Recovery over Surface Mining Patches in the Yellow River Basin // GeoEnergy Communications. 2026. Vol. 2. Art. 5. DOI: 10.1007/s44421-026-00018-5.
19. Yang Z., Tian W., He T., Ren H., Wang X., Jiang H., Zhao L., Zhao Y., Chen Y. A Global Perspective: Quantifying Disturbance and Reclamation of Surface Coal Mining Through Remote Sensing Innovations // Global Environmental Change. 2026. Vol. 98. Art. 103138. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2026.103138.
20. Yuan Y., Yu Z., Pan Z., Guo J., Fan G., Lü Z., He Y., Zhang C., Tang Y. A Context-Specific Index Accurately Tracks the Decadal Trajectory of Mining Impacts and Ecological Rehabilitation // Environmental and Sustainability Indicators. 2026. Vol. 29. Art. 101117. DOI: 10.1016/j.indic.2026.101117.

Статья поступила в редакцию 23.07.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 23.07.2026; approved after peer review 03.09.2026; accepted for publication 16.10.2026.