

Оптимизация управленческих решений при выборе технологий рекультивации нарушенных земель в угледобывающих регионах Сибири и Якутии

П.В. Трифонов✉, Р.В. Серышев, С.В. Каширин, Г.Б. Пестунова

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

✉ pvtrifonov@fa.ru

Резюме: Открытая добыча угля в Сибири и Якутии формирует техногенные ландшафты площадью свыше 150 тыс. га только в пределах Кузнецкого бассейна и более 5,6 тыс. га в Южно-Якутском угольном районе. Исследование посвящено сравнительной оценке эффективности методов технической и биологической рекультивации нарушенных земель после открытой угледобычи в условиях лесостепной зоны Кузбасса и зоны сплошной многолетней мерзлоты Южной Якутии. Сформулирована гипотеза: при сопоставимых объемах горнотехнического этапа рекультивации эффективность биологического восстановления экосистем в криолитозоне Якутии значительно уступает показателям Кузбасса вследствие лимитирующего влияния многолетнемерзлых пород, экстремально-континентального климата и ограниченного видового состава фитоценозов-рекультивантов. Методологическую основу составили дистанционное зондирование с расчетом нормализованного вегетационного индекса *NDVI*, полевые почвенно-геохимические исследования техноземов на отвалах вскрышных пород, статистический анализ динамики нарушения и восстановления земель за период 2015–2024 гг. по данным государственной статистической отчетности (форма 2-ТП «рекультивация»). Эмпирическая база охватывает 12 угольных разрезов Кузбасса и 3 разреза Южно-Якутского угольного района. Установлено, что коэффициент восстановления экосистем на отвалах Кузбасса составляет 0,12–0,38 при давности рекультивации 10–25 лет, тогда как в Якутии аналогичный показатель не превышает 0,012–0,029. Удельная земельность добычи угля в Кузбассе варьирует от 16 до 30 га/млн т, в Южной Якутии – от 22 до 41 га/млн т. Себестоимость полного цикла лесной рекультивации в Кузбассе оценена в 120–180 тыс. руб./га, в Якутии – 280–450 тыс. руб./га за счет транспортной недоступности и необходимости завоза потенциально-плодородных грунтов. Обоснована необходимость дифференцированного подхода к выбору направления рекультивации с учетом геоэкологических и ландшафтно-климатических условий. Результаты имеют значение для оптимизации природоохранной деятельности горнодобывающих компаний и формирования региональных программ экологической реабилитации территорий.

Ключевые слова: рекультивация нарушенных земель, открытая угледобыча, вскрышные отвалы, Кузнецкий бассейн, Южная Якутия, многолетняя мерзлота, техноземы, *NDVI*

Для цитирования: Трифонов П.В., Серышев Р.В., Каширин С.В., Пестунова Г.Б. Оптимизация управленческих решений при выборе технологий рекультивации нарушенных земель в угледобывающих регионах Сибири и Якутии. *Горная промышленность*. 2026;(3):120–129. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-120-129>

Assessing the efficiency of radar monitoring of pit slope stability in Kuzbass coal mines

P.V. Trifonov ✉, R.V. Seryshev, S.V. Kashirin, G.B. Pestunova

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ pvtrifonov@fa.ru

Abstract: Intensification of surface coal mining in the Kuznetsk Basin when the pit depths reaching 250–320 m aggravates the problem of open-pit slope stability with 12 to 18 deformation events of varying magnitudes being recorded annually. This study assesses the efficiency of ground-based interferometric radar systems (GB-InSAR) in monitoring the geomechanical slope stability of open-pit coal mines in Kuzbass. The study makes a hypothesis that the use of submillimeter-accurate radar monitoring will significantly improve the reliability of slope failure prediction compared to the traditional geodetic methods and will ensure early warning of the destructive events at least 48 hours in advance. The study was conducted using data from three open-pit coal mines of Kuzbassrazrezugol Management Company (Bachatsky, Kedrovsky, and Taldinsky) for the period of 2022–2025. The IBIS ArcSAR and IBIS-Rover radar systems with the measurement precision of ± 0.1 mm and the scanning range of up to 5 km were used. The radar data were verified using GNSS observations. The methodology includes calculating cumulative displacements in the line of sight (LOS), plotting inverse strain rate (INV) graphs, and determining the stability coefficient F_s using the circular

sliding surface method. During the analyzed period, the radar systems recorded 23 cases of abnormal deformation acceleration, 19 of which were confirmed by subsequent destructive events (the detection accuracy of 82.6%). The average lead time for failure prediction using the inverse strain rate method was 67.4 hours with the determination factor of $R^2 = 0.91-0.96$. Integration of the radar monitoring into the geotechnical risk management system reduced the number of incidents related to side failures by 64% over the three years of observation. The paper describes limitations of the method under the extreme atmospheric conditions of Western Siberia, the prospects for implementing neural network forecasting models, and the integration of the Sentinel-1 satellite data for upscaling the monitoring system to a number of open-pit mines in the basin.

Keywords: radar monitoring, pit slope stability, ground-based interferometric radar, inverse strain rate method, Kuzbass open-pit coal mines, rock mass deformations, failure prediction

For citation: Trifonov P.V., Seryshev R.V., Kashirin S.V., Pestunova G.B. Assessing the efficiency of radar monitoring of pit slope stability in Kuzbass coal mines. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):120–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-120-129>

Введение

По данным дистанционного зондирования к середине 2010-х годов накопленная площадь нарушенных земель в западной части центральных районов Кузнецкого бассейна превысила 90 тыс. га по официальным данным, а с учетом территорий косвенного воздействия – более 120 тыс. га [1]. К 2024 г. накопленная площадь нарушенных земель в Кемеровской области достигла 102 тыс. га по официальным данным, а по экспертным оценкам – до 150 тыс. га с учетом территорий косвенного воздействия. В Южно-Якутском угольном районе площадь техногенно нарушенных ландшафтов превышает 5,6 тыс. га, причем коэффициент ревегетации на отвалах разреза «Нерюнгринский» составляет лишь 0,012 – растительный покров формируется на 1,2% площади при полном отсутствии рекультивационных мероприятий [2]. Проблема усугубляется нарастающим дисбалансом между темпами нарушения и восстановления: в начале 2010-х годов на территории Кузбасса ежегодно нарушалось порядка 5–6 тыс. га, а рекультивировалось не более 150–200 га, что составляло менее 3% [3]. Подобная диспропорция формирует устойчивый экологический долг, нарастающий с каждым годом эксплуатации месторождений.

Актуальность сравнительного анализа методов рекультивации в различных климатических зонах определяется существенной неоднородностью природных условий угольных бассейнов России. Кузнецкий бассейн расположен в лесостепной и горно-таежной зонах с суммой активных температур 1600–2000°C и средней мощностью деятельного слоя почвы 1,5–2,5 м, тогда как Южно-Якутский угольный район находится в зоне сплошной многолетней мерзлоты с мощностью до 300–400 м, среднегодовой температурой воздуха от –7 до –8°C и глубиной сезонного протаивания 0,3–4,0 м [4]. Как показано в работе [5], практики устойчивого развития горнодобывающих компаний России в сфере экологической ответственности остаются недостаточно интегрированными в производственные процессы, что проявляется в хроническом отставании темпов рекультивации. Вместе с тем мультиагентные методики планирования вскрышных работ открывают перспективы для минимизации экологических рисков уже на стадии проектирования горных работ [6]. Современная наука о рекультивации оперирует широким спектром подходов – от классических горнотехнических методов до биотехнологий с использованием микоризных ассоциаций и фиторемедиации [7]. Однако большинство разработанных технологий апробировано в условиях умеренного клима-

та, и их прямой перенос на территории криолитозоны невозможен без существенной адаптации. Исследованиями установлено, что загрязнение почвенной среды микропластиком дополнительно снижает потенциал биологической рекультивации, формируя комплексную мультифакторную нагрузку на техноземы [8]. Оценка эффективности природоохранной деятельности в Российской Федерации выявила системные проблемы, включая недостаточность финансирования, нормативные противоречия и отсутствие дифференцированных региональных стандартов [9].

В контексте экономико-пространственного освоения новых месторождений в арктической и субарктической зонах [10] задача разработки адаптированных методик рекультивации приобретает стратегическое значение. Динамика финансирования природоохранной деятельности в странах СНГ демонстрирует рост расходов, однако их структура не обеспечивает приоритетного направления средств на восстановление нарушенных горнодобывающих территорий [11].

Цель настоящего исследования – количественная сравнительная оценка эффективности методов рекультивации нарушенных земель на угольных разрезах Кузнецкого бассейна и Южно-Якутского угольного района с верификацией гипотезы о детерминирующем влиянии криолитогенных условий на результативность биологического восстановления экосистем.

Задачи: 1) определить удельные показатели землеемкости и темпы рекультивации в сравниваемых регионах; 2) оценить динамику NDVI на рекультивированных отвалах различного возраста; 3) сопоставить агрохимические параметры техноземов; 4) рассчитать экономическую эффективность различных направлений рекультивации.

Материалы и методы

Исследование выполнено с применением комплексной методологии, интегрирующей дистанционные, полевые и аналитические методы. Пространственный анализ проведен по мультиспектральным снимкам Landsat 8/9 OLI и Sentinel-2 MSI за период 2015–2024 гг. с пространственным разрешением 10–30 м. Для каждого объекта выполнен расчет нормализованного дифференциального вегетационного индекса NDVI по стандартной формуле:

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

где *NIR* – отражение в ближнем инфракрасном канале; *RED* – отражение в красном канале.

Коэффициент экологического восстановления $K_{восст}$ рассчитан по соотношению:

$$K_{восст} = \frac{S_{рек}}{S_{нар}}$$

где $S_{рек}$ – площадь рекультивированных земель с $NDVI > 0,3$; $S_{нар}$ – общая площадь нарушенных территорий объекта.

Интегральный индекс эффективности рекультивации ИИЭР определен как:

$$ИИЭР = \frac{NDVI_{рек}}{NDVI_{фон}} \times K_{восст} \times \frac{1}{T_{восст}}, \quad (1)$$

где $NDVI_{рек}$ – средний $NDVI$ рекультивированного участка; $NDVI_{фон}$ – средний $NDVI$ фоновой (ненарушенной) территории; $T_{восст}$ – срок восстановления в годах.

Объекты исследования: 12 разрезов Кузнецкого бассейна (Бачатский, Кедровский, Краснобродский, Талдинский, Моховский, Распадский и др.) и 3 разреза Южно-Якутского района (Нерюнгринский, Денисовский, Эльгинский). Общая обследованная площадь нарушенных земель – 48 200 га в Кузбассе и 6840 га в Якутии. Временной охват полевых данных: 2018–2024 гг. Полевые работы включали отбор почвенных проб на рекультивированных отвалах различного возраста (5, 10, 15, 20, 25 лет) методом конверта на глубину 0–20 и 20–40 см. Определение агрохимических параметров выполнено стандартными методами: рН потенциометрически (ГОСТ 26423–85), содержание гумуса по Тюрину (ГОСТ 26213–91), подвижный фосфор и калий по Чирикову (ГОСТ 26204–91), гранулометрический состав пипеточным методом (ГОСТ 12536–2014). Всего проанализировано 384 пробы (256 в Кузбассе, 128 в Якутии).

Статистическая обработка выполнена в среде R 4.3.2 с применением дисперсионного анализа (ANOVA), критерия Тьюки для множественных сравнений (при $p < 0,05$), корреляционного анализа Спирмена. Нормальность распределений проверена тестом Шапиро–Уилка. Экономические данные о затратах на рекультивацию получены из

проектной документации предприятий и государственной отчетности. Данные о площадях нарушенных и рекультивированных земель извлечены из форм 2-ТП (рекультивация) за 2015–2024 гг. по Кемеровской области и Республике Саха (Якутия). Репрезентативность выборки обеспечена охватом более 60% площади нарушенных земель в обоих регионах.

Результаты

Анализ динамики нарушения и рекультивации земель за десятилетний период выявил устойчивую диспропорцию между темпами техногенной деградации и восстановления ландшафтов в обоих регионах, однако масштаб этого разрыва существенно различается. В Кемеровской области ежегодный прирост нарушенных земель в 2015–2024 гг. варьировал от 4200 до 7900 га/год при объемах рекультивации от 107 до 620 га/год (табл. 1). Среднегодовой коэффициент рекультивации (отношение рекультивированной площади к нарушенной за тот же период) составил $0,021 \pm 0,008$. В Южно-Якутском районе аналогичный показатель оказался существенно ниже – $0,009 \pm 0,004$, что объясняется не только климатическими ограничениями, но и организационно-экономическими факторами: высокой стоимостью логистики, отсутствием местных источников плодородного грунта и ограниченным вегетационным периодом (75–90 дней при среднесуточной температуре выше $+10^\circ\text{C}$ против 110–130 дней в Кузбассе).

Средневзвешенный $K_{рек}$ за весь период в Кузбассе составил 0,061, в Якутии – 0,030 (без учета аномального 2019 г. – 0,019). Накопленный дефицит рекультивации (разность между суммарной нарушенной и суммарной восстановленной площадью за период) достиг 58214 га в Кузбассе и 4389 га в Якутии. Удельная землеемкость добычи угля различается: в Кузбассе она составляет 16–30 га/млн т добытого угля, в Южной Якутии – 22–41 га/млн т, что объясняется большей мощностью вскрыши при относительно меньшей мощности угольных пластов и необходимостью формирования внешних отвалов в условиях вечной

Таблица 1
Динамика нарушения и рекультивации земель на угольных разрезах Кузбасса и Южной Якутии в 2015–2024 гг.

Table 1
Dynamics of land disturbance and reclamation at coal strip mines in Kuzbass and Southern Yakutia, 2015–2024

Год	Кузбасс			Якутия		
	нарушено, га	рекультивировано, га	$K_{рек}$	нарушено, га	рекультивировано, га	$K_{рек}$
2015	5 840	310	0,053	412	4,2	0,010
2016	6 120	153	0,025	438	3,8	0,009
2017	5 960	227	0,038	465	5,1	0,011
2018	6 800	107	0,016	510	3,0	0,006
2019	7 100	587	0,083	486	64,0	0,132
2020	5 430	340	0,063	395	12,4	0,031
2021	5 680	420	0,074	440	8,7	0,020
2022	6 340	510	0,080	478	10,2	0,021
2023	7 900	620	0,078	520	14,8	0,028
2024	4 800	480	0,100	380	11,6	0,031

Примечание. $K_{рек}$ – коэффициент рекультивации, равный отношению площади рекультивированных земель к площади нарушенных земель в текущем году. Данные по Кузбассу: форма 2-ТП (рекультивация) Департамента природных ресурсов и экологии Кемеровской области; данные по Якутии: форма 2-ТП Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия). Выброс 2019 г. по Якутии обусловлен масштабной рекультивацией на разрезе «Нерюнгринский» (ХК «Якутуголь»).

Note. $K_{рек}$ – the rehabilitation coefficient, defined as the ratio of the area of reclaimed land to the area of the disturbed land in the current year. Data for Kuzbass: Form 2-TP (Reclamation) of the Department of Natural Resources and Ecology of the Kemerovo Region; data for Yakutia: Form 2-TP of the Ministry of Ecology, Natural Resource Use and Forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). The 2019 spike in Yakutia is due to large-scale reclamation at the Neryungrinsky coal strip mine (Yakutugol Holding Company).

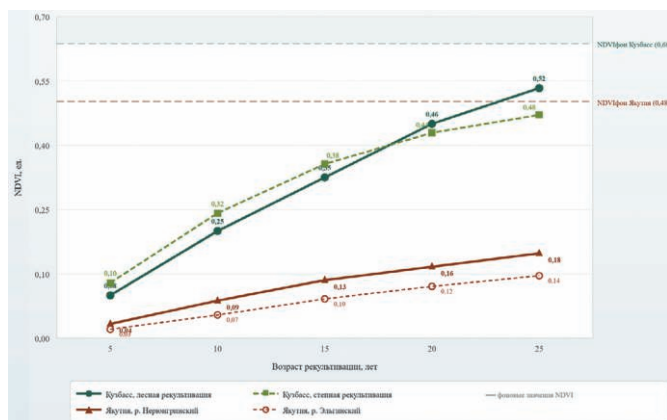


Рис. 1
Динамика нормализованного вегетационного индекса *NDVI* на рекультивированных отвалах вскрышных пород угольных разрезов Кузбасса и Южной Якутии (хронопоследовательность 5–25 лет, данные Sentinel-2 MSI, 2015–2024 гг.)

Fig. 1
Changes in the Normalized Difference Vegetation Index *NDVI* at the reclaimed overburden dumps at coal strip mines in Kuzbass and Southern Yakutia (5–25-year time series, Sentinel-2 MSI data, 2015–2024)

мерзлоты [12]. Структура нарушенных земель также неоднородна: в Кузбассе карьерные выемки составляют 33,9%, внешние отвалы – 42,5%, внутренние отвалы – 13,0%, прочие нарушения (промплощадки, дороги, хвостохранилища) – 10,6%. В Кузбассе преобладание поперечных и поперечно-продольных систем разработки позволяет формировать значительные объемы внутренних отвалов уже на стадии эксплуатации карьерного поля, что снижает удельную землеемкость и облегчает последующую revegetацию нарушенных поверхностей [13]. В Южной Якутии, напротив, доля внешних отвалов достигает 58,3%, что обусловлено преобладанием продольных систем разработки и невозможностью формирования внутренних отвалов до полной отработки карьерного поля в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Анализ данных дистанционного зондирования позволил количественно оценить динамику восстановления

растительного покрова на рекультивированных отвалах (рис. 1). Средние значения *NDVI* на отвалах различного возраста демонстрируют статистически значимые различия между регионами при всех временных срезах ($p < 0,001$ по критерию Манна–Уитни). На свежих (до 5 лет) отвалах *NDVI* в обоих регионах минимален: 0,05–0,08 в Кузбассе и 0,02–0,04 в Якутии. Через 10 лет после рекультивации *NDVI* возрастает до 0,18–0,25 в Кузбассе (при лесной рекультивации с посадкой сосны обыкновенной и березы повислой) и до 0,07–0,11 в Якутии (посадка лиственницы даурской). К 20–25 годам разрыв увеличивается: 0,35–0,52 в Кузбассе против 0,12–0,18 в Якутии. Фоновые значения *NDVI* для ненарушенных территорий составляют 0,62–0,71 (лесостепь Кузбасса) и 0,41–0,53 (средняя тайга Южной Якутии).

Расчет коэффициента экологического восстановления $K_{\text{восст}}$ и интегрального индекса эффективности рекультивации ИИЭР позволил провести сквозное межрегиональное сравнение (табл. 2). Результаты подтверждают гипотезу о детерминирующем влиянии криолитогенных условий: ИИЭР для Якутии в 4,8–6,2 раза ниже, чем для Кузбасса, при всех сроках наблюдения.

Разница в скорости прироста *NDVI* (0,015–0,020 ед/год в Кузбассе против 0,004–0,006 ед/год в Якутии) детерминирована комплексом факторов. Во-первых, длительность вегетационного периода: 110–130 сут в Кузбассе против 75–90 сут в Южной Якутии. Во-вторых, сумма активных температур: 1600–2000°C против 800–1100°C. В-третьих, глубина деятельного слоя: на ненарушенных территориях Якутии она составляет 1,5–3,0 м, однако на отвалах вскрышных пород, лишенных естественной растительной «шубы», протаивание достигает 4,0–6,0 м, что провоцирует термокарстовые деформации и разрушение рекультивированных поверхностей [14].

Агрохимический анализ техноземов (рис. 2) выявил критические различия в параметрах субстрата. В Кузбассе вскрышные породы представлены аргиллитами, алевролитами и песчаниками пермско-каменноугольного возраста со щелочной реакцией среды (pH 7,2–8,1). Через 15–20 лет биологической рекультивации содержание гумуса в верхнем горизонте (0–20 см) техноземов Кузбасса достигает 2,4–3,8%, подвижного фосфора – 42–68 мг/кг,

Таблица 2
Сравнительные показатели эффективности рекультивации отвалов вскрышных пород

Table 2
Comparative performance indicators for reclamation of the overburden dumps

Показатель	Кузбасс		Якутия	
	лесостепь	горная тайга	Нерюнгринский	Эльгинский
<i>NDVI</i> (10 лет)	0,25 ± 0,04	0,18 ± 0,03	0,09 ± 0,02	0,07 ± 0,02
<i>NDVI</i> (20 лет)	0,46 ± 0,06	0,35 ± 0,05	0,16 ± 0,03	0,12 ± 0,03
<i>NDVI</i> фон	0,68 ± 0,05	0,62 ± 0,04	0,48 ± 0,06	0,41 ± 0,05
$K_{\text{восст}}$ (10 лет)	0,38 ± 0,07	0,24 ± 0,05	0,029 ± 0,008	0,018 ± 0,006
$K_{\text{восст}}$ (20 лет)	0,61 ± 0,09	0,47 ± 0,08	0,068 ± 0,015	0,042 ± 0,012
ИИЭР (10 лет)	0,014 ± 0,003	0,007 ± 0,002	0,0005 ± 0,0002	0,0003 ± 0,0001
ИИЭР (20 лет)	0,021 ± 0,004	0,013 ± 0,003	0,0011 ± 0,0003	0,0006 ± 0,0002
Скорость прироста <i>NDVI</i> , ед/год	0,020 ± 0,003	0,015 ± 0,002	0,006 ± 0,001	0,004 ± 0,001
Прогнозный срок достижения <i>NDVI</i> фон, лет	22–28	30–38	65–80	85–110

Примечание. Значения приведены как среднее ± стандартное отклонение. *NDVI* рассчитан по летним композитам (июнь–август) снимков Sentinel-2 MSI; $K_{\text{восст}}$ – по доле площади с *NDVI* > 0,3 от общей нарушенной площади; ИИЭР – по формуле (1); прогнозный срок – экстраполяция линейного тренда прироста *NDVI* до фонового уровня.

Note. Values are given as the mean ± standard deviation. *NDVI* is calculated based on the Summer composites (June–August) of the Sentinel-2 MSI images; $K_{\text{восст}}$ – as the proportion of the area with the *NDVI* > 0.3 of the total disturbed area; ИИЭР (the Integrated Index of Reclamation Efficiency) – using formula (1); the forecast period – is extrapolation of the linear trend of the *NDVI* increase against the baseline level.

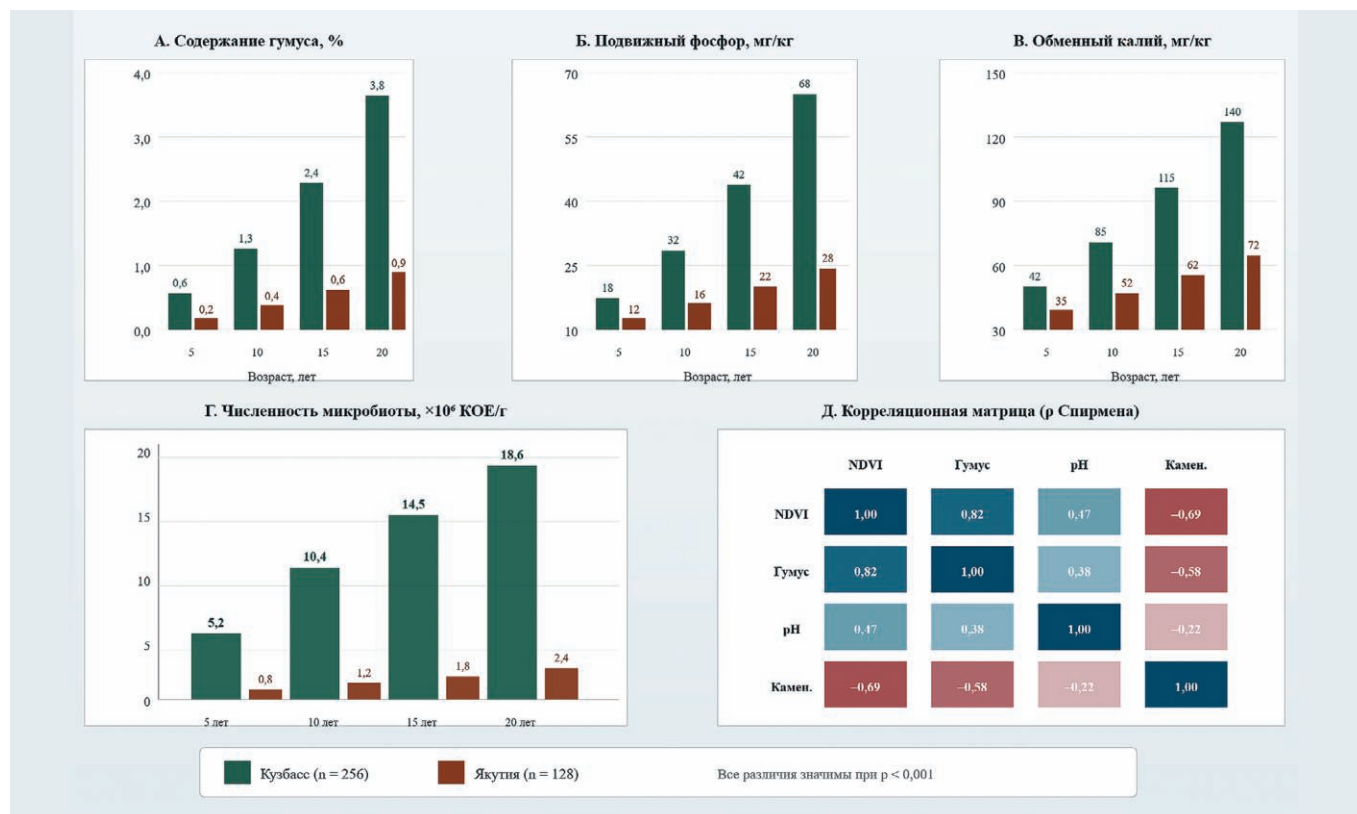


Рис. 2
Сравнительные агрохимические характеристики техноземов на отвалах угольных разрезов Кузбасса и Южной Якутии (слой 0–20 см): содержание гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в зависимости от возраста рекультивации

Fig. 2
Comparative agrochemical characteristics of technosols at coal mine overburden dumps in Kuzbass and Southern Yakutia (0–20 cm layer): the humus, labile phosphorus and exchange potassium content depending on the age of reclamation

обменного калия – 85–140 мг/кг. В Якутии аналогичные отвалы характеризуются pH 6,8–7,4, содержанием гумуса 0,4–0,9% (в 4–6 раз ниже), подвижного фосфора – 12–28 мг/кг, обменного калия – 35–72 мг/кг. Замедленная гумификация в криолитозоне обусловлена ингибированием микробиологической активности: численность микроорганизмов в техноземах Якутии составляет 0,8–2,4 × 10⁶ КОЕ/г, тогда как в Кузбассе – 5,2–18,6 × 10⁶ КОЕ/г (различия значимы при $p < 0,001$).

Корреляционный анализ Спирмена установил сильную положительную связь между NDVI и содержанием гумуса ($\rho = 0,82$; $p < 0,001$), умеренную – между NDVI и pH ($\rho = 0,47$; $p < 0,01$), а также отрицательную корреляцию NDVI с долей каменной фракции (>10 мм) в субстрате ($\rho = -0,69$; $p < 0,001$). Доля каменной фракции в отвалах Кузбасса составляет 35–55%, в Якутии – 45–70%, что создает дополнительный барьер для развития корневых систем. Годовая аккумуляция органического вещества в техноземах

Таблица 3
Экономические параметры рекультивации нарушенных земель

Table 3
Economic parameters of the disturbed land reclamation

Показатель	Кузбасс		Якутия	
	лесная	степная	лесная (лиственница)	самозарастание
Технический этап, тыс. руб/га	80–120	40–60	150–280	50–80
Биологический этап, тыс. руб/га	120–180	4–15	280–450	0
Полный цикл, тыс. руб/га	200–300	44–75	430–730	50–80
Срок восстановления до $K_{восст} > 0,5$	18–25 лет	5–8 лет	60–80 лет (прогноз)	> 100 лет (прогноз)
NDVI через 10 лет	0,25 ± 0,04	0,32 ± 0,05	0,09 ± 0,02	0,04 ± 0,01
Удельная стоимость единицы NDVI, тыс. руб/га на 0,01 NDVI	10–12	1,4–2,3	48–81	–
Секвестрация углерода, т CO ₂ /га/год	3,8–6,2	1,2–2,0	0,8–1,6	0,1–0,3

Примечание. Экономические данные приведены в ценах 2024 г. Стоимость рекультивации включает проектирование, материалы, работы и агротехнический уход (3 года). Секвестрация CO₂ рассчитана для участков 10-летнего возраста. Удельная стоимость единицы NDVI – показатель экономической эффективности метода, определяемый как отношение полной стоимости рекультивации к приросту NDVI за 10 лет. Данные по самозарастанию в Якутии приведены по результатам мониторинга участков разреза «Нерюнгринский», где рекультивационные работы не проводились.

Note. The economic data are presented in 2024 prices. The cost of land reclamation includes designing, materials, works and tending (3 years). The CO₂ sequestration is calculated for the 10-year-old plots. The unit cost per NDVI unit is an indicator of the method's efficiency, defined as the ratio of the total cost of reclamation to the increase in the NDVI over 10 years. Data on the self-organized vegetation in Yakutia are based on the monitoring results from the Nerungrinsky coal strip mine area, where no reclamation work was carried out.

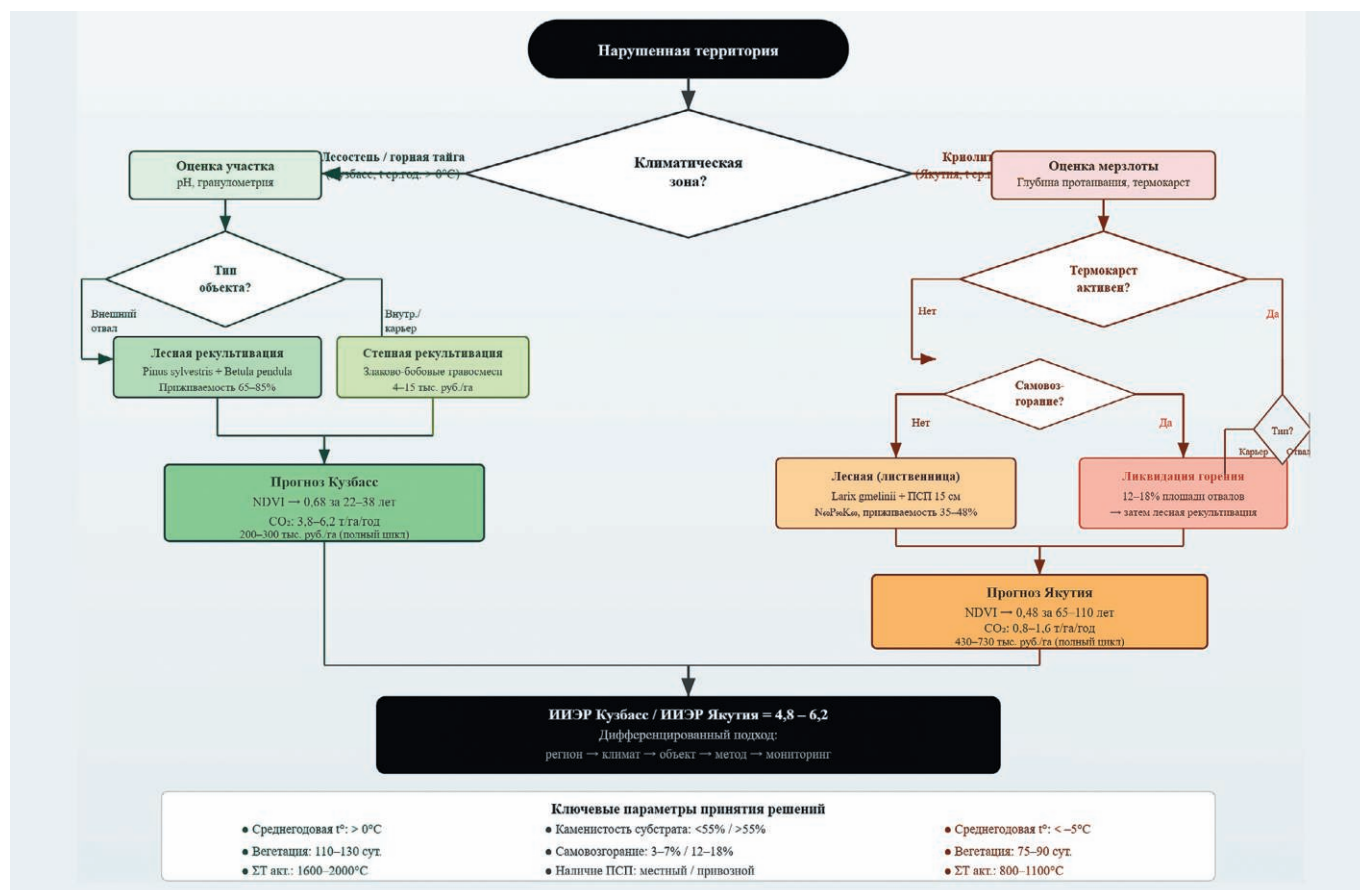


Рис. 3
Алгоритмическая схема выбора оптимального метода рекультивации нарушенных земель в зависимости от ландшафтно-климатических и геокриологических условий

Fig. 3
An algorithmic diagram for selecting the optimal reclamation method for disturbed lands depending on the topographical, climatic and geocryological conditions

составляет 0,8–1,45 т/га в Кузбассе и 0,28–0,52 т/га в Якутии [15].

Экономический анализ выявил существенные межрегиональные различия в стоимости рекультивации (табл. 3). Стоимость технического этапа (планировка, выполаживание откосов, нанесение плодородного слоя) в Кузбассе составляет 80–120 тыс. руб/га, в Якутии – 150–280 тыс. руб/га (превышение в 1,9–2,3 раза). Основные факторы удорожания в Якутии: необходимость завоза потенциально-плодородных грунтов из удаленных источников (до 80–150 км), короткий период проведения земляных работ (май–сентябрь), повышенный расход ГСМ при отрицательных температурах, ограниченная дорожная инфраструктура. Дополнительным фактором, формирующим структуру затрат на природоохранные мероприятия в горнодобывающих регионах, выступает необходимость комплексного геоэкологического мониторинга, включая контроль состояния водных ресурсов на прилегающих территориях [16]. Стоимость биологического этапа лесной рекультивации в Кузбассе составляет 120–180 тыс. руб/га, в Якутии – 280–450 тыс. руб/га (табл. 3). При этом степная (травяная) рекультивация в Кузбассе обходится существенно дешевле – 4–15 тыс. руб/га, однако не обеспечивает полноценного восстановления лесных экосистем и углеродо-депонирующей функции ландшафта.

Расчет удельной стоимости единицы прироста *NDVI* показал, что в Якутии каждая 0,01 единицы *NDVI* при лесной рекультивации обходится в 48–81 тыс. руб/га – в 4–8 раз дороже, чем в Кузбассе (10–12 тыс. руб/га). Наиболее

экономически эффективной в Кузбассе является степная рекультивация (1,4–2,3 тыс. руб/га на 0,01 *NDVI*), однако ее экологическая ценность ниже вследствие меньшей секвестрации углерода (1,2–2,0 т $\text{CO}_2/\text{га}/\text{год}$ против 3,8–6,2 т $\text{CO}_2/\text{га}/\text{год}$ при лесной рекультивации). Полная стоимость ликвидации накопленного экологического долга, рассчитанная как произведение удельных затрат на лесную рекультивацию (табл. 3) и суммарного дефицита рекультивированных площадей за 2015–2024 гг. (см. табл. 1), составляет 8,7–17,5 млрд руб. для Кузбасса (58 214 га) и 1,9–3,2 млрд руб. для Якутии (4389 га). Полученные оценки согласуются с общей отрицательной тенденцией нарастания экологического долга угольной отрасли и необходимостью реализации долгосрочных программ восстановления деградированных земель, требующих системного подхода на уровне отраслевого и регионального планирования [17].

Анализ видового состава фитоценозов на рекультивированных отвалах (рис. 3) показал, что в Кузбассе успешно используются поликомпонентные посадки: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), береза повислая (*Betula pendula*), облепиха крушиновидная (*Hipporhae rhamnoides*), а также злаково-бобовые травосмеси (костер безостый, овсяница луговая, клевер белый). Приживаемость саженцев через 3 года составляет 65–78% на внешних отвалах и 72–85% на внутренних. В Якутии палитра видов-рекультивантов существенно ограничена: лиственница даурская (*Larix gmelinii*) демонстрирует приживаемость 35–48%, тополь душистый (*Populus suaveolens*) – 20–35%, ивы (*Salix spp.*) – 40–55% на прибортовых участках с достаточным

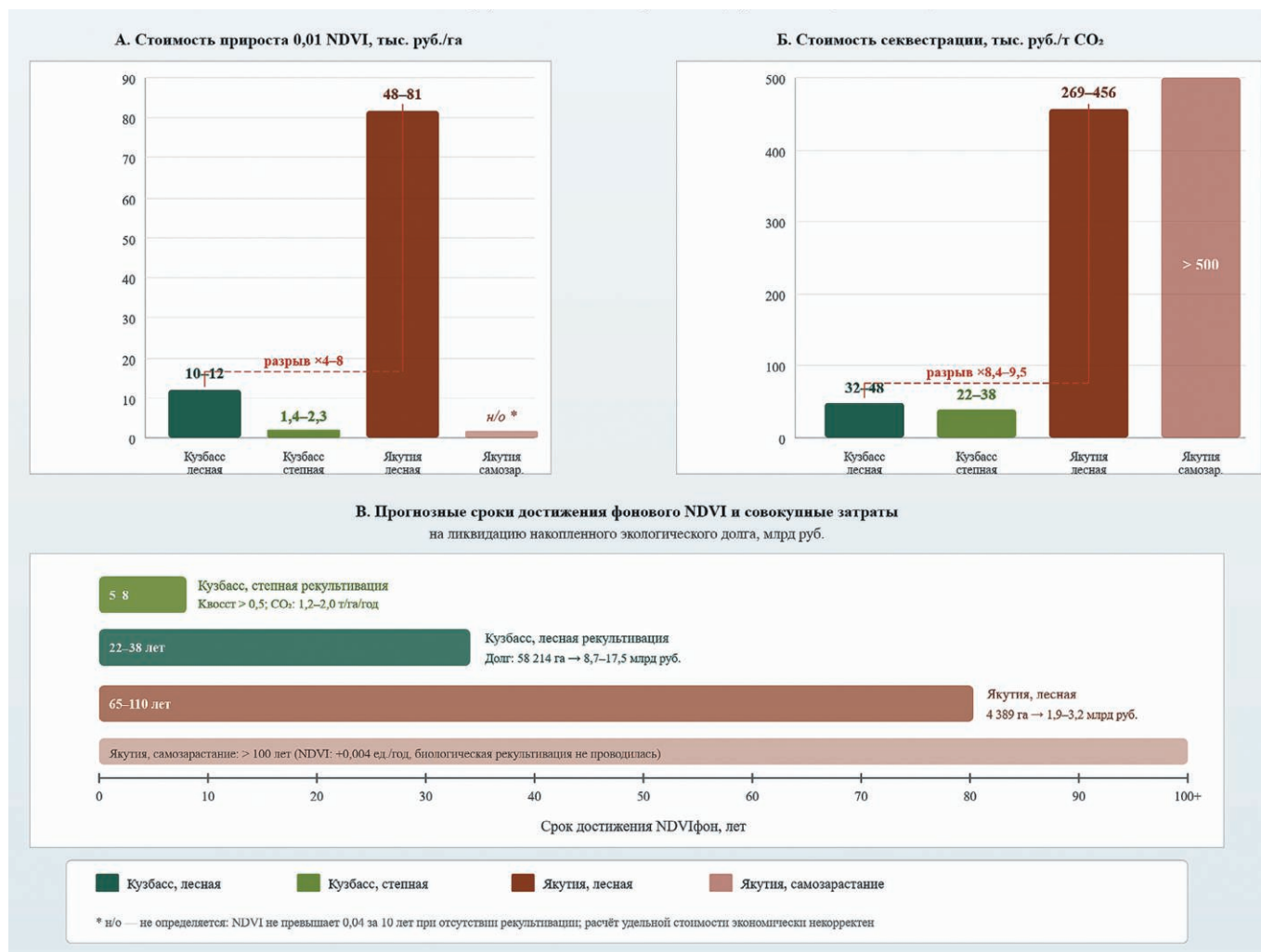


Рис. 4
Удельная экономическая эффективность методов рекультивации: стоимость единицы прироста NDVI и секвестрации CO₂ в Кузбассе и Якутии (горизонт 10 лет, цены 2024 г.)

Fig. 4
Specific cost efficiency of the reclamation methods: cost per unit of the NDVI increase and CO₂ sequestration in Kuzbass and Yakutia (10-year period, 2024 prices)

увлажнением. Из травянистых видов наиболее устойчивы пырей ползучий (*Elytrigia repens*) и мятлик луговой (*Poa pratensis*), однако их проективное покрытие на отвалах не превышает 15–25% через 10 лет. Посев семян с применением азотно-фосфорно-калийных удобрений (N60P90K60) повышает проективное покрытие до 30–40%, но эффект затухает через 3–4 года без повторного внесения. Объективная оценка устойчивости достигнутого эффекта требует применения дистанционных методов мониторинга с использованием интегральных индексов экологического состояния, позволяющих отслеживать многолетнюю динамику восстановления открытых угольных разработок [18].

Критическим фактором в Якутии является самовозгорание отвалов, содержащих угольные включения. Температура поверхности горящих участков достигает 80–150°C, что полностью исключает возможность биологической рекультивации до ликвидации очагов горения. По данным термического мониторинга до 12–18% площади отвалов Нерюнгринского разреза подвержены термоактивным процессам, тогда как в Кузбассе эта доля составляет 3–7%. Наличие термоактивных зон принципиально ограничивает применимость стандартных технологий «зелёной» рекультивации выработанных пространств и отвалов, раз-

рабатываемых для горнодобывающих регионов, и требует предварительной ликвидации очагов самовозгорания перед началом биологического этапа [19]. Сравнительный анализ методов рекультивации нарушенных земель после открытой добычи угля в Сибири и Якутии требует учёта углеродного баланса восстанавливаемых территорий, поскольку выбор между лесной и болотной рекультивацией определяет потенциал долгосрочной секвестрации CO₂ нарушенными ландшафтами. Отвалы вскрышных пород и днища отработанных разрезов в зоне многолетней мерзлоты обладают различной пригодностью к формированию лесных либо заболоченных экосистем. Согласно исследованию [20] сравнительная оценка эффективности секвестрации углерода лесными и болотными экосистемами в условиях климатических изменений позволяет обосновать оптимальное направление биологической рекультивации для конкретных геоэкологических и ландшафтных условий отработанных угольных разрезов.

Интегральная оценка по совокупности критериев позволяет ранжировать методы рекультивации в порядке убывания общей эффективности (рис. 3). Для Кузбасса оптимальным является комбинированный подход: лесная рекультивация на внешних отвалах с использованием поликомпонентных посадок и травосеяние на внутренних

отвалах и выложенных бортах карьеров. Для Якутии рекомендуется дифференцированная стратегия: лесная рекультивация лиственницей на стабильных (не подверженных термокарсту) участках внешних отвалов с обязательным нанесением плодородного слоя мощностью не менее 15 см и внесением органико-минеральных удобрений; самозарастание с мониторингом на участках с активным термокарстом; обводнение и создание техногенных водоемов в карьерных выемках как альтернативное направление водохозяйственной рекультивации [21].

Сводный анализ экономической эффективности методов рекультивации в пересчете на единицу экологического результата (рис. 4) демонстрирует, что при всех сценариях удельные затраты в Якутии кратно превышают кузбасские аналоги, а разрыв усиливается при переходе от степной к лесной рекультивации.

Отношение совокупных затрат к секвестрированному CO_2 за 10-летний горизонт составляет 32–48 тыс. руб./т CO_2 для лесной рекультивации в Кузбассе и 269–456 тыс. руб./т CO_2 для аналогичного метода в Якутии – разрыв в 8,4–9,5 раза, что ставит под сомнение экономическую целесообразность классической лесной рекультивации в криолитозоне без привлечения механизмов углеродного финансирования.

Заключение

Выполненное исследование количественно подтвердило гипотезу о детерминирующем влиянии криолитогенных условий на эффективность рекультивации нарушенных земель после открытой угледобычи. Интегральный индекс эффективности рекультивации ИИЭР в Южной Якутии в 4,8–6,2 раза ниже, чем в Кузбассе, при всех сроках наблюдения. Коэффициент восстановления экосистем (Квосст) на 20-летних отвалах составляет 0,47–0,61 в Кузбассе против 0,042–0,068 в Якутии – разрыв почти на порядок.

Скорость формирования растительного покрова, оцененная по приросту NDVI, составляет 0,015–0,020 ед/год в лесостепной зоне Кузбасса и 0,004–0,006 ед/год в криолитозоне Якутии. Экстраполяция линейного тренда дает прогнозный срок достижения фоновых значений NDVI: 22–38 лет для Кузбасса и 65–110 лет для Якутии. Эти расчеты объясняют, почему фактический растительный покров на отвалах Нерюнгринского разреза, существующих более 40 лет, занимает лишь 1,2% площади при отсутствии целенаправленных рекультивационных мероприятий. Агрохимические параметры техноземов подтверждают глубину проблемы: содержание гумуса в 20-летних техноземах Якутии (0,4–0,9%) в 4–6 раз ниже кузбасских аналогов (2,4–3,8%). Численность почвенной микробиоты различается в

6–8 раз (0,8–2,4 × 10⁶ КОЕ/г против 5,2–18,6 × 10⁶ КОЕ/г). Годовая аккумуляция органического вещества – 0,28–0,52 т/га против 0,8–1,45 т/га. Комплексным ингибирующим фактором выступает не только температурный режим, но и каменность субстрата (45–70% в Якутии), термокарстовая нестабильность поверхности отвалов и самовозгорание угольных включений (12–18% площади).

Экономический анализ показал, что полный цикл лесной рекультивации в Якутии (430–730 тыс. руб/га) в 2,1–2,4 раза дороже кузбасского аналога (200–300 тыс. руб/га). Удельная стоимость единицы экологического результата (прироста NDVI на 0,01) в Якутии выше в 4–8 раз. Совокупная стоимость ликвидации накопленного экологического долга оценивается в 8,7–17,5 млрд руб. для Кузбасса и 1,9–3,2 млрд руб. для Якутии.

Результаты расширяют представления о пределах применимости стандартных технологий рекультивации, разработанных для условий умеренного климата. Прямой перенос методик лесной рекультивации Кузбасса на территорию криолитозоны неэффективен: приживаемость саженцев лиственницы (35–48%) значительно уступает приживаемости сосны и березы в Кузбассе (65–85%), а проективное покрытие травостоя остается ниже 25% даже через 10 лет. Необходима разработка принципиально новых подходов, учитывающих специфику криогенных ландшафтов: создание термоизоляционных покрытий для стабилизации мерзлоты под отвалами, применение местных экотипов растений, прошедших естественный отбор в условиях экстремального климата, формирование мозаичных ландшафтов с чередованием облесенных участков и техногенных водоемов. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дифференциации нормативных требований к рекультивации по климатическим зонам. Единый подход, закрепленный в Постановлении Правительства РФ №800 и ГОСТ Р 57446–2017, не учитывает кратного увеличения сроков и затрат на восстановление экосистем в криолитозоне. Секвестрация углерода на рекультивированных территориях – 3,8–6,2 т CO_2 /га/год в Кузбассе и 0,8–1,6 т CO_2 /га/год в Якутии – демонстрирует существенный потенциал восстановленных ландшафтов в контексте углеродной нейтральности горнодобывающей отрасли, однако реализация этого потенциала требует многократного увеличения темпов и объемов рекультивации. При текущем среднегодовом коэффициенте рекультивации (0,061 для Кузбасса, 0,019 для Якутии) ликвидация накопленного дефицита займет десятилетия, что диктует необходимость пересмотра экономических механизмов стимулирования природоохранной деятельности угольных компаний.

Список литературы / References

1. Зеньков И.В., Ижмулкина Е.А., Маглинец Ю.А., Юронен Ю.П., Вокин В.Н., Юрковская Г.И., Логинова Е.В. Результаты исследования формирования экосистемы на угольных разрезах в западной части центральных районов Кузбасса с использованием ресурсов ДЗЗ. *Экология и промышленность России*. 2018;22(2):40–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-2-40-45>
Zen'kov I.V., Izhmulkina E.A., Maglinets Yu.A., Yuronen Yu.P., Vokin V.N., Yurkovskaya G.I., Loginova E.V. Results of the study of ecosystem formation in coal mines in the western part of the central regions of Kuzbass using remote sensing resources. *Ecology and Industry of Russia*. 2018;22(2):40–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-2-40-45>
2. Zenkov I.V., Zayats V.V., Nefedov B.N., Nefedov N.B. Earth remote sensing in ecological evaluation of disturbed lands in South Yakutia. *Eurasian Mining*. 2017;(2):49–52. <https://doi.org/10.17580/em.2017.02.12>

3. Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижский С.П., Доможакова Е.А., Лойко С.В. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири. *Почвоведение*. 2015;(1):106–117. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010153>
Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Kulizhskii S.P., Loiko S.V., Domozhakova E.A. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(1):95–105. <https://doi.org/10.1134/S1064229315010159>
4. Брагина П.С., Цибарт А.С., Завадская М.П., Шарапова А.В. Почвы на отвалах вскрышных пород в лесостепной и горно-таежной зонах Кузбасса. *Почвоведение*. 2014;(7):878–889. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14050037>
Bragina P.S., Tsi bart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest-steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(7):723–733. <https://doi.org/10.1134/S1064229314050032>
5. Цхададзе Н.В., Кудряшов А.Л., Кучковская Н.В., Фролова В.Б., Лазарев М.П. Исследование влияния внедрения практик устойчивого развития на экологическую и социально-экономическую ответственность горнодобывающих компаний России. *Горная промышленность*. 2024;(5S):130–136. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-130-136>
Tskhadadze N.V., Kudryashov A.L., Kuchkovskaya N.V., Frolova V.B., Lazarev M.P. Studying the effects of implementing sustainable development practices on the environmental, social and economic responsibility of mining companies in Russia. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):130–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-130-136>
6. Красюкова Н.Л., Зубец А.Ж., Еремин С.Г., Зубенко А.В., Лаффах А.М. Мультиагентные методики планирования вскрышных работ и минимизации экологических рисков при добыче полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2025;(1):170–176. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-170-176>
Krasnyukova N.L., Zubets A.Z., Eremin S.G., Zubenko A.V., Laffakh A.M. Multi-agent techniques for planning stripping operations and minimizing environmental risks in mining operations. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):170–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-170-176>
7. Ahirwal J., Kumar A., Pietrzykowski M., Maiti S.K. Reclamation of coal mine spoil and its effect on Technosol quality and carbon sequestration: a case study from India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(28):27992–28003. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2789-1>
8. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Королева Л.П. Загрязнение почвенной среды микропластиком, факторы влияния и экологические риски. *Экология и промышленность России*. 2023;27(5):58–63. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-58-63>
Burak L.Ch., Ermoshina T.V., Koroleva L.P. Soil environment pollution with microplastic, influence factors and environmental risks. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(5):58–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-58-63>
9. Пивоварова О.В., Конищев Е.С. Оценка эффективности природоохранной деятельности в Российской Федерации: проблемы и перспективы. *Экология и промышленность России*. 2023;27(12):56–61. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-12-56-61>
Pivovarova O.V., Konishchev E.S. Evaluation of the effectiveness of environmental activities in the Russian Federation: problems and prospects. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(12):56–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-12-56-61>
10. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Экономико-пространственные задачи освоения новых месторождений углеводородных ресурсов в Арктической зоне Российской Федерации. *Экономика. Налоги. Право*. 2024;17(2):95–105. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2024-17-2-95-105>
Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. Economic and spatial objectives of the development of new hydrocarbon deposits in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Economics, Taxes & Law*. 2024;17(2):95–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2024-17-2-95-105>
11. Строев П.В., Дудник А.И. Современное состояние и динамика финансирования природоохранной деятельности в странах СНГ. *Экология и промышленность России*. 2023;27(9):66–71. Режим доступа: <https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/2471> (дата обращения: 27.02.2026).
Stroev P.V., Dudnik A.I. The Current state and dynamics of environmental financing in the CIS countries. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(9):66–71. (In Russ.) Available at: <https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/2471> (accessed: 27.02.2026).
12. Галанина Т.В., Баумгартэн М.И., Кузнецов В.П. Технологии биологической рекультивации нарушенных земель с использованием дифференцированных методов восстановления плодородного почвенного покрова. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2011;(3):57–59. Режим доступа: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=1966> (дата обращения: 27.02.2026).
Galanina T.V., Baumgarten M.I., Kuznetsov V.P. Technologies of a biological recultivation of disturbed lands with use of differentiated methods for restoration of fertile soil cover. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2011;(3):57–59. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=1966> (accessed: 27.02.2026).
13. Копытов А., Куприянов О., Манakov Ю., Куприянов Coal mining in Kuzbass and new technologies for revegetation of dumps. *E3S Web of Conferences*. 2021;315:02016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131502016>
14. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V., Kirillin A., Séjourné A., Wen Z. An assessment of the possibility of restoration and protection of territories disturbed by thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Land*. 2023;12(1):197. <https://doi.org/10.3390/land12010197>
15. Shugalei L.S. Organic substances in the artificial forest ecosystems created on overburden dumps of open-cut coal mines in Middle Siberia. *Biology Bulletin*. 2010;37(4):423–431. <https://doi.org/10.1134/S1062359010040138>

16. Счастливец Е.Л., Юкина Н.И., Харлапенков И.Е. Информационно-аналитическая система геоэкологического мониторинга водных ресурсов угледобывающего региона. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2016;(2):157–164. Режим доступа: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=3063> (дата обращения: 27.02.2026).
Schastlivtsev E.L., Yukina N.I., Kharlapenkov I.E. Information-analytical system of geoecological monitoring of water resources in mining region. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016;(2):157–164. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=3063> (accessed: 27.02.2026).
17. Прудникова А.А. Зеленое финансирование для достижения целей устойчивого развития: современное состояние и перспективы. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(3):16–23. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-3-16-23>
Prudnikova A.A. Green financing for achieving sustainable development goals: current state and prospects. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(3):16–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-3-16-23>
18. Wang S., Ma C., Ma Y., Li T. Monitoring and evaluation of ecological restoration in open-pit coal mine using remote sensing data based on a OM-RSEI model. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2025;39(8):600–622. <https://doi.org/10.1080/17480930.2025.2458012>
19. Hou D., Xu M., Wang M., Li X., Li S., Wang J., Cao M. Research on ecological restoration and green reclamation technology of goaf in phosphorus mines. *Frontiers in Environmental Science*. 2024;12:1343185. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1343185>
20. Нестеренко Ю.Н. Эффективность углеродных ферм для секвестрации CO₂: сравнительный анализ лесных и болотных экосистем в условиях изменения климата. *Вопросы экологии*. 2023;13(1):65–78. <https://doi.org/10.25726/a4918-4658-0041-1>
Nesterenko Yu.N. Efficiency of carbon farms for CO₂ sequestration: a comparative analysis of forest and swamp ecosystems in the context of climate change. *Voprosy Ecologii*. 2023;13(1):65–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.25726/a4918-4658-0041-1>
21. Жариков В.П. Геолого-экологическое обоснование рекультивации гидроотвалов открытой разработки угля в Кузбассе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(2):27–32. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2014/02/27-32_ZHarikov.pdf (дата обращения: 27.02.2026).
Zharikov V.P. Geological-and-ecological basis for reclamation of slurry dump areas at open pit coal mines in Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(2):27–32. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2014/02/27-32_ZHarikov.pdf (accessed: 27.02.2026).

Информация об авторах

Трифонов Павел Владимирович – кандидат экономических наук, доцент кафедры операционного и отраслевого менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2228-5441>; e-mail: pvtrifonov@fa.ru
Серышев Роман Викторович – кандидат экономических наук, доцент кафедры стратегического и инновационного развития, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7241-1405>; e-mail: rvseryshev@fa.ru
Каширин Сергей Владимирович – кандидат экономических наук, доцент кафедры операционного и отраслевого менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9401-2867>; e-mail: svkashirin@fa.ru
Пестунова Галина Борисовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры операционного и отраслевого менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8772-536X>; e-mail: gbpestunova@fa.ru

Information about the authors

Pavel V. Trifonov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Operational and Industry Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2228-5441>; e-mail: pvtrifonov@fa.ru
Roman V. Seryshev – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Strategic and Innovative Development, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7241-1405>; e-mail: rvseryshev@fa.ru
Sergey V. Kashirin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Operational and Industry Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9401-2867>; e-mail: svkashirin@fa.ru
Galina B. Pestunova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Operational and Industry Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8772-536X>; e-mail: gbpestunova@fa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.02.2026
 Поступила после рецензирования: 22.04.2026
 Принята к публикации: 24.04.2026

Article info

Received: 13.02.2026
 Revised: 22.04.2026
 Accepted: 24.04.2026