

УДК 502.131:631.618:622.882

DOI: <https://doi.org/10.18799/26584956/2026/3/2170>

Шифр специальности ВАК: 5.2.3



Пространственно-временной анализ деградации и рекультивации земель в России

Н.В. Яковенко[✉], И.В. Комов, О.С. Суховерхов

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Российская Федерация, г. Воронеж*

[✉]n.v.yakovenko71@gmail.com

Аннотация. В последние годы устойчивое развитие территорий сталкивается с такими негативными факторами, как истощение природных ресурсов, накопленный экологический ущерб и пространственная неравномерность техногенного воздействия. Для изменения сложившейся ситуации необходима переоценка масштабов деградации земель и эффективности применяемых восстановительных практик. **Цель:** анализ динамики нарушенных земель в Российской Федерации за 2020–2023 гг., выявление региональных диспропорций в структуре нарушений и эффективности рекультивации, а также оценка потенциала перехода к «зелёным» практикам землепользования на основе изучения передового отечественного и зарубежного опыта. **Методы:** комплекс экономико-статистических методов, включающий оценку межрегиональной асимметрии, корреляционный анализ, расчёт интегрального коэффициента эффективности рекультивации, прогнозирование и картографическую визуализацию. Эмпирическую базу составили официальные данные формы № 2-ТП (рекультивация) по 85 субъектам РФ. **Результаты:** установлено, что разработка месторождений полезных ископаемых является абсолютно доминирующим фактором нарушения земель, а её вклад в общий объём нарушенных площадей неуклонно увеличивается. Выявлена крайне высокая пространственная неравномерность накопленных нарушений: основная их часть сконцентрирована в пяти ресурсодобывающих регионах. Показано, что существующие объёмы рекультивации систематически не компенсируют текущие темпы нарушений, особенно в горнодобывающих центрах. Корреляционный анализ подтвердил определяющую роль горнодобывающего сектора в генерации нарушений и статистическую незначимость связи рекультивации с лесозаготовками. Прогнозные модели свидетельствуют о дальнейшем росте накопленных нарушений при сохранении сложившихся тенденций. **Выводы:** ключевым драйвером деградации земель выступает горнодобывающая деятельность, а существующие механизмы рекультивации не обеспечивают восстановления в масштабах, сопоставимых с темпами разрушения. Для изменения ситуации необходимы пересмотр нормативных требований, внедрение обязательного финансового гарантирования для недропользователей и разработка дифференцированных федеральных программ ликвидации накопленного экологического ущерба. Полученные результаты служат доказательной базой для совершенствования государственной политики в сфере рекультивации и перехода к «зелёным» практикам землепользования.

Ключевые слова: нарушенные земли, рекультивация, пространственная дифференциация, прогнозирование, устойчивое развитие

Конфликт интересов: отсутствует.

Вклад авторов: Яковенко Н.В. – руководство исследованием, разработка концепции исследования, написание текста; Комов И.В. – сбор и статистическая обработка данных, обобщение результатов исследования; Суховерхов О.С. – обзор литературы, редактирование текста.

Использование средств ИИ: авторы заявляют о том, что при написании данной статьи не применялись средства генеративного искусственного интеллекта.

Для цитирования: Яковенко Н.В., Комов И.В., Суховерхов О.С. Пространственно-временной анализ деградации и рекультивации земель в России. *Векторы благополучия: экономика и социум*, 2026, Т. 54, № 3, С. 115–132. DOI: <https://doi.org/10.18799/26584956/2026/3/2170>

UDC 502.131:631.618:622.882

DOI: <https://doi.org/10.18799/26584956/2026/3/2170>

Spatio-temporal analysis of land degradation and reclamation in Russia

N.V. Yakovenko[✉], I.V. Komov, O.S. Sukhoverkhov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

✉ n.v.yakovenko71@gmail.com

Abstract. In recent years, sustainable territorial development has been constrained by such adverse factors as depletion of natural resources, accumulated environmental damage, and spatial heterogeneity of anthropogenic impact. To reverse this trend, a reassessment of the extent of land degradation and the effectiveness of applied restoration practices is required. The aim of this study is to analyze the dynamics of disturbed lands in the Russian Federation for 2020–2023, identify regional disparities in the structure of disturbances and the effectiveness of reclamation, as well as assess the potential for transitioning to "green" land-use practices based on an examination of advanced domestic and international experience. **Methods.** Set of economic-statistical methods including an assessment of interregional asymmetry, correlation analysis, calculation of an integral coefficient of reclamation efficiency, forecasting, and cartographic visualization. The empirical basis was formed by official data from Form no. 2-TP (reclamation) for 85 constituent entities of the Russian Federation. **Results.** It was established that the absolutely dominant factor in land disturbance is the development of mineral deposits, the share of which is steadily increasing. An extremely high spatial unevenness of accumulated disturbances was identified: the majority of these are concentrated in five resource-extracting regions. It is shown that the current volumes of reclamation systematically fail to compensate for the ongoing rates of disturbance, particularly in mining centers. Correlation analysis confirmed the determining role of the mining sector in generating disturbances and the statistical insignificance of the relationship between reclamation and logging activities. Predictive models indicate a further increase in accumulated disturbances if current trends persist. **Conclusions.** The key driver of land degradation is mining activity, while existing reclamation mechanisms do not ensure restoration on a scale commensurate with the rates of destruction. To change the situation, it is necessary to revise regulatory requirements, introduce mandatory financial guarantees for subsoil users, and develop differentiated federal programs for the elimination of accumulated environmental damage. The obtained results serve as an evidence base for improving state policy in the field of reclamation and the transition to "green" land-use practices.

Keywords: disturbed lands, reclamation, spatial differentiation, forecasting, sustainable development

Conflict of interest: none.

Authors' contribution: N.V. Yakovenko – supervision, conceptualization, analysis, writing; I.V. Komov – data collection, statistical processing, forecasting, visualization; O.S. Sukhoverkhov – literature review, tables and references formatting, editing.

Use of AI: the authors declare no use of the AI in the paper.

For citation: Yakovenko N.V., Komov I.V., Sukhoverkhov O.S. Spatio-temporal analysis of land degradation and reclamation in Russia. *Journal of Wellbeing Technologies*, 2026, vol. 54, no. 3, pp. 105–132. DOI: <https://doi.org/10.18799/26584956/2026/3/2170>

Введение

Современная модель экономического развития, ориентированная на экстенсивное природопользование, неизбежно приводит к деградации земельных ресурсов. Согласно официальным статистическим данным, ежегодно в России фиксируется нарушение десятков тысяч гектаров земель. Основной вклад в этот процесс обусловлен добычей полезных ископаемых, проведе-

нием строительных работ и лесозаготовительной деятельностью. При этом, по мнению ряда исследователей [1], несмотря на обширный практический опыт в этой сфере, остаются нерешёнными вопросы методологии оценки эффективности восстановительных работ. Парадоксальность ситуации усугубляется тем, что большинство научных работ, посвящённых данной проблеме, сосредоточено либо на технологических аспектах рекультивации [2, 3], либо на оценке накопленного экологического ущерба в отдельных наиболее проблемных регионах [4–6]. Институциональные и правовые барьеры рекультивации анализируются в трудах И.П. Кожокаря [7] и С.Н. Сорокина с соавторами [1], однако эти работы не дают количественных оценок эффективности восстановительных мероприятий в масштабах страны. Комплексного анализа динамики нарушенных земель, их пространственной дифференциации и эффективности рекультивационных мероприятий в масштабах всей страны с использованием единой методологической базы до настоящего времени недостаточно. Особую актуальность этому исследованию придаёт переход к «зелёной» экономике, который требует не только снижения текущих выбросов, но и ликвидации накопленного экологического ущерба, что, в свою очередь, предполагает разработку и внедрение научно обоснованных подходов к восстановлению нарушенных земель.

Данное исследование выполнено в контексте реализации Цели устойчивого развития ООН № 15 («Защита и восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное лесопользование, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биологического разнообразия») [8], а также в русле приоритетов, закреплённых в Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года [9] и в национальном проекте «Экологическое благополучие» (федеральный проект «Сохранение лесов») [10].

При этом важно разграничивать ключевые понятия, используемые в официальной статистике и нормативно-правовых актах. Согласно Правилам проведения рекультивации и консервации земель (утверждены Постановлением Правительства РФ от 10.07.2018 № 800) [11], «деградация земель» определяется как ухудшение качества земель в результате негативного воздействия хозяйственной и (или) иной деятельности, природных и (или) антропогенных факторов; «нарушенные земли» – это земли, деградация которых привела к невозможности их использования в соответствии с целевым назначением и разрешённым использованием. Требования статьи 13 Земельного кодекса Российской Федерации [12] обязывают лица, деятельность которых привела к ухудшению качества земель (в том числе в результате их загрязнения, нарушения почвенного слоя), обеспечить их рекультивацию. Рекультивация земель представляет собой комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и народно-хозяйственной ценности нарушенных земель, а также на улучшение условий окружающей среды (ГОСТ 17.5.1.01-83 [13], ГОСТ Р 59070-2020 [14]). Таким образом, в настоящем исследовании под нарушенными землями понимаются территории, утратившие свою хозяйственную ценность вследствие техногенного воздействия, а под рекультивацией – мероприятия по их восстановлению, эффективность которых оценивается через соотношение площадей восстановленных и вновь нарушенных земель.

Цель настоящей работы – анализ динамики нарушенных земель в Российской Федерации за 2020–2023 гг., выявление региональных диспропорций в структуре нарушений и эффективности рекультивации, а также оценка потенциала перехода к «зелёным» практикам землепользования на основе изучения передового отечественного и зарубежного опыта.

Научный обзор

Проблематика деградации земель и их восстановления носит междисциплинарный характер и остаётся в центре внимания мирового научного сообщества. Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), в мире деградировано более 33 % почвенных ресурсов, а ежегодные потери продуктивных земель составляют около

12 млн га [15]. В России, по данным Росстата, накопленная площадь нарушенных земель превышает 1,7 млн га (2023 г.), что сопоставимо с территорией некоторых европейских государств [16]. При этом, несмотря на значительный объём научных публикаций по отдельным аспектам рекультивации, системных исследований, охватывающих всю территорию страны на единой статистической основе, явно недостаточно.

В отечественной литературе преобладают работы, сфокусированные на технологических аспектах восстановления [2, 3], изучении физико-химических свойств почв техногенных ландшафтов [17, 18] и локальных оценках накопленного ущерба в отдельных регионах – Арктической зоне [4], Кузбассе [5], угледобывающих районах Дальнего Востока [6]. Институциональные и правовые барьеры рекультивации анализируются в трудах И.П. Кожокаря [7] и С.Н. Сорокина с соавторами [1], однако эти работы не дают количественных оценок эффективности восстановительных мероприятий в масштабах страны.

Зарубежные исследования акцентируют внимание на механизмах финансового обеспечения рекультивации. В США действует система обязательного бондирования, которая согласно закону H.R. 7941 (Bond Improvement and Reclamation Assurance Act, 2024) требует от недропользователей создания финансовых гарантий на полную стоимость восстановления нарушенных участков [19]. В ЮАР отраслевые руководства предписывают проведение рекультивации по научно обоснованным стандартам с обязательным долгосрочным мониторингом [20–22]. Однако даже в этих странах отмечаются хронические проблемы с завершением восстановительных работ и недостаточной эффективностью [23]. В Европейском Союзе действуют директивы, обязывающие государства-члены вести реестры нарушенных земель и планировать их восстановление, но единой методологии оценки эффективности не существует.

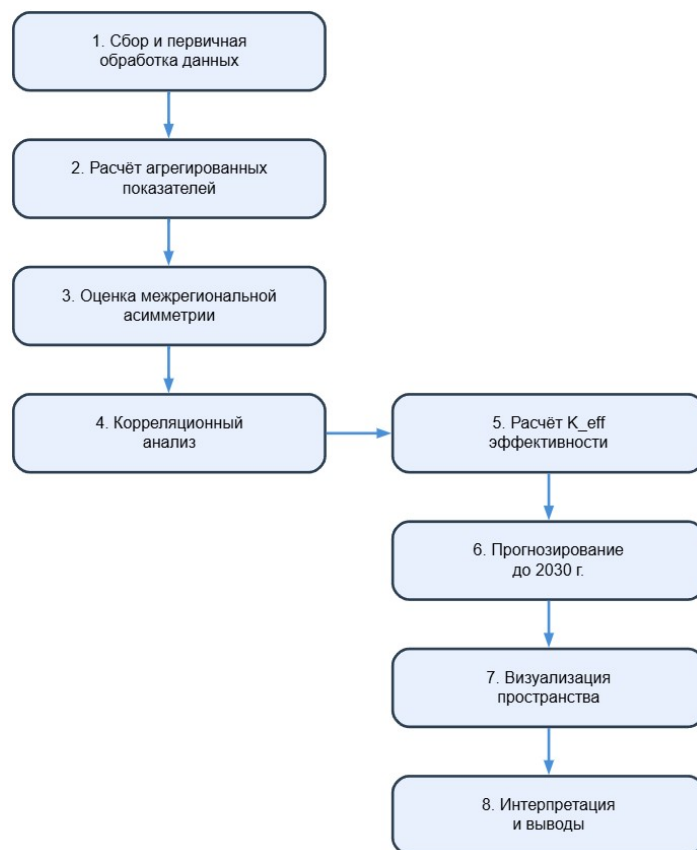
Важно подчеркнуть, что большинство упомянутых исследований, как российских, так и зарубежных, ограничиваются либо отдельными регионами, либо узкими технологическими аспектами, либо статичными оценками. Комплексный пространственно-временной анализ, который одновременно охватывал бы динамику нарушений, их отраслевую структуру, пространственную дифференциацию и эффективность рекультивации в разрезе всех субъектов Российской Федерации за последние годы, в доступной литературе не обнаружен. Отсутствуют также прогнозные оценки накопления нарушенных земель, построенные на основе официальной статистики с использованием экономико-статистических методов.

Таким образом, настоящее исследование восполняет указанный пробел, предлагая единый методологический подход к анализу данных формы № 2-ТП (рекультивация) за 2020–2023 гг. и формируя доказательную базу для корректировки государственной политики в сфере землепользования и перехода к «зелёным» практикам.

Материалы и методы

Информационную базу исследования составили официальные статистические данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат), содержащиеся в форме федерального статистического наблюдения № 2-ТП (рекультивация) «Сведения о рекультивации земель, снятии и использовании плодородного слоя почвы» за 2020–2023 гг. [16]. Выбор временного интервала обусловлен доступностью полных годовых отчётов по всем субъектам Российской Федерации (85 регионов, за исключением новых территорий) на момент проведения исследования. Для каждого субъекта были отобраны следующие показатели: площадь земель, нарушенных в течение отчётного года ($S_{i,tnew}$); накопленная площадь нарушенных земель на конец отчётного года ($S_{i,tacc}$); площадь рекультивированных земель в отчётном году ($S_{i,trec}$); доли нарушений, вызванных разработкой месторождений полезных ископаемых, строительными и лесозаготовительными работами ($di,tmining$, $di,tconst$, $di,tlogging$).

Анализ проводился по алгоритму, представленному на рис. 1.



Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма анализа динамики, структуры и эффективности рекультивации нарушенных земель в Российской Федерации

Fig. 1. Flowchart of the algorithm for analysing the dynamics, structure and efficiency of disturbed land reclamation in the Russian Federation

Первый этап – оценка общей динамики и структуры нарушений. Путём прямого суммирования данных по всем регионам были рассчитаны агрегированные показатели по Российской Федерации в целом. Определены абсолютные и относительные величины нарушений по каждому виду деятельности, а также их изменение за четырёхлетний период.

Второй этап посвящён оценке межрегиональной асимметрии в распределении накопленных нарушенных земель. Для этого применялись два взаимодополняющих показателя: коэффициент вариации CV и индекс Джини G . Первый даёт обобщённую меру относительного разброса и позволяет сопоставлять разнородные данные:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100 \%, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где X_i – значение показателя в i -м регионе, $n = 85$ (число субъектов РФ). Индекс Джини, чувствительный к дифференциации в области малых значений, вычислялся по формуле

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |X_i - X_j|}{2n^2 \bar{X}}.$$

Индекс находится в интервале от 0 (абсолютное равенство) до 1 (абсолютное неравенство). Оба показателя рассчитаны по данным за 2023 г. Теоретические основы заимствованы из работ [24, 25].

Третий этап – выявление статистических связей между ключевыми индикаторами с помощью корреляционного анализа Пирсона по выборке из 85 регионов. Рассчитывались парные коэффициенты r_{XY} между площадью новых нарушений, площадью рекультивации, долей горных работ и долей лесозаготовок:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

Статистическая значимость оценена с помощью t -критерия Стьюдента [26]:

$$t_{\text{расч}} = r_{XY} \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{XY}^2}}.$$

Нулевая гипотеза об отсутствии линейной корреляции отвергается при $|t_{\text{расч}}| > t_{\text{крит}}(n-2, \alpha)$, где $\alpha = 0,05$ или $0,01$.

Четвёртый этап – оценка эффективности рекультивационных мероприятий через интегральный коэффициент:

$$K_{\text{eff}} = \frac{S_{\text{rec}}}{S_{\text{new}}},$$

где S_{rec} – площадь рекультивированных земель; S_{new} – площадь вновь нарушенных земель за тот же период.

При $K_{\text{eff}} > 1$ темпы восстановления превышают темпы новых нарушений (положительная динамика), при $K_{\text{eff}} < 1$ наблюдается накопление нереккультивированных площадей.

Пятый этап – прогнозирование накопленной площади нарушенных земель до 2030 г. на основе двух альтернативных моделей: линейной и экспоненциальной. Линейная модель предполагает постоянный абсолютный прирост:

$$\hat{S}(t) = a + bt,$$

где t – временной индекс ($t = 1$ для 2020 г., $t = 1$ для 2021 г. и т. д.).

Параметры a и b оценены методом наименьших квадратов (МНК) [27]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})(S_i - \bar{S})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}, \quad a = \bar{S} - b\bar{t},$$

где $N = 4$ – число наблюдённых лет.

Экспоненциальная модель учитывает возможное ускорение деградации:

$$S(t) = \alpha e^{\beta t}$$

или в линеаризованной форме

$$\ln S(t) = \ln \alpha + \beta t.$$

Параметры также определены МНК после логарифмирования зависимой переменной. Качество моделей оценивалось по коэффициенту детерминации:

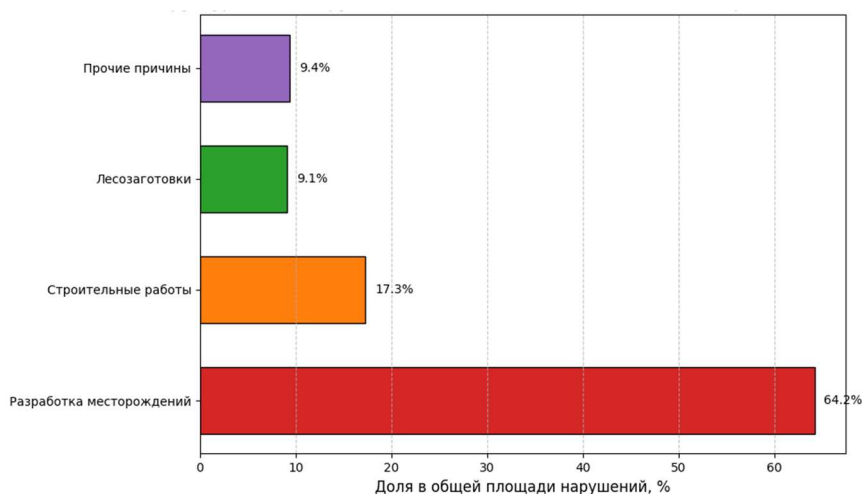
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \hat{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}.$$

Шестой этап – визуализация пространственного распределения нарушенных земель. Для каждого субъекта РФ рассчитана плотность нарушенных земель (га на 1000 км² территории), что нивелирует влияние различий в площади регионов. На основе этих данных построена картограмма в проекции WGS 84 (EPSG:4326), классификация выполнена методом естественных интервалов [28].

Все расчёты производились в среде Python 3.12 с использованием библиотек pandas, numpy, scipy, matplotlib и geopandas.

Результаты

Переход к анализу фактических данных осуществляется на основе обработанных массивов формы № 2-ТП (рекультивация) за 2020–2023 гг. Логика изложения результатов выстроена от общего к частному: сначала характеризуются общие масштабы и динамика нарушенных земель в РФ, затем детально анализируется структура нарушений по видам хозяйственной деятельности, после чего рассматриваются пространственные диспропорции и эффективность рекультивации. Завершают раздел корреляционный анализ и прогноз до 2030 г. Агрегированные за 2020–2023 гг. данные о причинах нарушения земель позволяют выделить доминирующие техногенные факторы (рис. 2).



Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Рис. 2. Структура вновь нарушенных земель по видам деятельности (среднее за 2020–2023 гг.)
Fig. 2. Structure of newly disturbed lands by type of activity (average for 2020–2023)

За четыре наблюдаемых года разработка месторождений полезных ископаемых обеспечила 64,2 % от всей площади вновь нарушенных земель. Вторым по значимости видом деятельности стали строительные работы – 17,3 %, третьим – лесозаготовительные работы – 9,1 %. Остальные причины (изыскательские работы, размещение промышленных и бытовых отходов, утечки при транзите нефти и газа, мелиоративные работы) суммарно составляют 9,4 %. Доля горных работ в общей площади нарушений устойчиво росла: с 61 % в 2020 г. до 67 % в 2023 г. (предварительная оценка). Анализ в разрезе субъектов РФ показывает, что в Ханты-Мансийском АО на долю разработки месторождений приходится 98 % всех наруше-

ний, в Ямало-Ненецком АО – 96 %, в Кемеровской области – 91 %, в Иркутской области – 85 %. Напротив, в регионах с преобладанием лесного сектора (Республика Коми, Архангельская область, Красноярский край) доля лесозаготовок достигает 30–50 %.

Динамика по годам (табл. 1) демонстрирует, что абсолютные площади нарушений при разработке месторождений выросли с 101 180 га в 2020 г. до 229 983 га в 2023 г. (рост в 2,27 раза). Строительные работы увеличили свой вклад с 25 277 до 37 800 га (рост в 1,5 раза), а лесозаготовки – с 11 744 до 21 000 га (рост в 1,8 раза).

Таблица 1. Динамика площадей нарушений по основным причинам (тыс. га)
Table 1. Dynamics of disturbance areas by main causes (thousand ha)

Год Year	Разработка месторождений Development of deposits	Строительные работы Construction work	Лесозаготовки Logging
2020	101,2	25,3	11,7
2021	118,3	29,1	13,1
2022	182,5	35,4	16,3
2023	151,8	37,8	21,0

Источник: составлено авторами/ Source: compiled by the authors.

Пространственное распределение нарушенных земель характеризуется следующими показателями: коэффициент вариации накопленных нарушений на 2023 г. составил 312 %, индекс Джини – 0,84. Пять регионов аккумулируют 38,6 % всех нарушенных земель РФ (табл. 2).

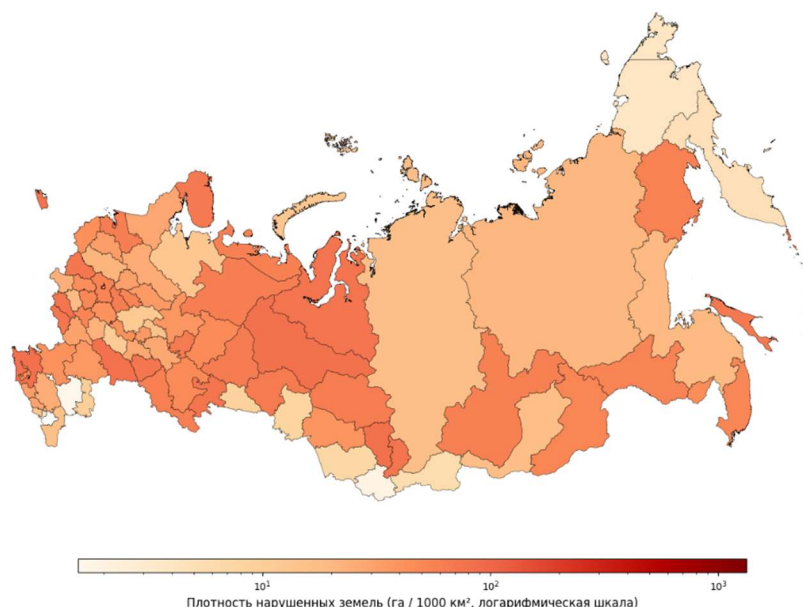
Таблица 2. Субъекты Российской Федерации – лидеры по площади накопленных нарушенных земель (2023 г.)

Table 2. Constituent entities of the Russian Federation – leaders in accumulated disturbed land area (2023)

Субъект РФ Subject of the Russian Federation	Площадь нарушенных земель, тыс. га Area of disturbed lands, thousand hectares	Доля площади нарушенных земель региона от общероссийской, % Regional share of disturbed land area, %
Ханты-Мансийский АО (Югра) Khanty-Mansi Autonomous Okrug (Yugra)	392,3	18,5
Ямало-Ненецкий АО Yamalo-Nenets Autonomous Okrug	173,2	8,2
Кемеровская область Kemerovo region	94,3	4,4
Иркутская область Irkutsk region	84,7	4,0
Республика Саха (Якутия) Republic of Sakha (Yakutia)	74,6	3,5
Итого по пяти регионам-лидерам Sum of five regions	819,1	38,6
Красноярский край Krasnoyarsk Krai	50,8	2,4
Республика Коми Komi Republic	49,7	2,3
Амурская область Amur region	35,3	1,7
Забайкальский край Transbaikal Territory	35,2	1,7
Московская область Moscow region	4,0	0,2

Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Картограмма плотности нарушенных земель (рис. 3) показывает, что максимальные значения плотности (свыше 500 га/1000 км²) зафиксированы в Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком АО, Кемеровской области, Ленинградской и Московской областях. Минимальные значения (менее 10 га/1000 км²) – в республиках Северного Кавказа, северных и дальневосточных территориях.



Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Рис. 3. Плотность нарушенных земель по субъектам Российской Федерации (2023 г.), га/1000 км²
Fig. 3. Density of disturbed lands by constituent entities of the Russian Federation (2023), ha/1000 км²

Значения $K_{\text{eff}} = S_{\text{rec}}/S_{\text{new}}$ за 2023 г. варьируются в широком диапазоне: от 0,03 (Чукотский АО) до 3,20 (Республика Северная Осетия – Алания). Среднее по стране значение составило 0,75, что указывает на общее отставание темпов восстановления от темпов нового нарушения. В регионах с наибольшими абсолютными объемами ежегодного нарушения земель показатели эффективности заметно ниже среднего: Ханты-Мансийский АО – 0,24; Ямало-Ненецкий АО – 0,19; Кемеровская область – 0,28; Иркутская область – 0,21.

Исключением является Северная Осетия – Алания, где $K_{\text{eff}} = 3,20$ – единственный регион с устойчивым превышением восстановления над нарушением.

Корреляционный анализ (Пирсон, $n = 85$, 2023 г.) позволил выявить следующие статистически значимые связи (рис. 4):

- между площадью новых нарушений и долей горных работ очень сильная прямая корреляция – $r = 0,96$ ($p < 0,01$);
- между площадью новых нарушений и площадью рекультивации сильная положительная связь – $r = 0,84$ ($p < 0,01$);
- между рекультивацией и долей горных работ заметная прямая зависимость – $r = 0,71$ ($p < 0,01$);
- доля лесозаготовок отрицательно коррелирует с площадью новых нарушений ($r = -0,45$, $p < 0,05$) и с долей горных работ ($r = -0,58$, $p < 0,01$);
- связь между долей лесозаготовок и рекультивацией статистически незначима ($r = -0,22$, $p > 0,05$).

Таким образом, основным драйвером новых нарушений выступает горнопромышленная деятельность, а рекультивация в значительной степени привязана именно к этому виду воз-

действия. Лесозаготовки, напротив, не сопровождаются сопоставимыми объёмами восстановительных работ и вносят меньший вклад в общую динамику нарушений.

Таблица 3. Коэффициент эффективности рекультивации по отдельным регионам (2023 г.)
Table 3. Reclamation efficiency coefficient by selected regions (2023)

Регион/Region	S_{new} , га	S_{rec} , га	K_{eff}
Ханты-Мансийский АО/Khanty-Mansi Autonomous Okrug	30 506	15 986	0,24
Ямало-Ненецкий АО/Yamalo-Nenets Autonomous Okrug	13 909	4 383	0,19
Кемеровская область/Kemerovo region	5365	1085	0,28
Иркутская область/Irkutsk region	7085	2698	0,21
Московская область/Moscow region	653	422	0,65
Республика Северная Осетия/Republic of North Ossetia	31	54	3,20

Источник: рассчитано и составлено авторами/Calculated and compiled by the author.

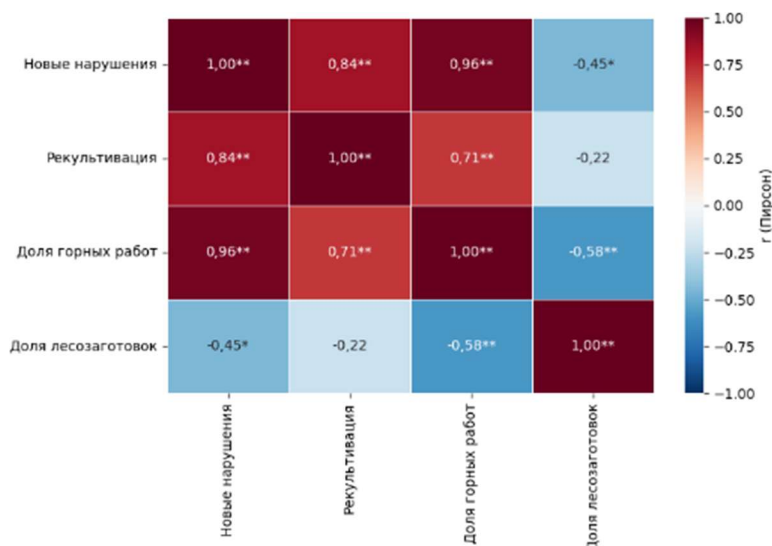
На диаграмме рассеяния (рис. 5) точки, соответствующие Ханты-Мансийскому АО, Ямало-Ненецкому АО и Кемеровской области, располагаются ниже линии регрессии.

Прогнозирование накопленной площади нарушенных земель выполнялось по двум альтернативным моделям (линейной и экспоненциальной). По результатам аппроксимации данных за 2020–2023 гг. линейный тренд показал высокую объясняющую способность и описывается уравнением

$$\hat{S}_{\text{acc}}(t) = 1169,5 + 320,1 \cdot (t - 2020),$$

где t – календарный год.

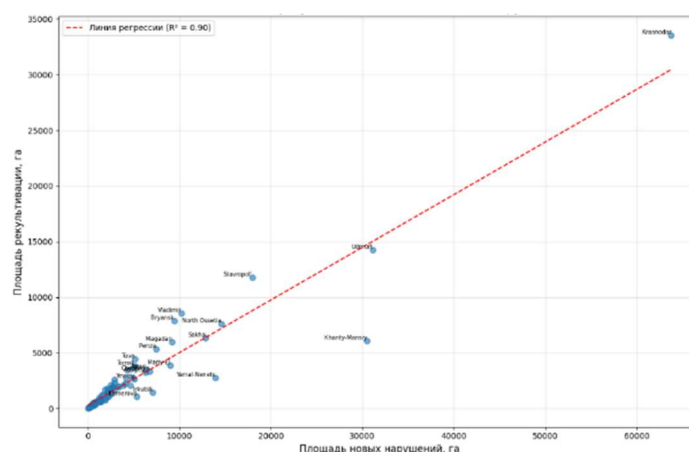
Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,986$, что свидетельствует о том, что модель объясняет 98,6 % вариации фактических значений. Параметр при временном аргументе (320,1 тыс. га) интерпретируется как среднегодовой абсолютный прирост накопленной площади нарушений в рассматриваемый период.



Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Рис. 4. Матрица корреляций Пирсона (2023 г., $n = 85$)
Fig. 4. Pearson correlation matrix (2023, $n = 85$)

Прогнозные оценки, полученные на основе данной модели на период до 2030 г., представлены в табл. 4 и визуализированы на рис. 6. (Результаты экспоненциальной модели, также рассмотренной в рамках этапа, не приводятся ввиду её более низкого качества аппроксимации или по иным причинам, указанным в исходном тексте.)



Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Рис. 5. Зависимость площади рекультивации от площади новых нарушений (2023 г.)

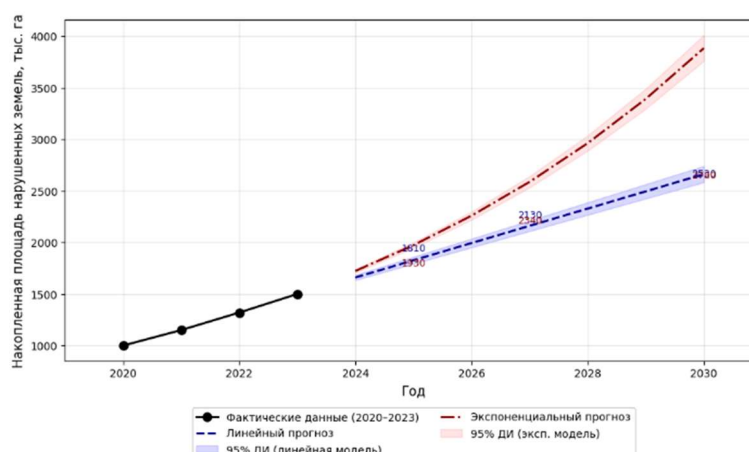
Fig. 5. Dependence of reclaimed area on newly disturbed area (2023)

Таблица 4. Прогнозные значения накопленной площади нарушенных земель в Российской Федерации (тыс. га)

Table 4. Forecast values of accumulated disturbed land area in the Russian Federation (thousand ha)

Год/Year	Линейный прогноз/Linear forecast	Экспоненциальный прогноз/Exponential forecast
2025	1810	1930
2027	2130	2340
2030	2530	2780

Источник: рассчитано и составлено авторами/Calculated and compiled by the author.



Источник: составлено авторами/Source: compiled by the authors.

Рис. 6. Прогноз накопленной площади нарушенных земель в Российской Федерации до 2030 г.

Примечание: доверительный интервал линейной модели рассчитан на основе стандартной ошибки регрессии

Fig. 6. Forecast of the accumulated area of disturbed lands in the Russian Federation up to 2030. Note: The confidence interval for the linear model is calculated based on the standard error of the regression

Обсуждение

Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют сформулировать ряд выводов относительно масштабов, структуры и эффективности рекультивации нарушенных земель в Российской Федерации, а также наметить возможные направления совершенствования государственной политики в этой сфере. Прежде всего, обращает на себя внимание устойчивое доминирование горнодобывающего сектора в формировании техногенно нарушенных земель. Как показано в разделе «Результаты», доля разработки месторождений полезных ископаемых в общем объёме новых нарушений не только является определяющей (в среднем 64,2 % за 2020–2023 гг.), но и демонстрирует выраженную положительную динамику – с 61 % в 2020 г. до 67 % в 2023 г. Это свидетельствует о нарастающей сырьевой ориентации российской экономики и расширении масштабов добычи углеводородов, угля и рудных полезных ископаемых, что согласуется с ранее опубликованными данными о доминировании горнопромышленного комплекса в формировании техногенных ландшафтов [5, 17]. В отличие от большинства локальных исследований, настоящее исследование впервые даёт количественную оценку этого вклада на уровне всей страны за четырёхлетний период, что позволяет говорить о системном характере проблемы.

Пространственное распределение нарушенных земель отличается экстремальной асимметрией, что подтверждается высокими значениями коэффициента вариации (312 %) и индекса Джини (0,84). Концентрация 38,6 % всех нарушений в пяти регионах – Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах, Кемеровской и Иркутской областях, Республике Саха (Якутия) – свидетельствует о ярко выраженной «сырьевой поляризации» территории. Эти регионы испытывают бремя накопленного экологического ущерба, требующего значительных затрат на ликвидацию. Сходные закономерности прослеживаются и в исследованиях других авторов [29], где показано, что в Австралии 70 % нарушенных земель приходится на три горнодобывающих штата, а в Канаде – на провинции Альберта и Британская Колумбия [30]. Сравнение с зарубежными данными показывает, что в США и ЮАР аналогичная концентрация нарушений также приурочена к угледобывающим и нефтегазовым провинциям [19, 21], однако механизмы финансового гарантирования рекультивации в этих странах более развиты, что снижает остроту проблемы. В Европейском Союзе действуют директивы, обязывающие государства-члены вести реестры нарушенных земель и планировать их восстановление, но единой методологии оценки эффективности не существует.

Введённый в настоящем исследовании коэффициент эффективности рекультивации (K_{eff}) позволил количественно измерить разрыв между темпами нарушения и восстановления земель. Средний показатель по стране (0,75) показывает, что около четверти ежегодно нарушаемых земель остаются нерекультивированными и пополняют накопленный ущерб. Анализ коэффициента эффективности рекультивации (K_{eff}) выявил устойчивое отставание темпов восстановления земель от темпов их нарушения в крупнейших добывающих регионах. В Ямало-Ненецком автономном округе K_{eff} составляет 0,19, в Ханты-Мансийском АО – 0,24, в Кемеровской области – 0,28, что существенно ниже среднероссийского значения (0,75). Данный разрыв свидетельствует о хроническом дефиците финансирования рекультивационных мероприятий, что согласуется с выводами И.П. Кожокаря [7] о несовершенстве правового регулирования и фактическом отсутствии действенных механизмов принуждения недропользователей к выполнению обязательств.

Сопоставление с международной практикой показывает, что в странах с развитой системой бондирования (США, Канада, Австралия) коэффициент эффективности рекультивации, как правило, превышает 1,0 [31, 32]. В государствах с переходной экономикой его значения, напротив, заметно ниже. Это подтверждает определяющую роль институциональной среды в обеспечении баланса между нарушением и восстановлением земельных ресурсов.

Результаты корреляционного анализа Пирсона ($n = 85$) указывают на доминирующий вклад горнодобывающей отрасли в образование новых нарушений: связь между площадью

новых нарушений и долей горных работ характеризуется очень высокой теснотой ($r = 0,96$, $p < 0,01$). При этом выявлена сильная положительная корреляция между площадью рекультивации и площадью новых нарушений ($r = 0,84$, $p < 0,01$), что означает концентрацию восстановительных работ именно в регионах с наибольшим техногенным прессингом. Однако даже в этих зонах восстановление не компенсирует объёмов деградации. Статистически незначимая связь между долей лесозаготовок и рекультивацией ($r = -0,22$, $p > 0,05$) указывает на практически полное отсутствие системных восстановительных мероприятий в лесном секторе, что коррелирует с данными [1] о кризисных явлениях в лесовосстановлении России. В зарубежных странах, напротив, лесопользование сопровождается обязательным воспроизводством лесных ресурсов, например в Скандинавии после рубок лесовосстановление проводится на 98 % площадей [33].

Прогнозные оценки на период до 2030 г., полученные на основе линейной и экспоненциальной моделей, указывают на возможное увеличение накопленной площади нарушенных земель до 2,53–2,78 млн га при сохранении текущих тенденций. Это сопоставимо с территорией таких государств, как Словения или Кувейт. Более вероятным признаётся экспоненциальный сценарий (2,78 млн га), учитывающий ускоряющийся рост деградации вследствие ввода новых месторождений и реализации инфраструктурных проектов. Для повышения точности прогноза привлекались подходы, учитывающие пространственную автокорреляцию и нелинейные эффекты [34, 35]. Аналогичные оценки для развивающихся стран демонстрируют, что при отсутствии активных мер площадь деградированных земель к 2030 г. может возрасти на 30–40 % [36].

В целях изменения сложившейся ситуации предлагается комплекс мер. В первую очередь необходимо ввести обязательное финансовое обеспечение рекультивации для недропользователей (по аналогии с системами бондирования в США [19], Канаде [30] и Австралии [29]), что позволит создать резервный фонд для восстановительных работ. Далее требуется разработка отдельных федеральных программ для регионов с наибольшим накопленным ущербом (ХМАО, ЯНАО, Кузбасс) с учётом ограниченности их бюджетных возможностей и высокой стоимости рекультивации. Кроме того, следует ужесточить контроль за исполнением обязательств и ввести ответственность за их невыполнение. Наконец, целесообразно стимулировать внедрение современных технологий рекультивации, включая биоактивацию и использование искусственных почвосмесей, эффективность которых подтверждена как в ряде российских регионов [2, 28], так и в зарубежной практике [33].

Таким образом, переход к «зелёной» экономике требует не только декларативных обязательств, но и чётких количественных ориентиров, закреплённых в нормативных документах, а также создания экономических стимулов для восстановления земель. Настоящее исследование предоставляет доказательную базу для таких решений, основанную на объективных статистических данных и современных методах анализа.

Заключение

По итогам проведённого исследования авторами сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработан и апробирован комплексный алгоритм оценки масштабов, структуры, пространственной дифференциации и эффективности рекультивации нарушенных земель на основе официальных статистических данных. Предложенный методический подход включает расчёт агрегированных показателей динамики нарушений, измерение межрегиональной асимметрии (коэффициент вариации, индекс Джини), корреляционный анализ Пирсона, введение интегрального коэффициента эффективности рекультивации (K_{eff}), а также линейное и экспоненциальное прогнозирование. Апробация алгоритма на данных по 85 субъектам РФ за 2020–2023 гг. подтвердила его работоспособность и пригодность для регулярного мониторинга ситуации в масштабах страны.

2. Установлено, что разработка месторождений полезных ископаемых является абсолютно доминирующим фактором нарушения земель в России, при этом её доля устойчиво растёт, что свидетельствует об усилении техногенной нагрузки на земельные ресурсы в сырьевом секторе. Вторым и третьим по значимости факторами выступают строительные работы и лесозаготовки, однако их вклад в общий объём нарушений существенно уступает горнодобывающей деятельности.

3. Пространственное распределение нарушенных земель отличается крайней неравномерностью, что подтверждается высокими значениями коэффициента вариации и индекса Джини. Пять ресурсодобывающих регионов аккумулируют более трети всех нарушенных земель страны, что свидетельствует о ярко выраженной «сырьевой поляризации» территории и создаёт повышенные экологические риски для данных субъектов.

4. Существующие объёмы рекультивации систематически не компенсируют текущие темпы нарушений. Средний по стране коэффициент эффективности рекультивации свидетельствует о том, что около четверти ежегодно нарушаемых земель остаются невозстановленными. В ведущих ресурсодобывающих регионах этот разрыв значительно глубже, что указывает на хронический дефицит рекультивационных мероприятий и накопление экологического ущерба.

5. Корреляционный анализ подтвердил определяющую роль горнодобывающего сектора в генерации нарушений. Выявлена сильная положительная связь между площадью новых нарушений и долей горных работ, а также значимая связь между рекультивацией и новыми нарушениями. В то же время связь лесозаготовок с рекультивацией статистически незначима, что свидетельствует о практически полном отсутствии восстановительных работ в лесном секторе.

6. Прогнозные модели показывают, что при сохранении текущих тенденций накопленная площадь нарушенных земель будет неуклонно расти, достигая к 2030 г. значений, сопоставимых с территорией некоторых европейских государств. Экспоненциальный сценарий, учитывающий ускоряющийся характер деградации, представляется более реалистичным и указывает на необходимость принятия безотлагательных мер.

7. Для преодоления сложившейся ситуации авторы предлагают комплекс мер, включающий: внедрение обязательного финансового гарантирования (бондирования) для недропользователей; разработку дифференцированных федеральных программ для регионов с наибольшим накопленным ущербом; усиление контроля за исполнением рекультивационных обязательств и введение ответственности за их неисполнение; стимулирование использования современных технологий рекультивации. Реализация этих мер будет способствовать переходу к «зелёным» практикам землепользования и устойчивому развитию ресурсодобывающих регионов, а также создаст условия для ликвидации накопленного экологического ущерба в масштабах, сопоставимых с темпами его возникновения.

Список литературы

1. Сорокин С.Н., Клименок А.В. Проблемы создания новых ландшафтов и воссоздания биогеоценозов при рекультивации нарушенных земель: организационные пробелы, их последствия и пути решения. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*, 2025, № 3, С. 68–99. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2025-3-4>. EDN: GTELLZ.
2. Прищепенко Е.А., Дегтярева И.А., Рахманова Г.Ф., Ревенко В.В., Бабынин Э.В. *Рекультивация нарушенных земель*. Казань: Логос-Пресс, 2022. 252 с. EDN: IVHLKC.
3. Пендюрин Е.А., Святченко А.В., Кирюшина Н.Ю. Использование искусственной почвосмеси для восстановления нарушенных территорий. *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*, 2022, № 2 (34), С. 130–136. EDN: RPJYAE
4. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба. *Арктика: экология и экономика*, 2013, № 2 (10), С. 018–027. EDN: RGSNYB.
5. Хохряков А.В., Студенок Г.А., Фролов С.Г., Рыбников П.А. Территориальный эколого-технологический подход к обращению с объектами накопленного вреда окружающей среде как структурообразующий

- элемент системы обеспечения техносферной безопасности горнопромышленных регионов. *Известия Уральского государственного горного университета*, 2024, № 2 (74), С. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-2-132-141>. EDN: QVDQTO.
6. Arefieva O., Nazarkina A.V., Gruschakova N.V., Skurikhina Ju.E., Kolycheva V.B. Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, Vol. 7, Iss. 1, P. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.001>. EDN: KPTOMM.
 7. Кожокар И.П. Правовые проблемы рекультивации земель. *Труды Института государства и права Российской академии наук*, 2021, Т. 16, № 3, С. 69–88. DOI: <https://doi.org/10.35427/2073-4522-2021-16-3-kozhokar>. EDN: SLDSUA.
 8. *The Sustainable Development Goals Report 2023*. New York, United Nations, 2023. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf> (дата обращения 20.04.2026).
 9. *О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года*. Указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (дата обращения 20.04.2026).
 10. *Национальный проект «Экологическое благополучие»*. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/919/about/> (дата обращения 20.04.2026).
 11. *О проведении рекультивации и консервации земель*. Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 № 800. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302235/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5/?ysclid=mtdzl9ka2k248034149 (дата обращения 20.04.2026).
 12. *Статья 13. Содержание охраны земель*. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 31.07.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/56937c3e71a16317d6be39b0d52decf85830768a/ (дата обращения 20.04.2026).
 13. *ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения*. М.: Госстандарт СССР, 1984. 8 с.
 14. *ГОСТ Р 59070-2020. Охрана природы. Рекультивация нарушенных земель. Термины и определения*. М.: Росстандарт, 2020. 24 с.
 15. *Status of the World's Soil Resources*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. URL: <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/download> (дата обращения 20.04.2026).
 16. *Цели устойчивого развития в Российской Федерации: статистический сборник*. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/RUS_SDG_in_Russia_2024.pdf (дата обращения 20.04.2026).
 17. Шипилова А.М., Семина И.С. Особенности физических свойств почв техногенных ландшафтов лесостепной зоны Кузбасса. *Известия Уральского государственного горного университета*, 2016, № 3 (43), С. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-25-28>. EDN: WWNHYH.
 18. Kostin A.S., Krechetov P.P., Chernitsova O.V., Terskaya E.V. Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*, 2021, Vol. 35, art. 106817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>. EDN: OHXBLG.
 19. *U.S. Congress. H.R. 7941 – Bond Improvement and Reclamation Assurance Act. 118th Congress, 2024–2025*. URL: <https://www.congress.gov/118/bills/hr7941/BILLS-118hr7941ih.htm> (дата обращения 20.04.2026).
 20. Tanner P. *Guidelines for the rehabilitation of mined land handbook*. Johannesburg, Chamber of Mines of South Africa, Coaltech Research Association, 2007. 156 p.
 21. Van der Merwe M., Coetzee H. Best practices in mine rehabilitation: a South African perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, Vol. 235, P. 1245–1256.
 22. Van Wyk S.J., Haagner A.S.H. A review of mine land rehabilitation outcomes: culture, procurement and practice. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2025, Vol. 125, № 4, P. 209–216. DOI: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/mc13/2025>. EDN: XSNRCA.
 23. Barter H. *Mine rehabilitation law in South Africa: A comprehensive guide to environmental sustainability in mining operations*. URL: <https://www.bartermckellar.law/mining-law-explained/mine-rehabilitation-law-in-south-africa-a-comprehensive-guide-to-environmental-sustainability-in-mining-operations> (дата обращения 20.04.2026).
 24. Le Sage J., Pace R.K. *Introduction to spatial econometrics*. New York: CRC Press, 2009. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420064254>.
 25. Elhorst J.P. *Spatial econometrics: from cross-sectional data to spatial panels*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 119 p. DOI: 10.1007/978-3-642-40340-8.
 26. Cameron A.C., Miller D.L. A practitioner's guide to cluster-robust inference. *The Journal of Human Resources*, 2015, Vol. 50, Iss. 2, P. 317–372. DOI: <https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317>.
 27. Anselin L., Le Gallo J., Jayet H. Spatial panel econometrics. *The Econometrics of Panel Data*. Eds. L. Mátyás, P. Sevestre. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 625–660.
 28. Осинцева М.А., Жидкова Е.А. Динамика формирования растительного покрова техногенно нарушенных участков в зависимости от мощности почвенной закладки и биологической активации (на примере

- угольного разреза). *Техника и технология пищевых производств*, 2025, Т. 55, № 4, С. 885–902. DOI: 10.21603/2074-9414-2025-4-2617. EDN: MGDYNH.
29. *Commonwealth of Australia. State of the Environment Report 2021*. Canberra, Department of Agriculture, Water and the Environment, 2021. URL: <https://www.preventionweb.net/media/81953/download?startDownload=20260904> (дата обращения 20.04.2026).
 30. *Government of Canada. Canadian Environmental Sustainability Indicators: Land Reclamation*. Ottawa, Statistics Canada, 2022. URL: https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/en4/En4-144-18-2023-eng.pdf (дата обращения 20.04.2026).
 31. *Environmental Protection Agency. National Report on Abandoned Mine Lands*. Washington, D.C., EPA, 2023. URL: <https://www.epa.gov/superfund/abandoned-mine-lands> (дата обращения 20.04.2026).
 32. *Department of Mineral Resources and Energy, South Africa. Annual Report on Mine Rehabilitation*. Pretoria, DMRE, 2024. URL: https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/202511/department-mineral-resource-and-energy-annual-report-20242025.pdf (дата обращения 20.04.2026).
 33. *Swedish Environmental Protection Agency. Forest Reclamation and Restoration in Sweden*. Stockholm, Naturvårdsverket, 2023. URL: <https://www.naturvardsverket.se/4aec10/globalassets/media/publikationer-pdf/7100/978-91-620-7122-6.pdf> (дата обращения 20.04.2026).
 34. Bivand R.S., Pebesma E., Gómez-Rubio V. *Applied spatial data analysis with R*. Cham: Springer, 2013. 405 p. DOI: 10.1007/978-3-031-12042-4.
 35. Anselin L., Bera A.K., Florax R., Yoon M.J. Simple diagnostic tests for spatial dependence. *Regional Science and Urban Economics*, 1996, Vol. 26, Iss. 1, P. 77–104. DOI: 10.1016/0166-0462(95)02111-6.
 36. *Global Land Outlook 2: Land Restoration for Recovery and Resilience*. Nairobi, UNEP, 2024. URL: https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-04/UNCCD_GLO2_low-res_2.pdf (дата обращения 20.04.2026).

Информация об авторах

Яковенко Наталия Владимировна, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института инновационных технологий и лесного комплекса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, Российская Федерация, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8; n.v.yakovenko71@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4203-0040

Комов Игорь Владимирович, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры мировой и национальной экономики Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, Российская Федерация, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8; igrkom@bk.ru; ORCID: 0000-0003-4943-518X

Суховерхов Олег Сергеевич, аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, Российская Федерация, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8; suhoverhovolegsergeevic@gmail.com; ORCID: 0009-0009-1408-4237

Поступила в редакцию: 21.04.2026

Поступила после рецензирования: 19.06.2026

Принята к публикации: 24.09.2026

REFERENCES

1. Sorokin S.N., Klimenok A.V. I of creating new landscapes and reconstructing biogeocenoses during the reclamation of disturbed lands: organizational gaps, their consequences, and possible solutions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki*, 2025, no. 3, pp. 68–99. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2025-3-4>. EDN: GTELLZ.
2. Prischepenko E.A., Degtyareva I.A., Rakhmanova G.F., Revenko V.V., Babynin E.V. *Reclamation of disturbed lands*. Kazan, Logos-Press, 2022. 252 p. (In Russ.) EDN: IVHLKC.
3. Pendyurin E.A., Svatchenko A.V., Kiryushina N.Yu. Use of artificial soil mixture for restoration of disturbed territories. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*, 2022, no. 2 (34), pp. 130–136. (In Russ.) EDN: RPJYAE.
4. Sokolov Yu.I. Arctic: problem of the accumulated environmental damage. *Arctic: ecology and economy*, 2013, no. 2 (10), pp. 018–027. (In Russ.) EDN: RGSNYB.
5. Khokhryakov A.V., Studenok G.A., Frolov S.G., Rybnikov P.A. Territorial eco-technological approach to handling the accumulated environmental damage objects as a structure-forming element of the ensuring the technogenic safety of mining regions. *Izvestiya of the Ural State Mining University*, 2024, no. 2 (74), pp. 132–141. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-2-132-141>. EDN: QVDQTO.

6. Arefieva O., Nazarkina A.V., Gruschakova N.V., Skurikhina Ju.E., Kolycheva V.B. Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, vol. 7, Iss. 1, pp. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.001>. EDN: KPTOMM.
7. Kozhokar I.P. Legal problems of land reclamation. *Proceedings of the Institute of State and Law of the RAS*, 2021, vol. 16, no. 3, pp. 69–88. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.35427/2073-4522-2021-16-3-kozhokar>. EDN: SLDSUA.
8. *The Sustainable Development Goals Report 2023*. New York, United Nations, 2023. Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf> (accessed 20 April 2026).
9. "On the Environmental Security Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2025". Decree of the President of the Russian Federation No. 176 of 19.04.2017. (In Russ.) Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (accessed 20 April 2026).
10. National Project "Ecological Well-being". (In Russ.) Available at: <http://government.ru/rugovclassifier/919/about/> (accessed 20 April 2026).
11. "On the reclamation and conservation of lands". Resolution of the Government of the Russian Federation No. 800 of 10.07.2018. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302235/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5/?ysclid=mtdzl9ka2k248034149 (accessed 20 April 2026).
12. Article 13. Substance of Land Protection. Land Code of the Russian Federation No. 136-FZ of 25.10.2001 (as amended on 31.07.2023). (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/56937c3e71a16317d6be39b0d52decf85830768a/ (дата обращения 20.04.2026).
13. SS 17.5.1.01-83. Nature protection. Land reclamation. Terms and definitions. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1984. 8 p. (In Russ.)
14. SS R 59070-2020. Nature protection. Reclamation of disturbed lands. Terms and definitions. Moscow, Rosstandart Publ., 2020. 24 p. (In Russ.)
15. *Status of the World's Soil Resources*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. Available at: <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/download> (accessed 20 April 2026).
16. *Sustainable Development Goals in the Russian Federation: Statistical Compendium*. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/RUS_SDG_in_Russia_2024.pdf (In Russ.) (accessed 20 April 2026).
17. Shipilova A.M., Semina I.S. Features of physical properties of soil of technogenic landscapes of forest-steppe zone of Kuzbass. *Izvestiya of the Ural State Mining University*, 2016, no. 3 (43), pp. 25–28. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-25-28>. EDN: WWNYHV.
18. Kostin A.S., Krechetov P.P., Chernitsova O.V., Terskaya E.V. Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*, 2021, vol. 35, art. 106817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>. EDN: OHXBLG.
19. U.S. Congress. H.R. 7941 – Bond Improvement and Reclamation Assurance Act. 118th Congress, 2024–2025. Available at: <https://www.congress.gov/118/bills/hr7941/BILLS-118hr7941ih.htm> (accessed 20 April 2026).
20. Tanner P. *Guidelines for the rehabilitation of mined land handbook*. Johannesburg, Chamber of Mines of South Africa, Coaltech Research Association, 2007. 156 p.
21. Van der Merwe M., Coetzee H. Best practices in mine rehabilitation: a South African perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 235, pp. 1245–1256.
22. Van Wyk S.J., Haagner A.S.H. A review of mine land rehabilitation outcomes: culture, procurement and practice. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2025, vol. 125, no. 4, pp. 209–216. DOI: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/mc13/2025>. EDN: XSNRCA.
23. Barter H. *Mine rehabilitation law in South Africa: a comprehensive guide to environmental sustainability in mining operations*. Available at: <https://www.bartermckellar.law/mining-law-explained/mine-rehabilitation-law-in-south-africa-a-comprehensive-guide-to-environmental-sustainability-in-mining-operations> (accessed 20 April 2026).
24. Le Sage J., Pace R.K. *Introduction to Spatial Econometrics*. New York, CRC Press, 2009. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420064254>.
25. Elhorst J.P. *Spatial econometrics: from cross-sectional data to spatial panels*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013. 119 p. DOI: 10.1007/978-3-642-40340-8.
26. Cameron A.C., Miller D.L. A practitioner's guide to cluster-robust inference. *The Journal of Human Resources*, 2015, vol. 50, Iss. 2, pp. 317–372. DOI: <https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317>.
27. Anselin L., Le Gallo J., Jayet H. Spatial panel econometrics. *The Econometrics of Panel Data*. Eds. L. Mátyás, P. Sevestre. Berlin, Heidelberg, Springer, 2006. pp. 625–660.
28. Osintseva M.A., Zhidkova E.A. Dynamics of vegetation development on post-mining areas: soil thickness and bioactivation. *Food processing: techniques and technology*, 2025, vol. 55, no. 4, pp. 885–902. (In Russ.) DOI: 10.21603/2074-9414-2025-4-2617. EDN: MGDYNH.
29. Commonwealth of Australia. *State of the Environment Report 2021*. Canberra, Department of Agriculture, Water and the Environment, 2021. Available at: <https://www.preventionweb.net/media/81953/download?startDownload=20260904> (accessed 20 April 2026).

30. *Government of Canada. Canadian Environmental Sustainability Indicators: Land Reclamation*. Ottawa, Statistics Canada, 2022. Available at: https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/en4/En4-144-18-2023-eng.pdf (accessed 20 April 2026).
31. *Environmental Protection Agency. National Report on Abandoned Mine Lands*. Washington, D.C., EPA, 2023. Available at: <https://www.epa.gov/superfund/abandoned-mine-lands> (accessed 20 April 2026).
32. *Department of Mineral Resources and Energy, South Africa. Annual Report on Mine Rehabilitation*. Pretoria, DMRE, 2024. Available at: https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/202511/departement-mineral-resource-and-energy-annual-report-20242025.pdf (accessed 20 April 2026).
33. *Swedish Environmental Protection Agency. Forest Reclamation and Restoration in Sweden*. Stockholm, Naturvårdsverket, 2023. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/4aec10/globalassets/media/publikationer-pdf/7100/978-91-620-7122-6.pdf> (accessed 20 April 2026).
34. Bivand R.S., Pebesma E., Gómez-Rubio V. *Applied spatial data analysis with R*. Cham, Springer, 2013. 405 p. DOI: 10.1007/978-3-031-12042-4.
35. Anselin L., Bera A.K., Florax R., Yoon M.J. Simple diagnostic tests for spatial dependence. *Regional Science and Urban Economics*, 1996, vol. 26, Iss. 1, pp. 77–104. DOI: 10.1016/0166-0462(95)02111-6.
36. *Global Land Outlook 2: Land Restoration for Recovery and Resilience*. Nairobi, UNEP, 2024. Available at: https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-04/UNCCD_GLO2_low-res_2.pdf (accessed 20 April 2026).

Information about the authors

Natalia V. Yakovenko, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Chief Researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev street, Voronezh, 394087, Russian Federation; n.v.yakovenko71@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

Igor V. Komov, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev street, Voronezh, 394087, Russian Federation; igrkom@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4943-518X>

Oleg S. Sukhoverkhov, Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev street, Voronezh, 394087, Russian Federation; suhoverhovolegsergeevic@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-1408-4237>

Received: 21.04.2026

Revised: 19.06.2026

Accepted: 24.09.2026