

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-214-240



Ссылки для цитирования:

Сапцын Р.В., Еремченко О.З. Экологическая оценка последствий рекультивации нефтезагрязненной почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 214-240. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-214-240

Cite this article as:

Saptsyn R.V., Eremchenko P.Z., Ecological assessment of the consequences of reclamation of oil-polluted soil, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 214-240, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-214-240

Экологическая оценка последствий рекультивации нефтезагрязненной почвы

© 2026 г. Р. В. Сапцын*, О. З. Еремченко**

*Пермский государственный национальный исследовательский
университет**, Россия,
614990, Пермь, ул. Букирева, д. 15,

*<https://orcid.org/0000-0003-3915-0391>, e-mail: ruslansaptsyn@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-3581-0874>, e-mail: eremch@psu.ru.

*Поступила в редакцию 20.06.2024, после доработки 05.02.2026,
принята к публикации 29.04.2026*

Резюме: Рекультивация нарушенных земель направлена на восстановление экологических функций почвы или заменяющих ее техногенных поверхностных образований. В процессе устранения нефтезагрязнения на площади 0.73 га уничтожена темногомусовая почва и сформирован литострат суглинистый карбонатный. Представляет интерес изучение свойств литострата, обеспечивающих выполнение экологических функций. Агрохимические свойства литострата (слабощелочная реакция среды, повышенная обеспеченность подвижными фосфатами, калием, кальцием) указывают на удовлетворительный потенциал к восстановлению травяной экосистемы. Пониженная активность почвенных ферментов (уреазы и инвертазы) связана с недостатком органического вещества в литострате. Установлена фитотоксичность литострата, обусловленная остаточным содержанием нефтепродуктов в количестве 60–140 мг/кг и проявившаяся в физиолого-биохимических показателях тест-культуры. Комплексная

оценка, основанная на расчете коэффициентов оптимизации, показала, что ресурсный (агрохимический) и экологический потенциал поверхностных слоев (0–20 и 20–40 см) литострата уступает темногумусовой почве.

Ключевые слова: нефтезагрязнение; рекультивация; критерии оценивания рекультивации; ферментативная активность; фитотоксичность.

Ecological assessment of the consequences of reclamation of oil-polluted soil

© 2026 R. V. Saptsyn*, O. Z. Eremchenko**

*Perm State National Research University,
15 Bukireva Str., Perm 614990, Russian Federation,*

*<https://orcid.org/0000-0003-3915-0391>, e-mail: ruslansaptsyn@gmail.com,

**<https://orcid.org/0000-0003-3581-0874>, e-mail: eremch@psu.ru.

Received 20.06.2024, Revised 05.02.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: Reclamation of disturbed lands is aimed at restoring the ecological functions of the soil or man-made surface formations replacing it. In the process of eliminating oil pollution on an area of 0.73 hectares, dark humus soil was destroyed and a loamy carbonate lithostratum was formed. It is of interest to study the properties of the lithostratum, which ensure the fulfillment of environmental functions. The agrochemical properties of the lithostratum (slightly alkaline reaction of the environment, increased supply of mobile phosphates, potassium, calcium) indicate satisfactory potential for the restoration of the grass ecosystem. Reduced activity of soil enzymes (urease and invertase) is associated with a lack of organic matter in the lithostratum. The phytotoxicity of the lithostratum was established, due to the residual content of petroleum products in the amount of 60–140 mg/kg and manifested in the physiological and biochemical parameters of the test culture. A comprehensive assessment based on the calculation of optimization coefficients showed that the resource (agrochemical) and environmental potential of the surface layers (0–20 and 20–40 cm) of the lithostratum is inferior compared to dark humus soil.

Keywords: oil pollution; reclamation; criteria for evaluating reclamation; enzymatic activity; phytotoxicity.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение свойств почвы в результате антропогенного воздействия приводит к трансформации экологических и ресурсных функций почвы (Богатырев и др., 2017; Adhikari, Hartemink, 2016; Яковлев, 2022; Яковлева, Евдокимова, 2022). В современном почвенном покрове на разных категориях земель присутствуют искусственные объекты – техногенные поверхностные образования (ТПО) (Классификация и диагностика..., 2004; Тонконогов, 2008; Пастухов, 2013) или техносоли (WRB, 2022). К ТПО относятся литостраты – насыпные минеральные грунты, в том числе, отвалы вскрышных и вмещающих пород горнодобывающих и строительных предприятий, грунтовые насыпи и выровненные грунтовые площадки, созданные при разработке и обустройстве месторождений полезных ископаемых, строительстве городов и поселков. Литостраты являются новой средой обитания живых организмов, выполняющей биогеоценотические функции почвы. Потенциальная способность литострата к созданию условий обитания растений зависит от свойств минерального субстрата, в первую очередь, от гранулометрического состава и водопроницаемости, а также от специфичности химических свойств (Gracheva, 2019).

В настоящее время значительные площади суши затронуты разливами нефти; под воздействием нефтепродуктов происходит глубокое изменение свойств и нарушение экологических функций почв (Хазиев и др., 1988; Исмаилов, 1988; Киреева и др., 2009; Kimes et al., 2014; Riveroll-Larios et al., 2015; Polyak et al., 2018; Тишин, 2020). На территории Пермского края ведется добыча и транспортировка нефти, периодически случаются нефтяные разливы, которые устраняют преимущественно путем удаления загрязненной растительности и верхней части почвы для последующей ремедиации в специализированных организациях. Такой способ решения проблемы, с одной стороны, устраняет токсическое воздействие нефтепродуктов на окружающую среду, но, с другой стороны, ликвидирует некоторую часть профиля почвы, снижая ее плодородие и потенциал к восстановлению экосистемы.

Цель исследований – на основе данных об агрохимических и биологических свойствах почвы, рекультивированной после

нефтезагрязнения, оценить ее способность к выполнению основных экологических и ресурсных функций.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ранней весной 2018 г. из-за разгерметизации нефтепровода произошел аварийный разлив нефти и загрязнение почвенно-растительного покрова. Нефтезагрязненный участок расположен на территории Лобановского сельского поселения в Пермском районе Пермского края, относится к категории земель населенных пунктов. На этапе технической рекультивации удалили растительность и часть загрязненной почвы для последующей ремедиации в специализированной организации. Рельеф территории восстановили путем отсыпки на поверхность суглинистого грунта, который применяется для создания насыпей возле автомобильных дорог. Рекультивированная территория занимает около 0.73 га, рельеф пониженно-равнинный со слабым уклоном на юго-запад, почвообразующими породами служат элювиально-делювиальные суглинки.

В течение 2018–2019 гг. проводили контроль над содержанием остаточных нефтепродуктов в слое почвы 0–20 см в 5–7 точках исследуемого участка.

В июле 2022 г. в центре рекультивированного участка заложили полуразрез для морфологического описания и диагностики почвы. Почвенные пробы отобрали в 7 точках участка по слоям 0–20 и 20–40 см (рис. 1). На расстоянии около 100 м от рекультивированной территории выбран контрольный участок для диагностики фоновой почвы. В пределах контрольного участка взяли почвенные пробы по глубинам 0–20 см и 20–40 см в 3-кратной повторности. Координаты разреза фоновой почвы (в системе координат WGS-84): N 57°47'9.33"; E 56°22'56.37".

В связи с результатами ранее проведенных исследований (Сапцын, Еремченко, 2023) изучили почвенные свойства, изменяющиеся в процессе разрушения нефтяных углеводов:

- содержание остаточных нефтепродуктов – гравиметрическим методом (ПНД Ф 16.1.41-04);



Рис. 1. Карта отбора почвенных проб.

Fig. 1. Map of soil sampling.

- рН водной и солевой вытяжки – потенциметрическим методом по ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26483-85;
- органическое вещество (C_{org}) – титриметрическим методом по Тюрину;
- подвижные соединения фосфора и калия в фоновой почве – по Кирсанову (ГОСТ Р 54650—2011), в рекультивированной почве – по Мачигину (ГОСТ 26205-91);
- активность каталазы – по методу Джонсона и Темпла путем обратного титрования остаточного H_2O_2 с $KMnO_4$;
- активность уреазы и инвертазы – по методам Ф.Х. Хазиева (2005);
- фитотестирование почвы проводили по реакции кресс-салата, высоту и сырую массу надземной части растений измерили в 25-кратной повторности (Патент РФ № 2620555..., 2017);

- редокс-активность растительных вытяжек из кресс-салата изучали по методу Петта в модификации Прокашева; в условиях окислительного стресса растения накапливают восстановленные соединения (Патент РФ № 2620555..., 2017).

Результаты исследований обработаны математически с использованием программного обеспечения Statistica (версия 10). Значимые различия рассчитали методом дисперсионного анализа с помощью критерия Краскела–Уолиса и уровнем значимости $P < 0.05$. Адекватность полученных уравнений регрессии рассчитали с помощью критерия Фишера при уровне значимости $P < 0.05$.

Для комплексной оценки почв использовали метод математической оптимизации, при котором для каждого показателя свойств почвы выбирали экстремум (оптимальный минимум или максимум), относительно которого рассчитали нормированные показатели. Путем сложения нормированных показателей получили коэффициенты оптимизации почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На контрольном участке с фоновой почвой растительность представлена разнотравно-злаковой ассоциацией. В профиле почвы диагностировали следующие генетические горизонты (рис. 2.).

AУ1 – темногомусовый, мощность 0–20/20 см, темносерый с бурым оттенком, зернисто-комковатый, среднесуглинистый, рыхлый, много корней трав.

AУ2 – темногомусовый переходный, мощность 20–45/25 см, серо-бурый, среднекомковатый, среднесуглинистый, слегка уплотненный, присутствуют корневины, копролиты, корни трав.

AУС – переходный к породе горизонт, мощность 45–70/25 см, бурый, непрочно комковатый, суглинистый, слегка уплотненный, слегка вязкий, присутствуют червоточины и корневины, есть корни; очень постепенно переходит в почвообразующую породу.

С – почвообразующая порода с глубины около 70 см, бурая, бесструктурная, тяжелосуглинистая, уплотненная, слегка вязкая.

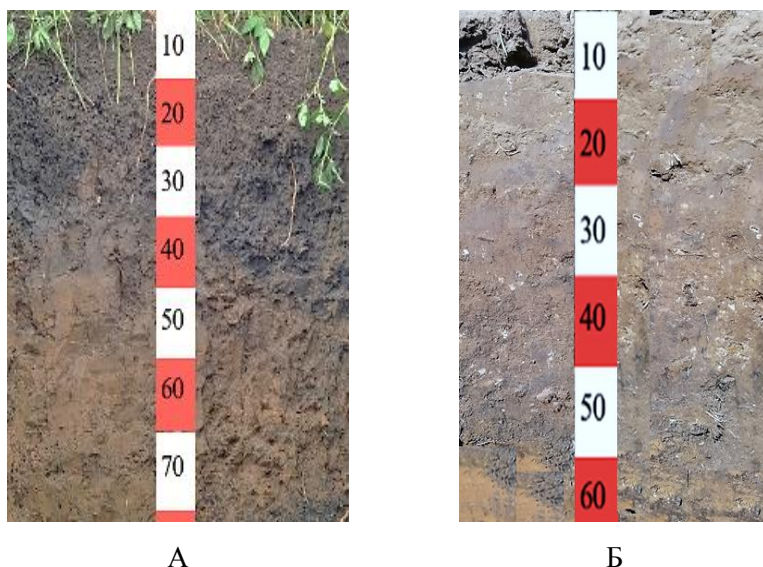


Рис. 2. Серогумусовая почва (А) и литострат карбонатный (Б).
Fig. 2. Appearance of gray humus soil (А) and carbonate lithostrate (Б).

В соответствии с классификацией почв России (Классификация и диагностика..., 2004), почва диагностирована как темно-гумусовая маломощная, сильно гумусированная по содержанию гумуса (табл. 1).

На рекультивированном участке растительность представлена луговыми и сорными видами трав. Профиль “почвы” характеризовался следующими морфологическими особенностями (рис. 2).

Слой мощностью 0–50(55) см – отсыпанный грунт, буровато-серый со светло-палевыми пятнами карбонатных включений, с глубины около 45 см неоднородной окраски: буровато-серые и бурые фрагменты, бесструктурный, среднесуглинистый, уплотненный, есть корни трав, “вскипает от HCl”.

АУС – с глубины около 55 см залегает нижняя часть переходного горизонта, цвет бурый, слабовыраженная комковатость, уплотненный, слегка вязкий, редко встречались корни; очень по-

степенно переходит в почвообразующую породу – бурые элювиально-делювиальные суглинки.

Таблица 1. Агрохимические свойства темногумусовой почвы и литострата (средние и их стандартные ошибки)

Table 1. Agrochemical properties of dark-humus soil and lithostrate (means and their standard deviations)

Объект	Слой, см	$pH_{\text{вод}}$	$C_{\text{орг}}$, %	Подвижные формы, мг/100 г		Нефтепродукты, г/кг
				P_2O_5	К	
Почва	0–20	6.69 ± 0.21	4.37 ± 0.25	11.3 ± 2.2	4.6 ± 1.2	нет
	20–40	6.77 ± 0.25	3.82 ± 0.18	7.8 ± 1.8	5.2 ± 1.4	нет
Литострат	0–20	$7.66^* \pm 0.04$	$1.59^* \pm 0.20$	$7.5^* \pm 1.3$	$15.6^* \pm 0.7$	0.11 ± 0.01
	20–40	$7.76^* \pm 0.04$	$1.25^* \pm 0.24$	6.9 ± 0.9	$15.4^* \pm 1.4$	0.09 ± 0.01

Примечание. *– наличие значимых различий между свойствами почвы и литострата, значимость различий рассчитана с помощью критерия Краскела–Уолиса при уровне значимости $P < 0.05$.

Note. *– the presence of significant differences between the properties of soil and lithostrate, the significance of the differences was calculated using the Kruskal–Wallis test at a significance level of $P < 0.05$.

Таким образом, по результатам морфологического описания почв установлено, что в процессе технической рекультивации среза-ли верхнюю часть темногумусовой почвы; на остаточную часть профиля насыпали грунт суглинистого гранулометрического состава слоем около 50–55 см, содержащий карбонатные включения. Исследуемое техногенное поверхностное образование является литостратом суглинистым карбонатным, сформированным на нижней части профиля темногумусовой почвы.

Летом 2018 г. в верхнем слое (0–20 см) литострата содержание остаточных нефтепродуктов составило в среднем около 1.5 г/кг (рис. 3). В апреле 2019 г. их количество уменьшилось в 5

раз; в июле этого же года наблюдали дополнительное уменьшение содержания нефтепродуктов в 2.5 раза. Через 2 года (2022) не отмечено значимых изменений в нефтезагрязнении литострата. Часть нефтепродуктов малодоступна для биodeградации, поэтому углеводороды не могут быть полностью удалены из почв даже в течение длительного времени (Stroud et al., 2007).

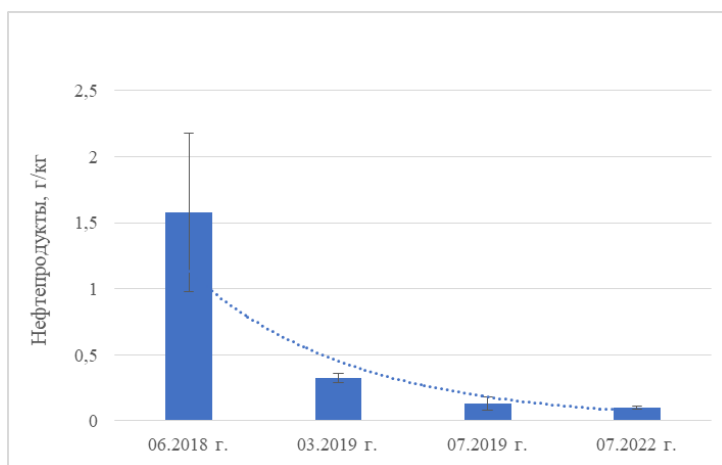


Рис. 3. Динамика содержания нефтепродуктов в слое литострата 0–20 см
Fig. 3. Dynamics of oil product content in the 0–20 cm lithostrate layer.

После проведения технической рекультивации и естественного самоочищения в течение 4 лет остаточное содержание нефтепродуктов в литострате находилось в пределах 0.06–0.14 г/100 г (табл. 1); между их содержанием в слоях 0–20 и 20–40 см не установлено значимых различий. Количество нефтепродуктов в литострате на порядок ниже регионального норматива допустимого содержания нефтепродуктов для зональной дерново-подзолистой почвы, который на землях сельскохозяйственного назначения составляет 2.4 г/кг (Постановление Правительства..., 2018).

Актуальная реакция почвенной среды в темногумусовой почве близка к нейтральной. По количеству гумуса почва отно-

сится к виду сильно гумусированных почв (Классификация и диагностика..., 2004). Согласно шкале В.Ф. Валькова с соавторами (2004), содержание в почве подвижных фосфатов соответствует повышенному уровню, подвижного калия – среднему уровню.

Для литострата характерна слабощелочная реакция почвенной среды, обусловленная присутствием карбонатов в строительном грунте. Количество органического углерода в среднем ниже в 3 раза, чем в темногомусовой почве. В соответствии с принятой градацией (Классификация и диагностика..., 2004) литострат характеризовался низким содержанием гумуса. В то же время литострат обогащен подвижными фосфатами и калием; по шкале обеспеченности (Вальков и др., 2004) уровень содержания фосфатов оценили как очень высокий, а калия – повышенный и высокий.

Известно, что чувствительными к антропогенному воздействию являются показатели отклика микробного сообщества почв (Терехова и др., 2021). Почвенные ферменты продуцируются прежде всего микроорганизмами, поэтому показатели ферментативной активности часто используют при оценке степени нарушения свойств и функций почвы (Zhao, Jiang, 2010; Liu et al., 2011; Soldatkin et al., 2012; Богатырев и др., 2017; Polyak et al., 2018). Каталазу и уреазу отнесли к ферментам, которые признаны маркерными в мониторинге углеводородного загрязнения (Maila, Cloete, 2005; Wu et al., 2016; Polyak et al., 2018).

Разрушение углеводов микроорганизмами приводит к образованию избыточного количества H_2O_2 , повреждающего клетки (Polyak et al., 2018). Каталаза метаболизирует H_2O_2 и защищает микробные клетки от повреждения, ее продуцируют практически все аэробные организмы (Stpniewska et al., 2009). По активности каталазы оценивают экологическое состояние не только загрязненных, но и других антропогенно-измененных почв (Garcia-Gil et al., 2000; Shi et al., 2008; Papa et al., 2009). При повышении концентрации нефтепродуктов в дерново-подзолистой супесчаной почве отметили ингибирование каталазной активности (Курбатов и др., 2019). В наших исследованиях каталазная активность в фоновой почве и литострате относительно одинаковая (табл. 2), что, вероятно, указывает на близкие уровни активности аэробных микроорганизмов.

Темногумусовая почва характеризовалась средней обеспеченностью инвертазой, а литострат – низкой обеспеченностью по шкале Д.Г. Звягинцева (1978). Активность инвертазы в темногумусовой почве в несколько раз выше, что указывает на более интенсивные, чем в литострате, процессы расщепления углеводов (Звягинцев, 1978; Frankeberger, Johanson, 1983).

Таблица 2. Ферментативная активность темногумусовой почвы и литострата (средние и их стандартные ошибки)

Table 2. Biochemical properties of dark-humus soil and lithostrate (means and their standard errors)

Объект	Слой, см	Каталаза, мл 0.1 н KMnO_4 * 1 г * 20 мин	Уреаза, мг N-NH_4 * 1 г * 24 ч	Инвертаза, мг глюкозы * 1 г * 24 ч
Почва	0–20	1.28 ± 0.02	2.9 ± 0.1	25.2 ± 2.2
	20–40	1.26 ± 0.01	0.6 ± 0.1	28.1 ± 0.8
Лито-страт	0–20	1.27 ± 0.01	$1.3^* \pm 0.2$	$9.5^* \pm 0.5$
	20–40	1.27 ± 0.01	$1.6^* \pm 0.2$	$9.3^* \pm 0.4$

Примечание. * – наличие значимых различий между свойствами почвы и литострата, значимость различий рассчитана с помощью критерия Краскела–Уолиса при уровне значимости $P < 0.05$.

Note. * – the presence of significant differences between the properties of soil and lithostrate, the significance of the differences was calculated using the Kruskal–Wallis test at a significance level of $P < 0.05$.

Уреаза в почвах катализирует гидролиз мочевины (Звягинцев, 1978; Щербакова, 1983; Косак, 2020). В подзолистой почве активность уреазы напрямую не коррелировала с деградацией нефти (Polyak et al., 2018). В слое 0–20 см темногумусовой почвы и в слоях 0–20 и 20–40 см литострата наблюдали среднюю обеспеченность уреазой, но в слое почвы 20–40 см обеспеченность ферментом низкая (по: Звягинцев, 1978). Одновременно в верхней части темногумусового горизонта почвы уреазная активность выше в 2 раза, по сравнению с ее активностью в верхнем слое литострата. Активность уреазы соответствует численности важнейшей группы аммонифицирующих микроорганизмов, принимающих

участие в минерализации азотсодержащих органических соединений (Исмаилов, 1988; Хазиев и др., 1988). Следовательно, уровень активности уреазы в литострате указывает на пониженную численность аммонифицирующих микроорганизмов и обедненность азотсодержащими органическими соединениями. В слое 20–40 см темногомусового горизонта почвы активность уреазы существенно снизилась и оказалась ниже, чем в этом слое литострата.

Таким образом, литостат карбонатный хорошо обеспечен подвижными соединениями фосфора, калия и кальция (карбонатов), но в нем мало органического вещества и понижена активность уреазы и инвертазы, по сравнению с фоновой темногомусовой почвой.

Верхний (0–20 см) и нижний (20–40 см) слои литострата не отличались по исследуемым агрохимическим и биохимическим свойствам (при уровне значимости $P < 0.05$), что связано с гомогенностью отсыпанного грунта и малой продолжительностью периода для развития признаков начального почвообразования. В условиях гумидного климата для формирования маломощных почв из ТПО потребовалось несколько десятилетий; в основе механизма формирования “эмбриозема” находится трансформация свежего органического вещества при участии микроорганизмов (Пастухов, 2013).

Для оценки экологического состояния нарушенных почв одним из наиболее информативных показателей является реакция высших растений (Терехова, 2022). Результаты фитотестирования литострата подтвердили ранее полученные нами данные об ответной реакции кресс-салата на нефтезагрязнение (Еремченко и др., 2022; Сапцын, Еремченко, 2023). Относительно невысокое содержание остаточных нефтепродуктов (60–140 мг/кг) отрицательно повлияло на длину и массу растений кресс-салата (рис. 4). Согласно уравнению регрессии, адекватному полученным данным, при наименьшем загрязнении нефтепродуктами (60 мг/кг почвы) надземная масса растений кресс-салата составляла 22.6 мг, а при загрязнении 140 мг/кг почвы масса снижалась на 19%, – до 18.3 мг. Токсичность остаточных нефтепродуктов может быть обусловлена прямым воздействием на биоту, а также косвенным – через ухудшение водно-физических, воздушных и других свойств

почвы (Хазиев и др., 1988; Исмаилов, 1988; Киреева и др., 2009; Тишин, 2020).

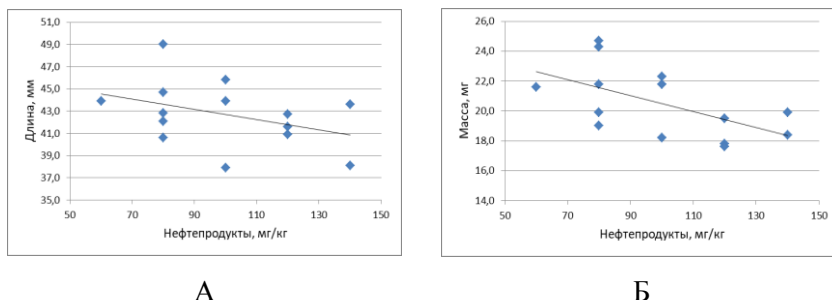


Рис. 4. Влияние остаточных нефтепродуктов в литострате на длину (А) кресс-салата ($y = 47.3 - 0.046x$; критерий Фишера $F = 2.17$; коэффициент корреляции $R = -0.39$; уровень значимости $P = 0.0484$) и массу (Б) растений ($y = 25.8 - 0.053x$; $F = 5.92$; $R = -0.58$; $P = 0.0001$).

Fig. 4. The influence of residual oil products in the lithostrate on the length (А) of watercress ($y = 47.3 - 0.046x$; Fisher test $F = 2.17$; correlation coefficient $R = -0.39$; significance level $P = 0.0484$) and (Б) plants weight ($y = 25.8 - 0.053x$; $F = 5.92$; $R = -0.58$; $P = 0.0001$).

Статистически значимых зависимостей между свойствами литострата и количеством остаточных нефтепродуктов, а также между содержанием остаточных нефтепродуктов и ферментативной активностью не установлено.

Внутри каждого поля существует более или менее выраженная неоднородность физических, химических и агрохимических свойств почвы (Важенин и др., 1961; Robert, 2002; Вальков и др., 2004). Информация о внутренней структуре почвенного покрова конкретного угодья востребована при внедрении технологий точного земледелия (Robert, 2002; Шпаар и др., 2009; Денисов и др., 2016). Для характеристики изучаемого свойства почв, кроме среднего значения, крайне важна оценка пространственного варьирования показателя. Простым индикатором изменчивости почвенных свойств служит коэффициент вариации (Дмитриев, 1995; Вальков и др., 2004; Gurevitch, Larty, 2001; Вальков и др., 2004; Oldfield et al., 2019; Самсонова, Мешалкина, 2020). В нашем слу-

чае степень однородности свойств отсыпанного при рекультивации грунта определяет биологический потенциал восстановления экосистемы на рекультивированном участке.

Коэффициенты вариации агрохимических и биохимических свойств на обследованной территории находились в диапазоне 1–52% (рис. 5).

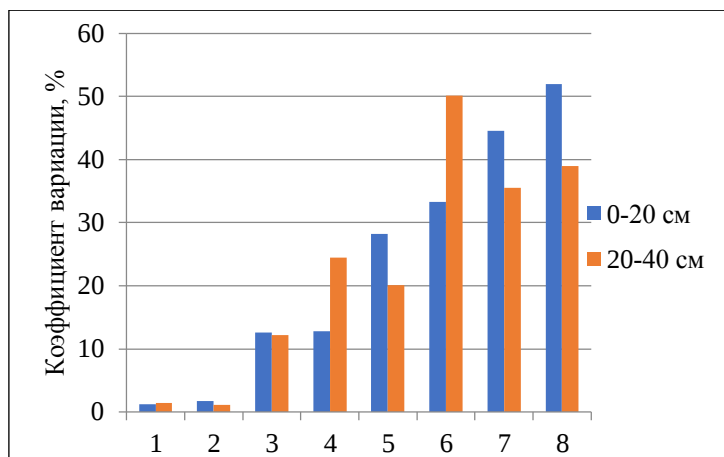


Рис. 5. Коэффициенты вариации агрохимических и биохимических свойств литострата: 1 – $pH_{\text{вод}}$, 2 – активность каталазы, 3 – активность инвертазы, 4 – содержание подвижного калия, 5 – содержание нефтепродуктов, 6 – содержание органического углерода, 7 – содержание подвижных фосфатов, 8 – активность уреазы.

Fig. 5. Coefficients of variation of agrochemical and biochemical properties of lithostrate: 1 – pH_{water} , 2 – catalase activity, 3 – invertase activity, 4 – content of mobile potassium, 5 – content of petroleum products, 6 – content of organic carbon, 7 – content of mobile phosphates, 8 – urease activity.

По степени относительной изменчивости внутри участка агрохимические показатели в слое 0–20 см составили ряд: $pH < K < C_{\text{орг}} < P_2O_5$. В слое 20–40 см варьирование содержания органического углерода оказалось выше, чем у подвижных фосфатов: $pH < K < P_2O_5 < C_{\text{орг}}$. Ранжирование агрохимических свойств литострата по степени варьирования в целом соответствует ранее проведен-

ному ранжированию свойств дерново-подзолистых почв (Самсонова, 2008; Самсонова и др., 2017), а также почв юга России (Вальков и др., 2004). Ученые отмечали, что реакция почвенной среды относится к группе инвариантных свойств, в группу наиболее изменчивых свойств входят подвижные фосфаты. Среднее положение по величине коэффициентов вариации, как правило, занимает варьирование гумуса и обменного калия.

В пределах рекультивированного участка установлены различия в изменчивости активности почвенных ферментов (рис. 4). Каталазная активность литострата в слоях 0–40 см и в границах рекультивированного участка оказалась самым инвариантным показателем, что указывает, по всей вероятности, на однородность условий обитания аэробных микроорганизмов, продуцирующих каталазу (Stpniewska et al., 2009).

Отмечена относительно низкая изменчивость (коэффициенты вариации около 12%) инвертазной активности в обоих слоях литострата, что, по-видимому, отражает одинаковую интенсивность процессов микробного расщепления углеводов, в которых участвует инвертаза (Звягинцев, 1978; Frankeberger, Johanson, 1983).

Повышенной изменчивостью в литострате отличилась урезная активность, особенно, в слое 0–20 см. Значительная вариабельность этого важнейшего участника азотного обмена проявилась на фоне низкого содержания органического вещества (см. табл. 1), судя по всему, связана с общей обедненностью литострата азотсодержащими соединениями.

При комплексной оценке нефтезагрязненных почв применяют интегральные показатели биологической активности и/или индекса фитотоксичности (Киреева и др., 2001; Девятова, 2005; Шарапова и др., 2015). Способность литострата реализовать экологические функции почвы оценили по совокупности агрохимических (ресурсных) и биологических (биохимических и фитопригодных) свойств; для этого применили метод математической оптимизации, ранее использованный нами для оценки состояния нефтезагрязненных почв (Баландина, Еремченко, 2018; Сапцын, Еремченко, 2023).

Из выборки полученных данных по свойствам почвы и литострата ($x_1, x_2, x_3, x_4, \dots x_n$) выбрали оптимум – минимальное ($x_{\min}$) или максимальное ($x_{\max}$) значение. В качестве оптимума для показателей длины, массы тест-культуры, подвижных фосфатов и калия, активности ферментов использованы максимальные значения ($x_{\max}$). В качестве оптимального pH выбрали значение наиболее близкое к нейтральной реакции почвенной среды (pH 7). В качестве оптимума для редокс-активности кресс-салата взяли минимальный показатель ($x_{\min}$), потому что на нефтезагрязнение растения отвечали накоплением соединений с восстановительной активностью (Киреева и др., 2009; Еремченко, Митракова, 2017; Сапцын, Еремченко, 2023). Относительно оптимума рассчитали нормированные показатели: $x_k = x_{\min} / x_n$, или $x_k = x_n / x_{\max}$. Путем сложения нормированных показателей (x_k) получили критерий оптимизации для фоновой почвы и каждого опробования литострата (табл. 3, 4). При данном формализованном подходе учитывался комплекс экологически важных свойств. Согласно А.С. Яковлеву (2022) при оптимальном состоянии почвы достигается максимально возможная реализация экологических функций, следовательно, по размерности коэффициента оптимизации можно оценить экологический потенциал нарушенной почвы (литострата).

Максимальный коэффициент оптимизации свойств установили для верхней части темного гумусового горизонта почвы, в котором самые высокие нормированные показатели органического углерода, обеспеченности фосфатами и ферментативной активности. Коэффициенты оптимизации литострата в слое 0–20 см ниже на 4–25%, а в слое 20–40 см ниже на 1–14%, по сравнению с коэффициентами оптимизации соответствующих слоев темного гумусового горизонта (табл. 3, 4).

Литострат характеризовался повышенной пригодностью для выращивания тест-культуры, на что указывали более высокие нормированные показатели высоты и массы кресс-салата. Развитию кресс-салата на литострате благоприятствовали отсутствие кислотности, обеспеченность фосфатами, калием, кальцием.

Таблица 3. Нормированные показатели и коэффициенты оптимизации свойств темногогумусовой почвы и литострата в слое 0–20 см

Table 3. Normalized indicators and coefficients for optimizing the properties of dark-humus soil and lithostratum by layer 0–20 cm

Показатели		Почва	Литострат						
			№ пробы						
			1	2	3	4	5	6	7
pH _{вод}		0.93	0.97	0.94	0.95	0.95	0.94	0.93	0.95
C _{орг} , %		1	0.08	0.32	0.30	0.58	0.59	0.27	0.43
Подвижные	P ₂ O ₅	1	0.90	0.14	0.72	0.83	0.88	0.64	0.70
	K	0.24	0.83	0.86	0.89	0.80	0.86	0.58	0.80
Активность	каталазы	0.99	0.96	0.99	0.99	0.96	1	1	0.98
	уреазы	1	0.19	0.23	0.52	0.41	0.56	0.29	0.89
	инвертазы	1	0.34	0.33	0.40	0.27	0.36	0.30	0.35
Тест-культура	длина	0.67	0.90	0.78	0.77	0.89	0.89	0.91	0.85
	масса	0.64	0.88	0.75	0.74	0.88	0.81	0.88	0.72
	редокс-активность	0.87	0.64	0.94	0.85	1	0.70	0.91	0.55
Коэффициент оптимизации		8.91	7.22	6.65	7.67	8.51	7.95	7.52	7.67

Таблица 4. Нормированные показатели и коэффициенты оптимизации свойств темногогумусовой почвы и литострата в слое 20–40 см

Table 4. Normalized indicators and coefficients for optimizing the properties of dark-humus soil and lithostratum by layer 20–40 cm

Показатели		Почва	Литострат						
			№ пробы						
			1	2	3	4	5	6	7
pH _{вод}		1	0.96	0.94	0.92	0.93	0.93	0.92	0.94
C _{орг} , %		0.97	0.32	0.25	0.21	0.47	0.56	0.33	0.31
Подвижные	P ₂ O ₅	0.69	0.61	0.05	0.64	0.77	0.74	0.57	0.74
	K	0.27	0.80	1	0.69	0.72	0.91	0.44	0.97
Активность	каталазы	0.98	0.98	1	0.99	0.97	0.99	0.98	0.98
	уреазы	0.22	0.68	0.70	0.67	0.81	0.39	0.24	0.41
	инвертазы	0.89	0.35	0.32	0.37	0.33	0.31	0.25	0.36
Тест-культура	длина	0.62	0.86	0.87	0.83	0.87	0.84	1	0.93
	масса	0.54	0.86	0.81	0.77	0.79	0.71	1	0.91
	редокс-активность	0.95	0.77	0.85	0.79	0.55	0.94	0.79	0.68
Коэффициент оптимизации		8.91	7.96	7.89	7.48	7.58	6.84	7.77	7.21

Одновременно пониженные нормированные коэффициенты и, соответственно, повышенные значения редокс-активности кресс-салата наблюдали при выращивании на некоторых пробах из слоя 0–20 см литострата (табл. 3) и почти на всех пробах из слоя 20–40 см (табл. 4).

Вероятно, аккумуляция соединений с восстановленной активностью в листьях тест-культуры связана с присутствием остаточных нефтепродуктов в литострате; так, усиление нефтезагрязненности дерново-подзолистой почвы сопровождалось окислительным стрессом и повышением редокс-активности кресс-салата (Сапцын, Еремченко, 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате технической рекультивации нефтезагрязненная темногомусовая почва была уничтожена до глубины около 60 см. На рекультивированном участке площадью около 0.73 га путем отсыпки суглинистого карбонатного грунта слоем около полуметра сформирован литострат карбонатный, характеризующийся относительной однородностью агрохимических и биохимических свойств.

Согласно комплексной оценке (на основе расчетных коэффициентов оптимизации свойств) ресурсный и экологический потенциал поверхностного слоя литострата мощностью 0–40 см уступает фоновой темногомусовой почве. С остаточным содержанием нефтепродуктов в количестве 60–140 мг/кг связана некоторая фитотоксичность литострата, проявившаяся в физиолого-биохимических показателях тест-культуры. Низкая активность почвенных ферментов (уреазы и инвертазы) обусловлена недостатком органического вещества в литострате. Агрохимические свойства литострата (слабощелочная реакция среды, повышенная обеспеченность подвижными фосфатами, калием, кальцием) указывали на удовлетворительный потенциал к восстановлению травяной экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландина А.В., Еремченко О.З. Динамика численности микроорганизмов в нефтезагрязненной дерново-карбонатной почве в

- процессе ремедиации // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2018. № 3. С. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2018-3-301-307>.
2. *Важенин И.Г., Музычкин Е.Т., Прохорова З.А., Алешина Т.Н.* О методике составления крупномасштабных почвенно-агрохимических картограмм в целях применения удобрений // Почвоведение. 1961. № 4. С. 1–13.
3. *Вальков В.Ф., Елисеева Н.В., Имгрунт И.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Справочник по оценке почв. Майкоп: ГУРИПП “Адыгея”, 2004. 236 с.
4. *Девятова Т.А.* Биологические принципы мониторинга и диагностики загрязнения почв // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2005. № 1. С. 105–106.
5. *Денисов К.Е., Петров К.А., Григорьев Н.С.* Повышение экономической эффективности растениеводства на основе дифференцированного внесения удобрений в системе точного земледелия // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 5-2. С. 72–76.
6. *Еремченко О.З., Сапцын Р.В., Ложкина Е.А., Тыршу Е.В.* Оценка эффективности рекультивации нефтезагрязненных почв // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2022. № 1. С. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-1-64-71>.
7. *Звягинцев Д.Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
8. *Исмаилов Н.М.* Микробиология и ферментативная активность нефтезагрязнённых почв // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 42–57.
9. *Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М.* Биологическая активность нефтезагрязнённых почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.
10. *Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Григориади А.С.* Влияние загрязнения почв нефтью на физиологические показатели растений и ризосферную микробиоту // Агрохимия. 2009. № 7. С. 71–80.
11. Классификация и диагностика почв России / Под ред. *Добровольского Г.В.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
12. *Курбатов Ю.Н., Скрипченко Л.С., Трифонова Т.А.* Исследование влияния нефтяного загрязнения на каталазную активность почвы // Проблемы экологического образования в XXI веке. 2019. С. 308–313.
13. Об утверждении Порядка и мер охраны редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края, перечня редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края:

Постановление Правительства Пермского края № 447-п (утв. Губернатором Пермского края 27.05.2022.

14. *Пастухов А.В.* Проблемы классификации и диагностики техногенных почв при составлении крупномасштабных карт // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 74–80.

15. Патент РФ № 2620555. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов / *О.З. Еремченко, Н.В. Митракова*. По заявке № 2016113050. Оpubл. 26.05. 2017.

16. *Самсонова В.П.* Пространственная изменчивость почвенных свойств на примере дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во “ЛКИ”, 2008. 156 с.

17. *Самсонова В.П., Кротов Д.Г., Лавринова Е.Ю.* Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // Агрохимия. 2017. № 7. С. 11–18.

18. *Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л.* Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 164–182. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>.

19. *Сапцын Р.В., Еремченко О.З.* Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2023. № 4. DOI: <https://doi.org/10.51419/202134410>.

20. *Терехова В.А.* Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 586–599. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X220500>.

21. *Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кулачкова С.А., Горленко М.В., Учанов П.В., Сушко С.В., Ананьева Н.Д.* Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов // Почвоведение. 2021. № 3. С. 372–384.

22. *Тишин А.С.* Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 12 (102). Ч. 2. С. 78–83.

23. *Тонконогов В.Д.* Первая русская версия мировой коррелятивной базы почвенных ресурсов (WRB) // Почвоведение. 2008. № 6. С. 751–754.

24. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

25. *Хазиев Ф.Х., Тишкина Е.И., Киреева Н.А., Кузяхметов Г.Г.* Влияние нефтяного загрязнения на некоторые компоненты агроэкосистемы // Агрохимия. 1988. № 2. С. 56–61.

26. *Шарапова И.Э., Лантева Е.М., Маслова С.П., Табаленкова Г.И., Гарабаджигу А.В.* Использование интегрального коэффициента

биологической активности почвы и индекса фитотоксичности для оценки фиторемедиации нефтезагрязнённых почв // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 67–73.

27. *Шпаар Д., Захаренко А.В., Якушев В.П.* Точное сельское хозяйство. СПб., Пушкин, 2009. 397 с.

28. *Щербакова Т.А.* Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества. Минск, 1983. 222 с.

29. *Яковлев А.С.* Вопросы экологического нормирования и установления фоновых значений свойств почв природных и природно-антропогенных объектов // Почвоведение. 2022. № 2. С. 252–260.

30. *Яковлева А.С., Евдокимова М.В.* Подход к установлению зон экологической ответственности предприятий и уровней природно-антропогенного фона почв // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1167–1178.

31. *Adhikari K., Hartemink A.E.*, Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*. 2016. Vol. 262. P.101–111.

32. *Frankeberger W.T., Johanson J.B.* Method of measuring invertase activity in soils // *Plant and soil*. 1983. Vol. 74. P. 301–311.

33. *Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A.* Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass // *Soil Biology & Biochemistry*. 2000. Vol. 32. P. 1907–1913.

34. *Gracheva R.G.* Genetic and substantive soil classifications and their applicability in geobotanical research // *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*. 2019. Vol. 149. P. 55–64.

35. *Gurevitch J., Larry V.H.* Meta-analysis: combining the results of independent experiments // *Design and analysis of ecological experiments*. Oxford.USA. 2001. P. 378–398.

36. *Kimes N.E., Callaghan A.V., Suflita J.M., Morris P.J.* Microbial transformation of the Deepwater Horizon oil spill – past, present, and future perspectives. *Front. Microbiol.* 2014. Vol. 5. 603 p.

37. *Kocak B.* Importance of urease activity in soil // V International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Health. 2020. P. 51–60.

38. *Liu J., Niu J., Yin L., Jiang F.* In situ encapsulation of laccase in nanofibers by electrospinning for development of enzyme biosensors for chlorophenol monitoring // *Analyst*. 2011. Vol. 136. P. 4802–4808.

39. *Maila M.P., Cloete T.E.* The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants – perspectives to monitoring hydrocarbon contamination: a review // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2005. Vol. 55. P. 1–8.

40. *Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A.* Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. 2019. Vol. 5. No.1. P. 15–32.

41. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil // *Environ. Monit.* 2009. Vol. 165. P. 193–203.
42. Polyak Y.M., Bakina G.L., Chugunova M.V., Mayachkina N.V. Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil-A field study // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2018. Vol. 126. P. 57–68.
43. Riveroll-Larios J., Escalante-Espinosa E., Fócil-Monterrubio R.L., Díaz-Ramírez I.J. Biological activity assessment in Mexican tropical soils with different hydrocarbon contamination histories // *Water Air Soil Pollut.* 2015. Vol. 226. No. 10. 353 p.
44. Robert P.C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management // *Plant Soil*. 2002. Vol. 247. P. 143–149.
45. Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L. Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China // *Plant Soil Environ.* 2008. Vol. 54. No. 8. P. 341–346.
46. Soldatkin O.O., Kucherenko I.S., Pyeshkova V.M., Kukla A.L., Jaffrezic-Renault N., Elskaya A.V., Dzyadevych S.V., Soldatkin A.P. Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions // *Bioelectrochem.* 2012. Vol. 83. P. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2011.08.001>.
47. Stroud J.L., Paton G.I., Semple K.T. Microbe- aliphatic hydrocarbon interactions in soil: implications for biodegradation and bioremediation // *Journal of Applied Microbiology*. 2007. Vol. 102.5. P. 1239–1253.
48. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – *World Soil Resources Reports №106*. Rome: FAO, 2015. 203 p.
49. Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2016. Vol. 107. P. 158–164.
50. Zhao Z., Jiang H. Enzyme-based electrochemical biosensors // *Biosensors / Serra P.A. (Ed.). Croatia: Intech*, 2010. P. 1–22.

REFERENCES

1. Balandina A.V., Eremchenko O.Z., Dynamics of the number of microorganisms in oil-contaminated sod-carbonate soil during remediation, *Bulletin of Perm University. Series: Biology*, 2018, No. 3, pp. 301–30, DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2018-3-301-307>. (In Russ.)
2. Vazhenin I.G., Muzychkin E.T., Prokhorova Z.A., Aleshina T.N., On the

methodology for compiling large-scale soil-agrochemical cartograms for the purpose of using fertilizers, *Eurasian Soil Science*, 1961, No. 4, pp. 1–13. (In Russ.)

3. Val'kov V.F., Eliseeva N.V., Imgrunt I. Iyu, Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., *Soil assessment handbook*, Maikop: GURIPP “Adygeya”, 2004, 236 p. (In Russ.)

4. Devyatova T.A., Biological principles of monitoring and diagnostics of soil pollution, *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2005, No. 1, pp. 105–106. (In Russ.)

5. Denisov K.E., Petrov K.A., Grigor'ev N.S., Increasing the economic efficiency of crop production based on differentiated application of fertilizers in a precision farming system, *Science yesterday, today, tomorrow*, 2016, No. 5, pp. 72–76. (In Russ.)

6. Eremchenko O.Z., Saptsyn R.V., Lozhkina E.A., Tyrshu E.V., Assessment of performance of oil-contaminated soil reclamation, *Bulletin of Perm University. Series: Biology*, 2022, No. 1, pp. 64–71, DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-1-64-71>. (In Russ.)

7. Zvyagintsev D.G., Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators, *Eurasian Soil Science*, 1978, No. 6, pp. 48–54. (In Russ.)

8. Ismailov N.M., Microbiology and enzymatic activity of oil-contaminated soils, In: *Restoration of Oil-Contaminated Soil Ecosystems*, Moscow: Nauka, 1988, pp. 42–57. (In Russ.)

9. Kireeva N.A., Vodop'yanov V.V., Miftakhova A.M., *Biological activity of oil-contaminated soils*, Ufa: Gilem, 2001, 376 p. (In Russ.)

10. Kireeva N.A., Novoselova E.I., Grigoriadi A.S., The influence of soil pollution with oil on the physiological parameters of plants and rhizosphere microbiota, *Agricultural Chemistry*, 2009, No. 7, pp. 71–80. (In Russ.)

11. Dobrovolsky G.V., *Classification and diagnostics of soils in Russia*, Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p. (In Russ.)

12. Kurbatov Yu.N., Skripchenko L.S., Trifonova T.A., Study of the influence of oil pollution on catalase activity of soil, *Problems of environmental education in the XXI century*, 2019, pp. 308–313. (In Russ.)

13. On approval of the Procedure and measures for the protection of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of Perm Krai, the list of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of Perm Krai: Resolution of the Government of Perm Krai No. 447-p (approved by the Governor of Perm Krai on May 27, 2022. (In Russ.)

14. Pastukhov A.V., Problems of classification and diagnostics of technogenic soils when compiling large-scale maps, *Theoretical and Applied Ecology*, 2013, No. 2, pp. 74–80. (In Russ.)

15. Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V., Russian Federation Patent No. 2620555. *Method for assessing the biological activity and toxicity of soils and technogenic soil grounds*. Application No. 2016113050. Published. May 26, 2017. (In Russ.)
16. Samsonova V.P., *Spatial variability of soil properties using the example of soddy-podzolic soils*, Moscow: Izd-vo "LKI", 2008, 156 p. (In Russ.)
17. Samsonova V.P., Krotov D.G., Lavrinova E.Yu., Spatial variability of agrochemical properties of agricultural land in the Bryansk region, *Agricultural Chemistry*, 2017, No. 7, pp. 11–18. (In Russ.)
18. Samsonova V.P., Meshalkina J.L., Common inaccuracies and errors in the application of statistical methods in soil science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 102, pp. 164–182, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>. (In Russ.)
19. Sapsyn R.V., Eremchenko O.Z., Indicators of the ecological and biological state of oil-contaminated soddy-podzolic soil, *AgroEcoInfo Electronic science-productive magazine*, 2023, No. 4 (58). (In Russ.)
20. Terekhova V.A., Bioassay of Soil Ecotoxicity under Chemical Pollution: Modern approaches to integration for the ecological state (review), *Eurasian Soil Science*, 2022, No. 5, pp. 586–599, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X220500>. (In Russ.)
21. Terekhova V.A., Prudnikova E.V., Kulachkova S.A., Gorlenko M.V., Uchanov P.V., Sushko S.V., Anan'eva N.D., Microbiological indicators of heavy metals and carbon-containing preparations introduction to agrosoddy-podzolic soils differing in humus content, *Eurasian Soil Science*, 2021, No. 3, pp. 372–384. (In Russ.)
22. Tishin A.S., Phytotesting of soils contaminated with petroleum products, *International Scientific Research Journal*, 2020, No. 12 (102), Vol. 2, pp. 78–83. (In Russ.)
23. Tonkonogov V.D., The first Russian version of the World Reference Base for Soil Resources (WRB), *Eurasian Soil Sc.*, 2008, No. 41, pp. 660–663, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229308060112>.
24. Khaziev F.Kh., *Methods of soil enzymology*, Moscow, Nauka, 2005, 252 p. (In Russ.)
25. Khaziev F.Kh., Tishkina E.I., Kireeva N.A., Kuzyakhmetov G.G., The impact of oil pollution on some components of the agroecosystem, *Agricultural Chemistry*, 1988, No. 2, pp. 56–61. (In Russ.)
26. Sharapova I.E., Lapteva E.M., Maslova S.P., Tabalenkova G.I., Garabadzhiu A.V., Using the integral coefficient of soil biological activity and the phytotoxicity index to assess phytoremediation of oil-contaminated soils, *heoretical and Applied Ecology*, 2015, No. 2, pp. 67–73. (In Russ.)
27. Shpaar D., Zakharenko A.V., Yakushev V.P., *Precision Agriculture*, Saint-

Petersburg, Pushkin, 2009, 397 p. (In Russ.)

28. Shcherbakova T.A., *Enzymatic activity of soils and transformation of organic matter*, Minsk, 1983, 222 p. (In Russ.)

29. Yakovlev A.S., Issues of ecological regulation and establishment of background values of soils of natural and natural anthropogenic objects, *Eurasian Soil Sc.*, 2022, Vol. 55, pp. 262–268, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322020144>.

30. Yakovlev A.S., Evdokimova M.V., Approach to establishment of enterprises environmental responsibility zones and natural-anthropogenic background soil values, *Eurasian Soil Sc.*, 2022, Vol. 55, 1295–1305, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322090150>.

31. Adhikari K., Hartemink A.E., Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, Vol. 262, pp. 101–111.

32. Frankeberger W.T., Johanson J.B., Method of measuring invertase activity in soils, *Plant and soil.*, 1983, Vol. 74., pp. 301–311.

33. Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A., Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass, *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, Vol. 32, pp. 1907–1913.

34. Gracheva R.G., Genetic and substantive soil classifications and their applicability in geobotanical research, *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*, Vol. 149, 2019, pp. 55–64.

35. Gurevitch J., Hedges V.L., Meta-analysis: combining the results of independent experiments, *Design and analysis of ecological experiments*, Oxford, USA, 2001, pp. 378–398.

36. Kimes N.E., Callaghan A.V., Suflita J.M., Morris P.J., Microbial transformation of the Deepwater Horizon oil spill – past, present, and future perspectives, *Front. Microbiol.*, 2014, Vol. 5, 603 p.

37. Kocak B., Importance of urease activity in soil, *V International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Health*, 2020, pp. 51–60.

38. Liu J., Niu J., Yin L., Jiang F., In situ encapsulation of laccase in nanofibers by electrospinning for development of enzyme biosensors for chlorophenol monitoring, *Analyst*, 2011, Vol. 136, pp. 4802–4808.

39. Maila M.P., Cloete T.E., The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants – perspectives to monitoring hydrocarbon contamination: a review, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, Vol. 55, 2005, pp. 1–8.

40. Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A., Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields, *Soil*, 2019, Vol. 5, No. 1, pp. 15–32.

41. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A., Microbial activities and trace element contents in an urban soil, *Environ. Monit.*, 2009, Vol. 165,

pp. 193–203.

42. Polyak Y.M., Bakina L.G., Chugunova M.V., Mayachkina N.V., Gerasimov A.O., Bure V.M., Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil – A field study, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 126, 2018, pp. 57–68.

43. Riveroll-Larios J., Escalante-Espinosa E., Fócil-Monterrubio R.L., Díaz-Ramírez I.J., Biological activity assessment in Mexican tropical soils with different hydrocarbon contamination histories, *Water Air Soil Pollut.*, 2015, Vol. 226, No. 10, 353 p.

44. Robert P.C., Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management, *Plant Soil*, 2002, Vol. 247, pp. 143–149;

45. Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L., Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China, *Plant Soil Environ*, 2008, Vol. 54, No. 8, pp. 341–346.

46. Soldatkin O.O., Kucherenko I.S., Pyeshkova V.M., Kukla A.L., Jaffrezic-Renault N., Elskaya A.V., Dzyadevych S.V., Soldatkin A.P., Novel conductometric biosensor based on three-enzyme system for selective determination of heavy metal ions, *Bioelectrochem*, 2012, Vol. 83, pp. 25–30.

47. Stroud J.L., Paton G.I., Semple K.T., Microbe- aliphatic hydrocarbon interactions in soil: implications for biodegradation and bioremediation, *Journal of Applied Microbiology*, 2007, Vol. 102 (5), pp. 1239–1253.

48. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – *World Soil Resources Reports*, No. 106, Rome: FAO, 2015, 203 p.

49. Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L., Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, Vol. 107, 2016, pp. 158–164.

50. Zhao Z., Jiang H., Enzyme-based electrochemical biosensors, In: *Biosensors*, Serra P.A. (Ed.), Croatia: Intech, 2010, pp. 1–22.