

Респираторная активность и деструкция нефтепродуктов в почвах, содержащих гранулированный осадок сточных вод

© 2026. А. А. Утомбаева, аспирант, м. н. с.,
 А. А. Вершинин, к. б. н., с. н. с., Э. Р. Зайнулгабидинов, к. б. н., с. н. с.,
 А. М. Петров, к. б. н., в. н. с., зав. лабораторией,
 Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,
 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,
 e-mail: semionova.alin@yandex.ru

Нефтяное загрязнение почв является одной из наиболее серьёзных экологических проблем, требующих разработки эффективных и экономичных методов рекультивации. Биологические методы, в частности биоремедиация с использованием органических мелиорантов, представляют особый интерес, так как позволяют активировать аборигенную микробиоту и ускорить разложение поллютантов. Одним из перспективных материалов для биоремедиации нефтезагрязнённых почв может служить термически обработанный гранулированный осадок городских сточных вод (гранулят). Он содержит микроорганизмы, органические и биогенные вещества, что требует оценки его эффективности при рекультивации нефтезагрязнённых почв. Впервые в модельном эксперименте изучено влияние различных доз гранулированного осадка сточных вод на параметры процесса рекультивации нефтезагрязнённой серой лесной почвы: дыхательную активность, эколого-физиологическое состояние микробного пула и эффективность деструкции нефтепродуктов (НП). Исследование охватило три подхода: техническую, микробиологическую и фито-микробиологическую рекультивацию. По результатам исследования установлено, что внесение гранулята в дозах 2 и 4 % достоверно усиливает базальное и субстрат-индуцированное дыхание загрязнённой почвы, причём максимальная эмиссия CO₂ наблюдалась в опытах по фито-микробиологической рекультивации с 4 % гранулята. Показано, что применение гранулята в образцах с низким содержанием НП (до 3,7 г/кг) не интенсифицировало их деструкцию. Наибольшая эффективность деструкции НП (снижение содержания на 69–79 % от исходного) была достигнута при концентрации загрязнителя 4,4–15,4 г/кг в опыте по микробиологической рекультивации с 2 % гранулята. Сделан ключевой вывод, что для почв с содержанием НП более 3,7 г/кг внесение 2 % гранулированного осадка обеспечивает оптимальное соотношение «эффективность деструкции / эмиссия CO₂», приводя к максимальному разложению загрязнителя при минимальном росте выбросов углекислого газа. Выращивание высших растений не приводило к значимому дополнительному эффекту, что указывает на перспективность применения технологически более простого микробиологического подхода с использованием 2 % гранулята при рекультивации нефтезагрязнённых почв.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, нефтепродукты, почвенное дыхание, гранулят, осадок сточных вод, биологическая рекультивация.

Soil respiratory activity and oil products degradation when adding granulated sewage sludge

© 2026. А. А. Utombaeva ORCID: 0000-0002-7407-9108, А. А. Verшинin ORCID: 0000-0002-1807-5727,
 Е. Р. Zainulgabidinov ORCID: 0000-0002-5372-9984, А. М. Petrov ORCID: 0000-0002-5117-2609,
 Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
 Use of Tatarstan Academy of Sciences,
 28, Daur'skaya St., Kazan, Russia, 420087,
 e-mail: semionova.alin@yandex.ru

Oil contamination of soils is one of the most serious environmental problems that require developing effective and cost-efficient remediation methods. Biological approaches, particularly bioremediation using organic ameliorants, are of special interest as they can activate the indigenous microflora and accelerate pollutant degradation. One promising material for the bioremediation of oil-contaminated soils is thermally treated granulated sewage sludge (granulate). It contains microorganisms, organic matter, and biogenic elements, which warrants an assessment of its efficacy in the remediation of oil-polluted soils. A model experiment was conducted for the first time studying the granulate effect on the remediation parameters of an oil-contaminated grey forest soil. These parameters included respiratory activity, the eco-physiological status of the microbial pool, and the efficiency of total petroleum hydrocarbon (TPH) degradation. The research encompassed three remediation approaches: technological, microbiological, and phyto-microbiological.

The study established that 2 % and 4 % granulate application significantly enhanced both the basal and substrate-induced respiration of the contaminated soil. The maximum CO₂ emission was observed in the phyto-microbiological remediation trials with 4 % granulate. It was shown that the use of granulate in samples with low TPH content (up to 3.7 g/kg) did not intensify their degradation. The highest TPH degradation efficiency (a 69–79 % reduction from the initial content) was achieved at a contaminant concentration of 4.4–15.4 g/kg in the microbiological remediation experiment with 2 % granulate. We conclude that the application of 2 % granulated sewage sludge provides an optimal “degradation efficiency / CO₂ emission” ratio for soils with a TPH content exceeding 3.7 g/kg. This leads to maximum pollutant breakdown with a minimal increase in carbon dioxide emissions. The cultivation of higher plants did not yield a significant additional effect, indicating the promise of applying the technologically simpler microbiological approach with 2 % granulate for the remediation of oil-contaminated soils.

Keywords: oil pollution, petroleum products, soil respiration, granulate, sewage sludge, biological remediation.

Обеспечение продовольственной безопасности, необходимость сохранения окружающей среды (ОС) в очередной раз поднимают вопрос о необходимости возврата деградированных, в том числе загрязнённых нефтью и нефтепродуктами почв в хозяйственный оборот. В связи с этим требуется поиск простых и эффективных приёмов восстановления плодородия, снижения вредного влияния поллютантов на природную среду. Методы биологической рекультивации (биоремедиации) экономически выгодны и за счёт повышения активности аборигенных и привнесённых микроорганизмов обеспечивают достаточно быстрое и эффективное окисление нефтяных углеводородов до простых, безопасных для ОС веществ. Анализ интенсивности почвенного дыхания позволяет оценить состояние и активность микробного пула, определить время восстановления агрохимических и биологических свойств почвы [1–3]. Посадка растений активизирует биохимические процессы, ускоряет деструкцию присутствующих в почве поллютантов [4–7].

Ранее нами была показана возможность использования гранулированного продукта (далее гранулят), полученного из обезвоженного и термически обработанного осадка муниципальных сточных вод г. Казани, при рекультивации нефтезагрязнённых почв [8]. Было установлено, что он содержит широкий спектр характерных для почв микроорганизмов, необходимые для развития растений органические вещества и биогенные элементы. Определено влияние гранулята в дозе 10 т/га на дыхательную активность, рост и продуктивность растений, эффективность деструкции нефтепродуктов в зависимости от их содержания и метода биологической рекультивации [9, 10].

С учётом необходимости сокращения сроков восстановительных мероприятий целесообразно рассмотреть влияние разных доз гранулята на скорость разложения нефтепро-

дуктов (НП), взаимосвязь деструкционных процессов с уровнем эмиссии CO₂ в атмосферу.

Цель работы – установить влияние обезвоженного и термически обработанного осадка городских сточных вод на дыхательную активность почвенных микроорганизмов и эффективность деструкции нефтепродуктов в процессе рекультивации загрязнённой нефтью почвы.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись серая лесная среднесуглинистая почва (gray forest soil) со следующими агрохимическими показателями: гумус – 4,4 %; C_{орг.} – 2,8 %; N_{вал.} – 0,21 %; (P₂O₅)_{вал.} – 0,07 %; (K₂O)_{подв.} – 8,1 мг/100г; (P₂O₅)_{подв.} – 10,3 мг/100г; рН_{вод.} – 6,25; обезвоженный и термически обработанный устойчивый к влаге и механическому воздействию гранулированный осадок сточных вод (ОСВ) с биологических очистных сооружений г. Казани (табл. 1).

Опытные образцы В1, В2, В3, В4 были получены путём внесения сернистой, парафинистой, смолистого типа нефти Ямашинского месторождения в высушенную до воздушно-сухого состояния почву из расчёта 12, 25, 45 и 60 г/кг, соответственно. Контролем служила незагрязнённая нефтью почва. В исследованиях применяли ёмкости высотой 9 см, содержащие по 0,4 кг почвы. Количество повторностей в каждом варианте опытов – 3. Далее контрольные и опытные образцы увлажняли дистиллированной водой до влажности 20–25 %. После месячной выдержки при температуре 19–25 °С, и еженедельном перемешивании почвенные образцы делили на 3 части, одну оставляли в исходном виде, а в две части вносили гранулят (2 или 4 %) и определяли в них содержание НП.

Исследования с разными дозами гранулята проводились отдельно и включали опыты по биологической (микробиологическая – опыты

Таблица 1 / Table 1

Основные характеристики гранулята осадка сточных вод
Main characteristics of sewage sludge granulate

Влажность, % Moisture, %	Органическое вещество, % Organic matter, %	Зольность, % Ash content, %	N _{общ.} , % N _{total} , %	P _{общ.} , % P _{total} , %	K _{общ.} , % K _{total} , %	P _{подв.} , мг/кг P _{mob.} , mg/kg	pH _{KCl}	Класс опасности Hazard class
6,3 ± 0,6	60,4 ± 0,9	39,6 ± 0,8	3,0 ± 0,2	1,5 ± 0,1	0,18 ± 0,03	2000 ± 400	6,2 ± 0,2	IV

Таблица 2 / Table 2

Начальное содержание нефтепродуктов в опытах с разными дозами гранулята
Oil products initial concentration in the experiments with different granulate content

Вариант Variant	Нефтепродукты, г/кг / Oil products, g/kg	
	2 % гранулята / granulate	4 % гранулята / granulate
K	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01
B1	2,7 ± 0,7	3,7 ± 0,9
B2	6,1 ± 1,5	7,5 ± 1,9
B3	14,4 ± 3,6	15,4 ± 3,9
B4	19,7 ± 4,9	19,2 ± 4,8

Примечание (здесь и далее): K, B1, B2, B3, B4 – опытные образцы с разным начальным содержанием нефтепродуктов (см. в тексте).

Note (here and below): K – control, and B1, B2, B3, B4 – test specimens, with an initial content of oil products 0, 12, 25, 45, and 60 g/kg, respectively.

M2 и M4; фито-микробиологическая – опыты ФМ2 и ФМ4) и технической (Т2 и Т4) рекультивации. В опытах по технической рекультивации в качестве контроля (К) использовали «чистую» почву, в опытах по биологической рекультивации контролем служила «чистая» почва, в которую был внесён гранулят в дозе 2 или 4 %. Начальное содержание НП в почвенных образцах перед опытами представлено в таблице 2.

Опыты по технической рекультивации предусматривали периодическое увлажнение и еженедельное перемешивание незагрязнённых и загрязнённых нефтью почвенных образцов. Их проводили одновременно с опытами по биологической рекультивации, которая предусматривала внесение гранулята, содержащего комплекс характерных для почв микроорганизмов [9]. В опытах по фито-микробиологической рекультивации дополнительно осуществляли посев и культивирование смеси высших растений ржи посевной (*Secale cereale* L.) и вики посевной (*Vicia sativa* L.).

Контрольные и опытные почвенные образцы инкубировали 6 недель при температуре 19–25 °С, влажности почвы 20–25 %, режиме освещения 16 ч в сутки (4000–4300 лк).

Опыты по фито-микробиологической рекультивации проводили по методике ГОСТ Р ИСО 22030-2009, согласно которой в каждую ёмкость высевали по 12 семян (6 семян ржи и 6 семян вики). Через 2 недели культиви-

рования, согласно методике, в каждой ёмкости оставляли по 6 растений (3+3), которые культивировали ещё в течение 4 недель. На 42 сутки растения удаляли, а почвенные образцы анализировали.

Интенсивность почвенного дыхания определяли газохроматографическим методом на хроматографе Хроматек-Кристалл 5000.2. Детектор – катарометр. Использовали колонку длиной 3,0 м, с внутренним диаметром 3 мм. Адсорбент HayesepN 80/100. Содержание CO₂ выражали в мкг CO₂/г воздушно-сухой почвы в час [11]. Для определения скорости базального дыхания ($V_{\text{базал.}}$) в пенициллиновые флаконы вносили 2 г почвы, 0,4 см³ стерильной воды и инкубировали в закрытом состоянии при температуре 22 °С в течение 22–24 ч [12]. При определении скорости субстрат-индуцированного дыхания ($V_{\text{сид.}}$) во флаконах воду заменяли 5 % раствором глюкозы (0,4 см³). Почвенные образцы инкубировали при температуре 22 °С в течение 120 мин [12]. Коэффициент микробного дыхания (Q_r) вычисляли, исходя из показателей базального и субстрат-индуцированного дыхания по формуле $Q_r = V_{\text{базал.}}/V_{\text{сид.}}$ [13].

Содержание НП в почвенных образцах определяли на анализаторе КН-2м ИК-спектрофотометрическим методом согласно ПНД Ф 16.1.2.2.22-98.

Для обработки статистической информации применяли программное обеспечение

Microsoft Office Excel 2010 и Statistica 2007. Были определены значения среднего арифметического и ошибки среднего ($M \pm m$), выполнена проверка достоверности различий с помощью U-критерия Манна-Уитни ($p \leq 0,05$) и рассчитан размер эффекта по D-Коэну [14, 15].

Результаты и обсуждение

Полученный из ОСВ гранулированный продукт содержит широкий перечень обогащающих почвы микроорганизмов, является органоминеральным удобрением, которое при внесении в почву активизирует биохимические процессы, ускоряет развитие растений, повышает их продуктивность при росте на деградированных и загрязнённых почвах [9, 16].

Попадание нефти в почву, как правило, приводит к усилению почвенного дыхания [1, 17, 18]. Эффект его усиления был отмечен и при выращивании редьки масличной для сидерации [19], что явилось основанием для проведения эксперимента по фитомикробиологической рекультивации.

Добавление гранулированного продукта в почву привело к повышению $V_{\text{базал.}}$ и $V_{\text{сид.}}$, которое было в целом пропорционально концентрации внесённого гранулята (табл. 3).

Характеризующие доступность субстрата показатели $V_{\text{базал.}}$ во всех вариантах опытов по технической рекультивации (Т2 и Т4) незначительно отличались друг от друга (D-Коэна $< 0,5$ и $D < 0,2$, соответственно), не превышали $11,7 \pm 0,2$ мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$, и были значительно ниже, чем в опытах по микробиологической и фитомикробиологической рекультивации (рис. 1).

В опытах по микробиологической рекультивации скорость базального дыха-

ния уступала таковой в опытах по фитомикробиологической рекультивации.

В опытах с дозой гранулята 4 % отмечен самый большой статистически достоверный рост $V_{\text{базал.}}$, доза гранулята 2 % в меньшей степени стимулировала почвенное дыхание. В поставленных опытах в вариантах с большим содержанием НП в почве фиксировалась самая высокая $V_{\text{базал.}}$, однако, в опыте по фитомикробиологической рекультивации при дозе гранулята 4 % в варианте, содержащем максимально испытанную концентрацию НП (19,2 г/кг), зарегистрировано снижение $V_{\text{базал.}}$ (рис. 1).

Субстрат-индуцированное дыхание отражает долю жизнеспособных микробных клеток в почвенном биоценозе. Определение данного показателя имеет прогностическое значение, поскольку позволяет судить об активности микробного пула и его потенциале [20–22]. В опытах Т2 и Т4 уровень $V_{\text{сид.}}$ практически не зависел от содержания поллютанта и имел близкие к незагрязнённым нефтью (контрольным) почвенным образцам значения (D-Коэна $< 0,2$) (рис. 2). В вариантах В2 и В3 данного опыта с концентрацией поллютанта 6,1 и 14,4 г/кг скорость субстрат-индуцированного дыхания была достоверно в 1,4 и 1,1 раза выше, а в варианте В4 (НП – 19,7 г/кг) на 30 % ниже, чем в контроле. В опыте ФМ2 в вариантах В1–В3 (НП – 2,7–14,4 г/кг) $V_{\text{сид.}}$ была в 1,9–2,0 выше, в В4 (НП – 19,7 г/кг) в 1,4 раза выше, чем в контроле (эффект по D-Коэну $> 4,0$).

Внесение в почву гранулята в дозе 4 % приводило к повышению активности микробного пула. Наибольшие значения $V_{\text{сид.}}$ ($120,2 \pm 1,6$ и $123,1 \pm 1,4$ мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$) наблюдались в вариантах В3 и В4 опыта М4, содержащих 15,4 и 19,2 г/кг НП. В опыте

Таблица 3 / Table 3

Начальные значения $V_{\text{базал.}}$ и $V_{\text{сид.}}$ почвенных образцов до и после внесения гранулята (мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$)
 $V_{\text{базал.}}$ and $V_{\text{сид.}}$ initial values in soil samples before and after granulate application ($\mu\text{g CO}_2/\text{g}\cdot\text{h}$)

Вариант Variant	2 % гранулята / granulate						4 % гранулята / granulate					
	$V_{\text{базал.}} / V_{\text{базал.}}$			$V_{\text{сид.}} / V_{\text{сид.}}$			$V_{\text{базал.}} / V_{\text{базал.}}$			$V_{\text{сид.}} / V_{\text{сид.}}$		
	Т	М	ФМ	Т	М	ФМ	Т	М	ФМ	Т	М	ФМ
	Т	М	PhM	Т	М	PhM	Т	М	PhM	Т	М	PhM
К	3,2	28,7	28,7	12,8	53,4	53,4	3,0	54,4	54,4	17,1	128,5	128,5
В1	5,9	33,6	33,6	19,5	100,4	100,4	5,8	63,2	63,2	19,6	201,4	201,4
В2	6,5	31,1	31,1	22,4	88,8	88,8	6,1	55,6	55,6	23,0	164,6	164,6
В3	8,4	38,5	38,5	27,6	97,1	97,1	6,0	54,8	54,8	22,4	150,1	150,1
В4	9,6	42,0	42,0	32,9	78,9	78,9	5,8	53,3	53,3	22,0	95,1	95,1

Примечание: Т – значения до внесения гранулята; М, ФМ – значения после внесения гранулята.

Note: $V_{\text{базал.}}$ – basal respiration; $V_{\text{сид.}}$ – substrate-induced respiration; Т – technological remediation, values before granulate application; М – microbiological and PhM – phyto-microbiological remediation, values after granulate application.

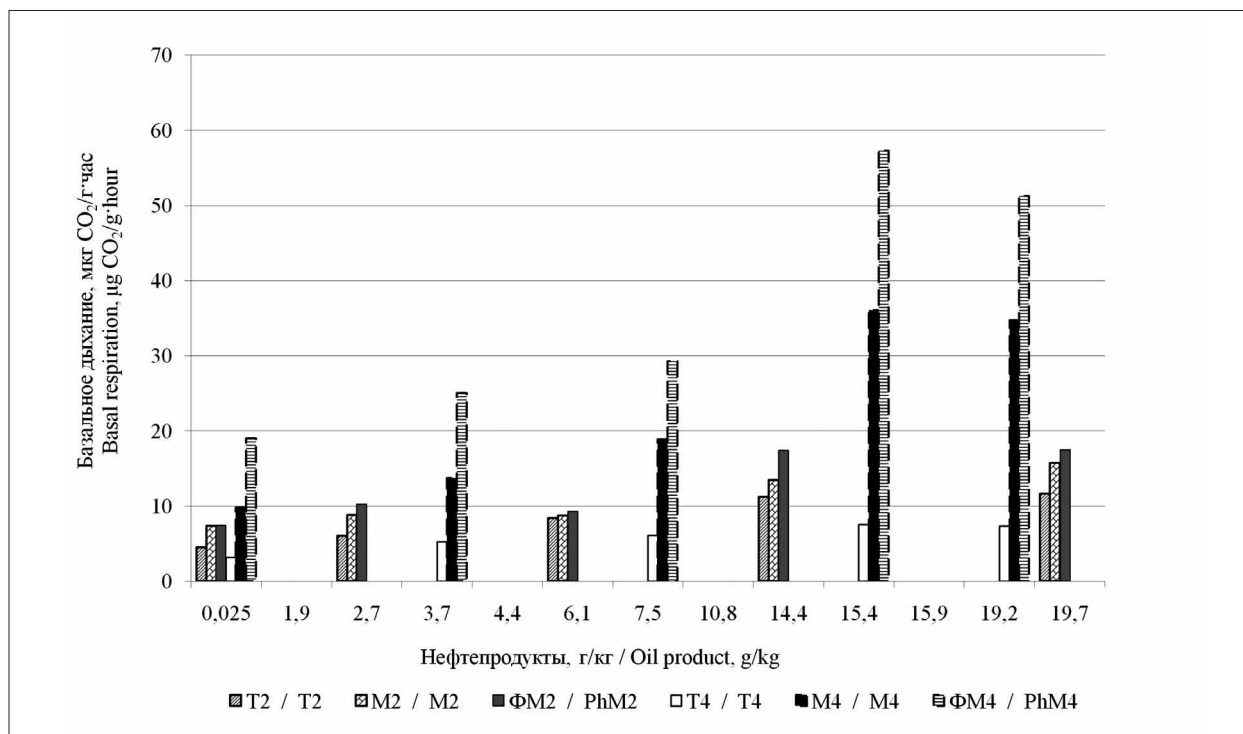


Рис. 1. Влияние дозы гранулята и концентрации нефтепродуктов на скорость базального дыхания почвы при её рекультивации / **Fig. 1.** Effect of granulate and oil product concentration on soil basal respiration rate during remediation

Примечание (здесь и далее на рисунках и в таблицах): тип рекультивации: T2 и T4 – техническая, M2 и M4 – микробиологическая;

ФМ2 и ФМ4 – фито-микробиологическая; цифра 2 или 4 означает дозу гранулята, %.

Note (here and below in figures and tables): remediation type: T2 and T4 – technical, M2 and M4 – microbial, PhM2 and PhM4 – phytomicrobial; the number 2 or 4 indicates granulate content, %

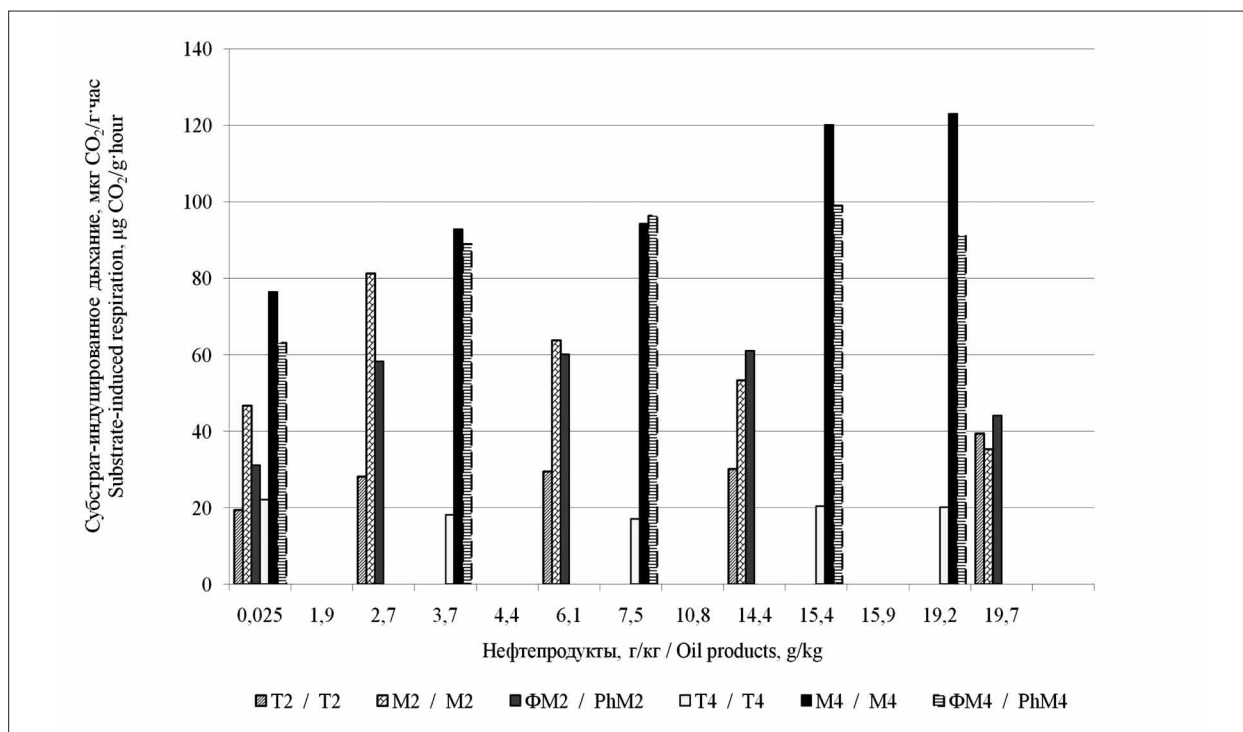


Рис. 2. Влияние дозы гранулята и концентрации нефтепродуктов на субстрат-индуцированное дыхание почвы при её рекультивации

Fig. 2. Effect of granulate and oil products concentration on substrate-induced soil respiration during remediation

ФМ4 при выращивании растений значения $V_{\text{сид}}$ были ниже, чем в опыте М4.

Коэффициент микробного дыхания (Q_r) рассматривается как интегральный показатель, отражающий эколого-физиологическое состояние микробного сообщества, позволяющий оценить степень климатических или антропогенных воздействий на почву. Установлено, что значения Q_r естественных почвенных ценозов располагаются в интервале 0,1–0,2, а значения выше 0,3 свидетельствуют об интенсификации минерализации органического вещества. Чем выше значение Q_r , тем менее устойчива система почвенного микробного сообщества. Величины Q_r , приближающиеся к 1,0 и выше, указывают, что почва испытывает неблагоприятные воздействия [1, 13].

Состояние микробных сообществ почвенных образцов после опытов по технической рекультивации зависело от начального содержания поллютанта. Вариант В3 опыта Т2, варианты В2–В4 опыта Т4 характеризовались повышенной интенсивностью метаболических процессов. В опытах по биологической рекультивации снижение устойчивости почвенных микроорганизмов было отмечено в варианте В3 опыта ФМ4, В4 опытов М2, ФМ2 и ФМ4. В других вариантах проведённых опытов значения Q_r были ниже 0,31, что свидетельствует о «благополучном» состоянии микробного пула загрязнённых нефтью почвенных образцов (табл. 4). В вариантах В3 и В4 опыта ФМ4 были зарегистрированы самые высокие значения Q_r , что, вероятно является результатом взаимодействия почвенной микробиоты и выращиваемых растений.

Таким образом, внесение гранулята в загрязнённую серую лесную почву в большинстве случаев способствовало повышению стабильности сообщества почвенных микроорганизмов. В опытах М2 и М4 было зарегистрировано наиболее стабильное состояние микробного сообщества загрязнённой нефтью почвы (табл. 4).

Интенсивность окисления НП в почве зависела от их начального содержания, дозы внесённых ОСВ, метода рекультивации и изменялась в вариантах В1, В2, В3 и В4 в интервале 32–44 %, 17–69 %, 21–79 % и 8–55 %, соответственно (рис. 3).

В опытах с 4 % гранулята положительный эффект был отмечен при всех испытанных концентрациях НП. Причём в вариантах В2–В4 опыта ФМ4 он был в 2,6–6,3 раза выше, чем в опыте Т4 и в 1,3–1,5 раза выше, чем в опыте М4.

Сравнение интенсивности окисления НП в опытах с разным содержанием гранулята продемонстрировало, что при его концентрации 2 % происходит более активная деструкция загрязнителя. При этом, в опыте М2 в вариантах В3 и В4, содержащих 14,4 и 19,7 г/кг НП, интенсивность их деструкции была на 41 и 33 % выше, чем в опыте Т2 и на 14 и 8 % выше, чем в опыте ФМ2.

Сравнение уровня эмиссии CO_2 (рис. 1) и эффективности деструкции НП (рис. 3) показало, что в условиях микробиологической рекультивации внесение 2 % гранулята обеспечивает максимальное снижение концентрации поллютанта при наименьшей эмиссии CO_2 . Использование более высокой дозы гранулята в большинстве случаев замедляло процесс разложения поллютанта, эмиссия CO_2 при этом была значительно выше.

Заключение

Добавление в загрязнённую нефтью серую лесную почву гранулированного ОСВ в дозе 2 и 4 % усиливало интенсивность базального дыхания. Наибольшая стимуляция $V_{\text{базал}}$ происходила при внесении 4 % гранулята, при этом максимальная эмиссия CO_2 наблюдалась в опытах по фито-микробиологической рекультивации.

Характер субстрат-индуцированного дыхания зависел от подхода к рекультивации, дозы гранулята и уровня исходного загрязне-

Таблица 4 / Table 4
Коэффициент микробного дыхания загрязнённой нефтью почвы при рекультивации
Microbial respiration rate of oil-contaminated soil during remediation

Варианты Variants	Опыты / Experiments					
	Т2 / T2	М2 / M2	ФМ2 / PhM2	Т4 / T4	М4 / M4	ФМ4 / PhM4
В1	0,22	0,11	0,18	0,29	0,15	0,28
В2	0,28	0,14	0,15	0,36	0,20	0,30
В3	0,37	0,25	0,29	0,37	0,30	0,58
В4	0,30	0,44	0,40	0,36	0,28	0,56

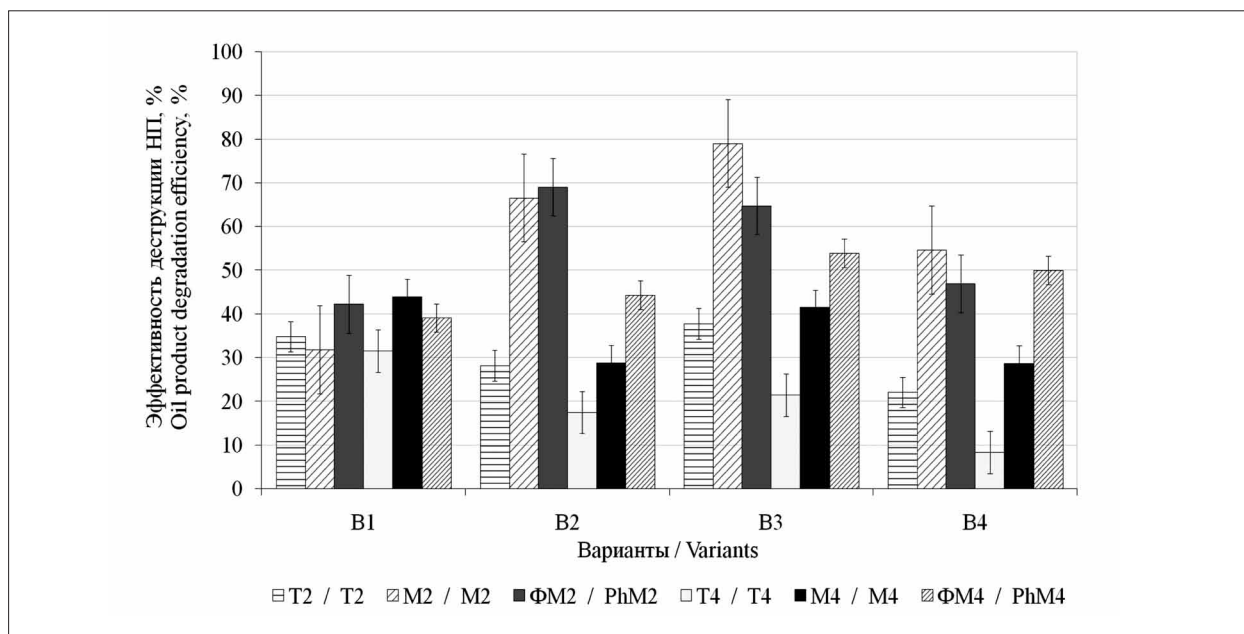


Рис. 3. Влияние дозы гранулята и концентрации нефтепродуктов (НП) на эффективность их деструкции при технической, микробиологической и фито-микробиологической рекультивации (% от начального содержания НП)
Fig. 3. Effect of granulate and oil product concentration on their degradation efficiency during technical, microbiological and phyto-microbiological remediation (% of oil product initial concentration)

ния. По абсолютным показателям в опытах по микробиологической рекультивации $V_{сид.}$ была выше, чем в соответствующих вариантах опытов по фито-микробиологической рекультивации. В опытах по технической рекультивации $V_{сид.}$ закономерно была значительно ниже, чем в опытах с гранулятом.

При выращивании растений на нефтезагрязнённых почвах с гранулятом в большинстве случаев микробный пул был менее стабилен, чем в опытах по микробиологической рекультивации.

Внесение гранулята в почвенные образцы, содержащие до 3,7 г/кг НП, не приводило к достоверной интенсификации деструкционных процессов. При более высоких концентрациях НП наибольшая эффективность их разложения была отмечена в опыте по микробиологической рекультивации при содержании 2 % гранулята (опыт М2). В опытах М2, ФМ2 и ФМ4 в вариантах, содержащих более 19,0 г/кг НП, эффективность их деструкции имела сопоставимые значения.

Соотнесение результатов деструкции НП и эмиссии CO_2 при использовании разных доз гранулированного ОСВ показывает, что при концентрации поллютанта в почве выше 3,7 г/кг внесение 2 % гранулята обеспечивает наибольшую скорость их разложения при наименьшей интенсивности образования

углекислого газа. Выращивание смеси высших растений (*Secale cereale* и *Vicia sativa*) при рекультивации на нефтезагрязнённой почве с гранулятом не увеличивало скорость окисления НП.

С точки зрения повышения активности микробного пула, ускорения деструкции НП в загрязнённой нефтью серой лесной почве и минимизации выбросов CO_2 в атмосферу при проведении биологической рекультивации целесообразно использовать термически обработанный гранулированный осадок муниципальных сточных вод в концентрации 2 %.

Литература

1. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1341–1346.
2. Петров А.М., Вершинин А.А., Каримуллин Л.К., Акайкин Д.В., Тарасов О.Ю. Динамика эколого-биологических характеристик дерново-подзолистых почв в условиях длительного воздействия нефтяного загрязнения // Почвоведение. 2016. № 7. С. 848–856. doi: 10.7868/S0032180X16050130
3. Hund K., Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes // Chemosphere. 1994. V. 28. No. 3. P. 477–490. doi: 10.1016/0045-6535(94)90292-5

4. Коршунова Т.Ю., Искужина М.Г., Кузина Е.В., Мухаматдырова С.Р., Рамеев Т.В. Оценка влияния различных загрязнителей на рост и развитие растений-ремедиантов // *Экобиотех.* 2023. Т. 6. № 3. С. 156–165. doi: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165

5. Ибрагимова Т.М., Мамедова П.Ш., Бабаев Э.Р., Кахраманова К.Р., Алмамедова А.Э. Биотехнологический способ очистки нефтезагрязненных почв // *Мир нефтепродуктов.* 2022. № 2. С. 20–23. doi: 10.32758/2782-3040-2022-0-2-20-23

6. Arystanova Sh.E., Naekova S.K. The study of relationships between associative microorganisms-decomposers and plants // *Modern Science.* 2017. No. 2. P. 21–23.

7. Лямзин В.И., Бухарина И.Л., Здобяхина О.В., Исупова А.А. Влияние высших растений в консорциуме с микроорганизмами на агрохимические показатели при биоремедиации нефтезагрязнённых земель // *Теоретическая и прикладная экология.* 2022. № 4. С. 166–171. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-166-171

8. Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В., Вершинин А.А., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. Влияние гранулята осадка сточных вод на характеристики серой лесной почвы и продуктивность растений // *Российский журнал прикладной экологии.* 2023. № 1. С. 52–60. doi: 10.24852/2441-7374.2023.1.52.60

9. Утомбаева А.А., Кузнецова Т.В., Вершинин А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Петров А.М. Эффективность применения осадка городских сточных вод при рекультивации нефтезагрязнённой серой лесной почвы // *Вестник НВГУ.* 2023. № 3. С. 113–126. doi: 10.36906/2311-4444/23-3/10

10. Утомбаева А.А., Вершинин А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Петров А.М. Дыхательная активность и фитопродуктивность загрязненной нефтью серой лесной почвы в зависимости от подхода к рекультивации // *Известия КГТУ.* 2024. № 73. С. 36–50. doi: 10.46845/1997-3071-2024-73-36-50

11. Вершинин А.А., Петров А.М., Каримуллин Л.К., Игнатъев Ю.А. Влияние нефтяного загрязнения на эколого-биологическое состояние различных типов почв // *Вестник Казанского технологического университета.* 2012. Т. 15. № 8. С. 207–211.

12. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякшина Т.Н. Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // *Почвоведение.* 1993. № 11. С. 72–77.

13. Anderson T.-H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO₂ (*q*CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils // *Soil Biol. Biochem.* 1993. V. 25. No. 3. P. 393–395. doi: 10.1016/0038-0717(93)90140-7

14. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences.* Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publ., 1988. P. 20–27.

15. Калькулятор размера эффекта / Калькулятор величины d-Коэна [Электронный ресурс] <https://www.easycalculation.com/ru/statistics/effect-size.php> (Дата обращения: 12.08.2024).

16. Виноградов Д.В., Макарова М.П., Зубкова Т.В. Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур // *Теоретическая и прикладная экология.* 2023. № 1. С. 93–100. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100

17. Вершинин А.А., Каримуллин Л.К., Петров А.М., Кузнецова Т.В. Влияние фиторекультивационных мероприятий на активность микробного сообщества нефтезагрязнённой аллювиальной дерновой почвы // *Российский журнал прикладной экологии.* 2021. № 1. С. 52–58. doi: 10.24411/-7374-2020-10041

18. Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М. Биологическая активность нефтезагрязнённых почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.

19. Соколова Л.Г., Зорина С.Ю., Белоусова Е.Н., Поморцев А.В., Дорофеев Н.В. Эмиссия CO₂ из почвы при введении краткосрочной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья // *Почвоведение.* 2021. № 10. С. 1262–1273. doi: 10.31857/S0032180X21100117

20. Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Сушко С.В. Микробные показатели городских почв и их роль в оценке экосистемных сервисов (обзор) // *Почвоведение.* 2021. № 10. С. 1231–1246. doi: 10.31857/S0032180X21100038

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 различной гумусированности при внесении тяжёлых металлов и углеродосодержащих препаратов // *Почвоведение.* 2021. № 3. С. 372–384. doi: 10.31857/S0032180X21030151

22. Wardle D.A., Parkinson D. Interactions between microclimatic variables and soil microbial biomass // *Biol. Fertil. Soils.* 1990. V. 9. P. 273–280. doi: 10.1007/BF00336239

References

1. Blagodatskaya E.V., Anan'eva N.D. Assessment of the resistance of soil microbial communities to pollutants // *Pochvovedenie.* 1996. No. 11. P. 1344–1346 (in Russian).

2. Petrov A.M., Vershinin A.A., Karimullin L.K., Akaykin D.V., Tarasov O.Yu. Dynamics of ecological and biological characteristics of soddy-podzolic soils under long-term oil pollution // *Pochvovedenie.* 2016. No. 7. P. 848–856 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X16050130

3. Hund K., Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes // *Chemosphere.* 1994. V. 28. No. 3. P. 477–490. doi: 10.1016/0045-6535(94)90292-5

4. Korshunova T.Yu., Iskuzhina M.G., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Rameev T.V. Evaluation of the influence of various pollutants on the growth and development of remediant plants // *Ecobiotech.* 2023. V. 6. No. 3.

P. 156–165 (in Russian). doi: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165

5. Ibragimova T.M., Mamedova P.Sh., Babaev E.R., Kakhramanova K.R., Almamedova A.E. Biotechnological method of cleaning oil-contaminated soils // World of petroleum products. 2022. No. 2. P. 20–23 (in Russian). doi: 10.32758/2782-3040-2022-0-2-20-23

6. Arystanova Sh.E., Naekova S.K. The study of relationships between associative microorganisms-decomposers and plants // Modern Science. 2017. No. 2. P. 24–23.

7. Lyamzin V.I., Buharina I.L., Zdobiyahina O.V., Isupova A.A. Influence of plants in consortium with microorganisms on agrochemical indicators of oil-contaminated soils // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 166–171 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-166-171

8. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zaynulgabidinov E.R., Kuznetsova T.V., Vershinin A.A., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. Effect of sewage sludge granulate on gray forest soil characteristics and plant productivity // Russian Journal of Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 52–60 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.52.60

9. Utombaeva A.A., Kuznetsova T.V., Vershinin A.A., Zainulgabidinov E.R., Petrov A.M. Efficiency of application of municipal wastewater sludge during reclamation of oily gray forest soil // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2023. No. 3. P. 113–126 (in Russian). doi: 10.36906/2311-4444/23-3/10

10. Utombaeva A.A., Vershinin A.A., Zaynulgabidinov E.R., Petrov A.M. Respiratory activity and phytoproductivity of oil-contaminated gray forest soil depending on remediation approach // Izvestia KSTU. 2024. No. 73. P. 36–50 (in Russian). doi: 10.46845/1997-3071-2024-73-36-50

11. Vershinin A.A., Petrov A.M., Karimullin L.K., Ignatiev Yu.A. The impact of oil pollution on the ecological and biological state of different types of soils // Herald of Kazan Technological University. 2012. V. 15. No. 8. P. 207–211 (in Russian).

12. Ananeva N.D., Blagodatskaya E.V., Orlinsky D.B., Myakshina T.N. Methodical aspects of determining substrate-induced respiration of microorganisms // Pochvovedenie. 1993. No. 11. P. 72–77 (in Russian).

13. Anderson T.-H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO₂ (q_{CO_2}) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH,

on the microbial biomass of forest soils // Soil Biol. Biochem. 1993. V. 25. No. 3. P. 393–395. doi: 10.1016/0038-0717(93)90140-7

14. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publ., 1988. P. 20–27.

15. Effect size calculator / Cohen's d calculator [Internet resource] <https://www.easycalculation.com/ru/statistics/effect-size.php> (Accessed: 12.08.2024).

16. Vinogradov D.V., Makarova M.P., Zubkova T.V. The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100

17. Vershinin A.A., Karimullin L.K., Petrov A.M., Kuznetsova T.V. Influence of phytorecultivation measures on the activity of microbial community of oil-contaminated alluvial soddy soil // Russian Journal of Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 52–58 (in Russian). doi: 10.24411/-7374-2020-10041

18. Kireeva N.A., Vodopyanov V.V., Miftakhova A.M. Biological activity of oil-contaminated soils. Ufa: Gilem, 2001. 376 p. (in Russian).

19. Sokolova L.G., Zorina S.Yu., Belousova E.N., Pomortsev A.V., Dorofeev N.V. CO₂ emission from soil in case of the short-term green manure crops into the fallow fields in the conditions of the Cis-Baikal forest-steppe zone // Pochvovedenie. 2021. No. 10. P. 1262–1273 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21100117

20. Ananeva N.D., Ivashchenko K.V., Sushko S.V. Microbial indicators of urban soils and their role in the assessment of ecosystem services: a review // Pochvovedenie. 2021. No. 10. P. 1231–1246 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21100038

21. Terekhova V.A., Prudnikova E.V., Kulachkova S.A., Gorlenko M.V., Uchanov P.V., Sushko S.V., Ananeva N.D. Microbiological indicators of heavy metals and carbon-containing preparations applied to agrosoddy-podzolic soils differing in humus content // Pochvovedenie. 2021. No. 3. P. 372–384 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21030151

22. Wardle D.A., Parkinson D. Interactions between microclimatic variables and soil microbial biomass // Biol. Fertil. Soils. 1990. V. 9. P. 273–280. doi: 10.1007/BF00336239