

А.А. Утомбаева, А.А. Вершинин, Э.Р. Зайнулгабидинов,
И.В. Князев, А.М. Петров

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, semionova.alin@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

В лабораторных условиях изучено влияние термомеханически обработанного гранулированного осадка городских сточных вод на дыхательную активность рекультивируемой нефтезагрязненной серой лесной среднесуглинистой почвы. Представлены основные характеристики гранулированного осадка сточных вод, сведения о влиянии содержания нефтепродуктов на скорость базального и субстрат-индуцированного дыхания, значения коэффициента микробного дыхания почвенных образцов, инкубируемых с гранулятом или без него. Приведены данные о влиянии выращивания растений на эффективность деструкции поллютанта и биохимическую активность почвы, содержащей гранулят осадка сточных вод. Установлено, что внесение гранулированного осадка из расчета 10 т/га в почву, содержащую 2.7, 6.1, 14.4 и 19.7 г/кг нефтепродуктов, приводит к интенсификации окислительных процессов, снижает токсическое действие, способствует повышению устойчивости почвенного микробиоценоза. В присутствии гранулята при концентрации нефтепродуктов 6.1–19.7 г/кг эффективность их деструкции в 1.7–2.5 раза выше, чем без него, что подтверждает перспективность использования осадков сточных вод для рекультивации нефтезагрязненных почв.

Ключевые слова: осадки сточных вод; почва; нефтепродукты; дыхательная активность; рекультивация.

DOI:<https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.63.69>

Введение

Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами является экологической проблемой мирового уровня. В литературе подробно рассмотрены изменения свойств и характеристик почв при их техногенном загрязнении нефтяными углеводородами. Показано, что под воздействием сырой нефти и продуктов ее переработки изменяются не только физико-химические, но и биологические характеристики почв, нарушается структура бактериальных сообществ, снижается таксономическое разнообразие, численность и биомасса почвенных микроорганизмов (Анчугова и др., 2016).

Восстановление подвергшихся нефтяному загрязнению почв предполагает выполнение комплекса работ по технической и биологической рекультивации. На этапе технической рекультивации осуществляется подготовка земель к последующему целевому использованию, биологическая рекультивация предусматривает проведение агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на восстановление плодородия нарушенных земель (ГОСТ Р 59057-2020). Наиболее перспективными являются биологические методы рекультивации. Высокая эффективность,

экономичность и экологичность методов биоремедиации увеличивает их востребованность для широкого спектра органических загрязнителей, включая углеводороды нефти (Вершинина и др., 2021; Гилязов, Гайсин, 2003; Киреева и др., 2001; Alotaibi et al., 2021; Zhang et al., 2012).

В настоящее время на очистных сооружениях МУП «Водоканал» г. Казани внедрена технология термомеханической обработки осадков сточных вод, представляющих собой смесь избыточного активного ила и осевших в первичных отстойниках веществ. В результате обработки образуется гранулированный продукт (далее – «гранулят»), который характеризуется высоким содержанием биологически доступных органических веществ, отсутствием условно патогенной и патогенной микрофлоры, устойчивостью к воздействию влаги. Гранулят сертифицирован как органическое удобрение (Экологический ..., 2022) и может быть использован для биологической рекультивации нефтезагрязненных почв в качестве стимулятора почвенных микробиологических процессов (Утомбаева и др., 2023).

Цель исследования – изучить влияние внесения гранулированного осадка сточных вод на

дыхательную активность серой лесной почвы в зависимости от уровня нефтяного загрязнения, определить эффективность его применения при биологической рекультивации почв.

Материалы и методы исследования

В работе использована серая лесная среднесуглинистая почва (табл. 1), гранулят термомеханически обработанного осадка сточных вод МУП «Водоканал» г. Казани (табл. 2).

Образцы серой лесной почвы были искусственно загрязнены разными дозами парафинистой, сернистой смолистого типа нефтью Ямашинского месторождения (Республика Татарстан). После трехнедельного выветривания почвенные образцы с разным содержанием нефтепродуктов (НП) были разделены на три части, в две из которых был внесен гранулят из расчета 10 т/га.

Исследования включали три параллельных опыта, которые с учетом эффектов

биоаугментации и биостимуляции аборигенной микрофлоры при внесении гранулята условно были обозначены как: Т – техническая рекультивация; М – микробиологическая рекультивация; ФМ – фито-микробиологическая рекультивация (табл. 3). В опыте Т контролем (К) служила незагрязненная серая лесная почва, в опытах М и ФМ – незагрязненная серая лесная почва с гранулятом.

В качестве опытных емкостей использовали пластиковые горшочки диаметром 11 см и объемом 550 мл, содержащие 400 г почвы. Количество повторностей в каждом варианте – 3. Инкубирование осуществляли при температуре 19–25°C, влажности 20–25%, 16-часовом световом дне с интенсивностью освещения 4000 люкс. В ходе инкубации пробы опытов Т и М еженедельно перемешивали.

Содержание НП в исследуемых образцах определяли ИК-спектрометрическим методом на анализаторе КН-2м (ПНД Ф 16.1.2.2.22–98). В

Таблица 1. Основные характеристики серой лесной среднесуглинистой почвы
Table 1. Main characteristics of gray forest medium-carbonaceous soil

Гумус, % Humus, %	$P_{\text{подв.}}$ $P_{\text{mob.}}$	$K_{\text{подв.}}$ $K_{\text{mob.}}$	$pH_{\text{водный}}$ pH_{aqueous}	$N_{\text{общ.}}, \%$ $N_{\text{tot.}}, \%$	$P_{\text{общ.}}, \%$ $P_{\text{tot.}}, \%$
	мг/г / mg/g				
4.4	103	81	6.3	0.21	0.07

Таблица 2. Основные характеристики гранулята осадка сточных вод
Table 2. Main characteristics of granulate sludges

Влажность, % Moisture, %	Орг. в-во, % Organic matter, %	Зольность, % Ash content, %	$N_{\text{общ.}}, \%$ $N_{\text{tot.}}, \%$	$P_{\text{общ.}}, \%$ $P_{\text{tot.}}, \%$	$K_{\text{общ.}}, \%$ $K_{\text{tot.}}, \%$	$P_{\text{подв.}}, \text{мг/кг}$ $P_{\text{mob.}}, \text{mg/kg}$	$pH_{\text{сол.}}$ pH_{salt}	Класс опасности Hazard class
6.3	60.4	39.6	3.0	1.5	0.18	2000	6.2	IV

Таблица 3. Варианты опытов
Table 3. Variants of experiments

Варианты опытов / Variants of experiments		
Т	М	ФМ
Незагрязненные и загрязненные нефтью почвенные образцы	Незагрязненные и загрязненные нефтью почвы, содержащие гранулят из расчета 10 т/га	
42-суточная инкубация в условиях перемешивания и увлажнения	42-суточная инкубация в условиях перемешивания и увлажнения	42-суточное культивирование растений в условиях увлажнения

исходных опытных образцах оно составляло: вариант В1 – 2.7 г/кг, вариант В2 – 6.1 г/кг, вариант В3 – 14.4 г/кг, вариант В4 – 19.7 г/кг.

В основу опыта ФМ была положена описанная в ГОСТ Р ИСО 22030-2009 методика. С учетом результатов ранее проведенных исследований (Утомбаева и др., 2022), в нем были использованы два вида растений: однодольное – рожь посевная (*Secale cereale* L.) и двудольное – вика посевная (*Vicia sativa* L.), смесь которых высевали в соотношении 1:1 (6+6 растений). Для выравнивания условий освещения местоположение вегетационных сосудов ежедневно меняли, варианты располагали рандомно. Через 14 суток инкубации в каждой емкости оставляли по 6 растений (3+3). На 42 сутки эксперимента растения удаляли, почвенные образцы анализировали.

Интенсивность почвенного дыхания определяли газохроматографическим методом (Вершинин и др., 2011) на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2», колонка длиной 3.0 м, внутренний диаметр 3 мм, адсорбент Hayesep N 80/100. В качестве детектора был использован катарометр. Оценивали следующие параметры дыхательной активности почв: скорость базального дыхания ($V_{\text{базал}}$), скорость субстрат-индуцированного дыхания ($V_{\text{сид}}$), коэффициент микробного дыхания ($Q_r = V_{\text{базал}}/V_{\text{сид}}$). Интенсивность дыхания выражали в $\text{мкг CO}_2/\text{г сухой почвы в час}$.

Результаты и их обсуждение

При изучении влияния гранулированного осадка сточных вод на дыхательную активность серых лесных почв и эффективность деструкции НП были рассмотрены два подхода к биологической рекультивации: первый – внесение в загрязненные нефтью образцы почв гранулята (опыт М), второй – внесение в образцы почв гранулята и культивирование в них смеси высших растений (опыт ФМ). Параллельно был поставлен опыт по технической рекультивации (Т), без добавления гранулята.

Показатели почвенного дыхания широко применяются при оценке состояния их микробного пула (Никитин и др., 2022). Величина $V_{\text{базал}}$ отражает доступность питательных веществ для почвенной микрофлоры. Высокие ее показатели указывают на интенсивные процессы окисления присутствующих в почве органических субстратов.

После 42-суточной инкубации интенсивность дыхания незагрязненной, подвергшейся рыхлению и увлажнению почвы, составляла 4.69 $\text{мкг CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$. Присутствие гранулята в опытах М и ФМ в равной степени (в 1.6 раза) увеличивало $V_{\text{базал}}$ (рис. 1).

В опыте по технической рекультивации при по-

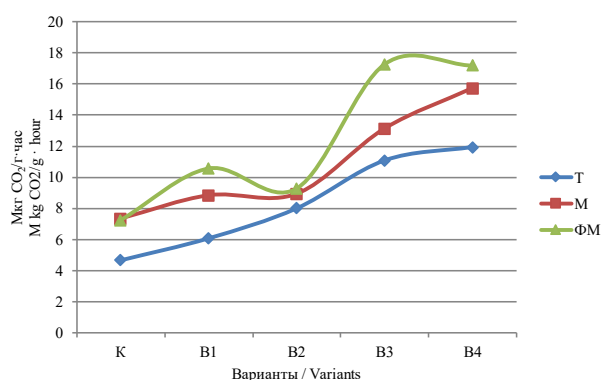


Рис. 1. Базальное дыхание почв

Fig. 1. Soil basal respiration

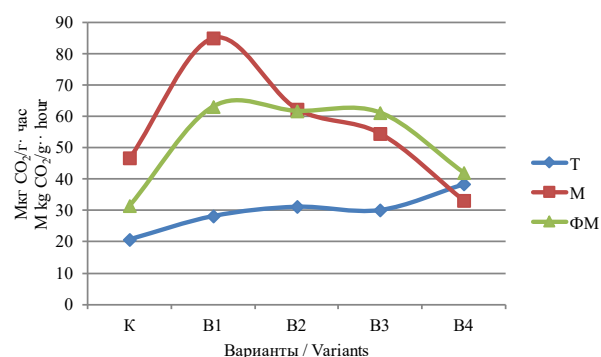


Рис. 2. Субстрат-индуцированное дыхание почв

Fig. 2. Soils substrate-induced respiration

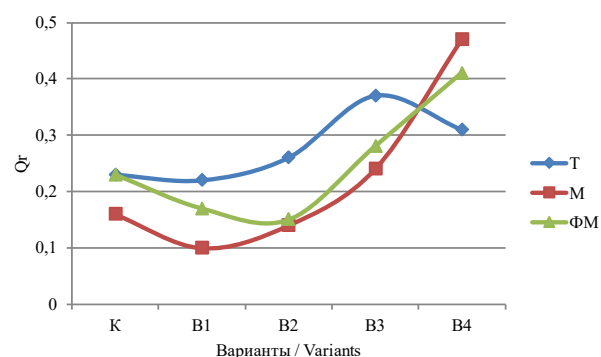


Рис. 3. Коэффициент микробного дыхания почв

Fig. 3. Soil microbial respiration quotient

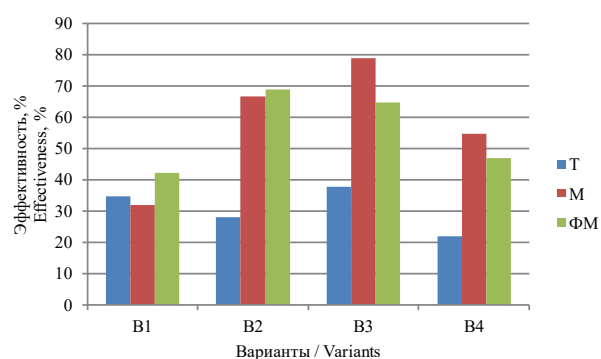


Рис. 4. Эффективность деструкции НП в почвах

Fig. 4. Petroleum hydrocarbons destruction efficiency in soils

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между остаточным содержанием НП и биохимическими показателями почв

Table 4. Correlation between the residual content of petroleum hydrocarbons and soil biochemical parameters

Показатель / Indicator	Опыт / Experiment		
	Т	М	ФМ
Базальное дыхание / Basal respiration	0.94	0.89	0.83
Субстрат индуцированное дыхание / Substrate induced respiration	0.90	-0.86	-0.94
Q _г	0.66	0.98	0.99

вышении содержания НП в почвах наблюдался практически линейный рост $V_{\text{базал}}$, что закономерно, так как внесение нефти, как правило, способствует росту почвенного дыхания (Благодатская, Ананьева, 1996; Киреева и др., 2001; Петров и др., 2016). При проведении фито-микробиологической рекультивации базальное дыхание почв возрастало относительно опытов Т и М как при низкой (вариант В1), так и при высоких концентрациях НП (варианты В3 и В4).

Скорость субстрат-индуцированного дыхания, характеризующая активность микробного пула незагрязненной почвы после инкубирования, составляла 20.77 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$. Внесение гранулята способствовало повышению $V_{\text{сид}}$ в опытах М и ФМ до 31.56 и 46.67 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$, соответственно (рис. 2). Наименьшие значения $V_{\text{сид}}$ инкубированных почвенных образцов обнаружены в опыте по технической рекультивации (28.22–38.37 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$). В опыте Т увеличение концентрации НП в почве приводило к росту исследуемого показателя.

Максимально высокие значения субстрат-индуцированного дыхания зарегистрированы в варианте В1 опыта по микробиологической рекультивации (84.99 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$) с последующим снижением по мере увеличения содержания НП в почве. В отсутствии периодического перемешивания почвы в варианте В1 опыта ФМ значение $V_{\text{сид}}$ было ниже (63.26 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$), однако в вариантах В3 и В4 $V_{\text{сид}}$ была на 12.5 и 27.0% выше, чем в опыте М, что указывает на снижение токсического пресса высоких концентраций НП на микробный пул при фито-микробиологической рекультивации нефтезагрязненных почв. В варианте В4 во всех опытах уровень $V_{\text{сид}}$ почвенных образцов имел близкие значения (рис. 2).

Важным эколого-физиологическим показателем, отражающим степень воздействия неблагоприятных климатических и антропогенных факторов на почву и позволяющим оценить стабильность сообщества почвенных микроорганизмов, является коэффициент микробного дыхания (Q_r).

Считается, что при благоприятных климатических условиях и при отсутствии антропогенных воздействий величина Q_r находится в диапазоне 0.1–0.3. Высокие, приближающиеся к 1.0 и выше, значения Q_r указывают на то, что в почве нарушен естественный ход обменных процессов, а система микроорганизмов неустойчива (Благодатская, Ананьева, 1996).

Значения Q_r контрольных образцов серой лесной почвы варьировали в интервале 0.16–0.23 (рис. 3). При технической рекультивации в вариантах В1 и В2 микробное сообщество находилось в состоянии, которое характеризуется как «нормальное», при микробиологической и фито-микробиологической рекультивации в диапазон «нормальное» состояние входит также вариант В3. При этом в опытах М и ФМ в вариантах В1–В3 значения Q_r были ниже, чем при технической рекультивации, что указывает на повышение устойчивости микробиоты к действию антропогенных факторов в присутствии гранулята. В конце эксперимента в образцах, содержащих максимальные концентрации НП (вариант В4), значения Q_r были ниже 0.5, что свидетельствует о возможности восстановления свойств почвы в короткий срок при минимальных восстановительных мероприятиях (Вершинин и др., 2017).

Определение НП в почвенных образцах по завершению эксперимента показало, что в присутствии гранулята в вариантах В2–В4 эффективность их деструкции была в 1.7–2.5 раза выше, чем в образцах без гранулята (рис. 4), что указывает на перспективность его использования для рекультивации нефтезагрязненных почв.

Менее эффективная деструкция НП в опыте ФМ, по сравнению с М, вероятно связана с отсутствием перемешивания почвы при культивировании растений.

Сопоставление остаточного содержания НП и дыхательной активности почв показало, что скорость базального дыхания во всех опытах напрямую определялась концентрацией поллютанта, а скорость субстрат-индуцированного дыхания в

опытах с гранулятом и без него имела разнонаправленную зависимость (табл. 4). Коэффициент достоверности аппроксимации экспериментальных значений Q_r в опытах М и ФМ составлял 0.96 ($y=0.0483x \cdot 0.0462$) и 0.98 ($y=0.0287x \cdot 0.1163$), что позволяет прогнозировать уровень стабильности почвенного микробоценоза в присутствии гранулята в зависимости от остаточного содержания НП в почвах.

Заключение

Внесение термически обработанного осадка сточных вод интенсифицирует окислительные процессы в загрязненных нефтью серых лесных почвах, повышая эффективность деструкции нефтяных углеводородов. При концентрации в почвах НП 6.1–19.7 г/кг эффективность их деструкции в присутствии гранулята возрастает в 1.7–2.5 раза, что указывает на возможность использования термически обработанных осадков сточных вод для рекультивации почв при различных уровнях загрязнения. При содержании НП до 14.4 г/кг гранулят обеспечивает высокие показатели активности почвенного микробного сообщества. По мере роста концентраций НП протекторные свойства вносимых в почву осадков сточных вод постепенно нивелируются.

Культивирование растений в процессе биологической рекультивации почв повышает доступность органического субстрата и снижает токсическое действие НП на почвенные микроорганизмы при их концентрации до 6.1 г/кг. При этом не выявлено существенных различий в показателях эффективности деструкции НП и дыхательной активности почв при выращивании растений и без них.

Список литературы

1. Анчугова Е.М., Мелехина Е.Н., Маркарова М.Ю., Шемелинина Т.Н. Подходы к оценке методов рекультивации нефтезагрязненных почв // Почвоведение. 2016. №2. С. 257–260. doi: 10.7868/S0032180X16020027.
2. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. №11. С. 1341–1346.
3. Вершинин А.А., Петров А.М., Игнатьев Ю.А., Шагидуллин Р.Р. Дыхательная активность дерново-карбонатной почвы, загрязненной дизельным топливом // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №7. С. 168–174.
4. Вершинин А.А., Петров А.М., Князев И.В. Изменение содержания углерода микробной биомассы в условиях длительного нефтяного загрязнения темно-серой лесной почвы // Материалы Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие регионов: опыт, проблемы, перспективы». Казань: Изд-во АН РТ, 2017. С. 234–237.
5. Вершинина И.А., Лебедев С.В., Галактионова Л.В. Современные подходы к восстановлению загрязненных почв // Вопросы современной науки. М.: Интернаука, 2021. Т. 68. С. 9–31. doi: 10.32743/25001949.2021.68.313842.

6. Гилязов М.Ю., Гайсин И.А. Агроэкологическая характеристика и приемы рекультивации нефтезагрязненных черноземов Республики Татарстан. Казань: Фэн, 2003. 228 с.

7. ГОСТ Р 59057–2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель.

8. ГОСТ Р ИСО 22030–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений.

9. Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахов А.М. Биологическая активность нефтезагрязненных почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.

10. Никитин Д.А., Семенов Т.И., Чернов Н.А., Ксенофонтова Н.А., Железнова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (Обзор) // Почвоведение. 2022. №2. С. 228–243. doi: 10.31857/S0032180X22020095.

11. 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.

12. ПНД Ф 16.1.2.2.22–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органо-генных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии.

13. Утомбаева А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В., Петров А.М. Скрининг растений для фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №1. С. 68–75. doi: https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.68.75.

14. 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: 10.24852/2411-7374.2023.1.52.60.

15. Экологический сертификат соответствия № RA.RU.11HA15.П.00114 «Удобрение органическое гранулированное на основе осадков сточных вод, изготавливаемое серийно по ТУ 37.00.20-001-03317648-2022 на очистных сооружениях канализации г. Казани». Выдано ООО «БИФАР-Экология». Срок действия 16.08.2022–15.08.2025 г.

16. Alotaibi F., Hijri M., St-Arnaud M. Overview of approaches to improve rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils // Applied microbiology. 2021. Vol. 1, №2. P. 329–351. doi: 10.3390/applmicrobiol1020023

17. Zhang, X., Xu, D., Zhu, C., Lundaa, T., Scherr, K.E. Isolation and identification of biosurfactant producing and crude oil degrading *Pseudomonas aeruginosa* strains // Chemical engineering journal. 2012. Vol. 209. P. 138–146. doi: 10.1016/j.cej.2012.07.110.

References

1. Anchugova E.M., Melexina E.N., Markarova M.Yu., Shemelinina T.N. Podxody k ocnke metodov rekul'tivacii neftezagryaznennyx pochv [Approaches to evaluating methods for remediation of oil-contaminated soils] // Pochvovedenie [Soil science]. 2016. No 2. P. 257–260. doi: 10.7868/S0032180X16020027.
2. Blagodat'skaya E.V., Anan'eva N.D. Ocnka ustojchivosti mikrobny'x soobshhestv v processe razlozheniya pollyutantov v pochve [Assessment of microbial community resilience in the decomposition of pollutants in soil] // Pochvovedenie [Soil science]. 1996. No 11. P. 1341–1346.
3. Vershinin A.A., Petrov A.M., Ignat'ev Yu.A., Shagid-

ullin R.R. Dy`xatel'naya aktivnost' dernovo-karbonatnoj pochvy, zagryaznennoj dizel'nym toplivom [Respiratory activity of sod-carbonate soil contaminated with diesel fuel] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Annals of Kazan technological university]. 2011. No 7. P. 168–174.

4. Vershinin A.A., Petrov A.M., Knyazev I.V. Izmenenie soderzhaniya ugleroda mikrobnoy biomassy v usloviyax dlitel'nogo neftyanogo zagryazneniya temno-seroj lesnoj pochvy [Changes in the carbon content of microbial biomass under conditions of long-term oil contamination of dark gray forest soil] // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ustoichivoe razvitiye regionov: opyt, problemy, perspektivy». Kazan: AN RT, 2017. P. 234–237.

5. Vershinina I.A., Lebedev S.V., Galaktionova L.V. Sovremennye podkhody k vosstanovleniyu zagryaznennykh pochv [Modern approaches to remediation of contaminated soils] // Voprosy sovremennoy nauki. Moscow: Internauka, 2021. Vol. 68. P. 9–31. doi: 10.32743/25001949.2021.68.313842.

6. Gilyazov M.Yu., Gajsin I.A. Agroekologicheskaya karakteristika i priemy rekultivatsii neftezagryaznennykh chernozemov Respubliki Tatarstan [Agroecological characteristics and reclamation methods for oil contaminated chernozems in the Republic of Tatarstan]. Kazan: Fen, 2003. 228 p.

7. GOST R 59057–2020. Okhrana okruzhayushhej sredy. Zemli. Obshhie trebovaniya po rekultivatsii narushennykh zemel' [Environmental protection. Earth. General requirements for the reclamation of disturbed lands].

8. GOST R ISO 22030–2009. Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Xronicheskaya toksichnost' v otnoshenii vysshix rastenij. [Soil Quality. Biological Methods. Chronic toxicity to higher plants].

9. Kireeva N.A., Vodop'yanov V.V., Miftaxov A.M. Biologicheskaya aktivnost' neftezagryaznennykh pochv [Biological activity of oil polluted soils]. Ufa: Gilem, 2001. 376 p.

10. Nikitin D.A., Semenov T.I., Chernov N.A., Ksenofontova N.A., Zheleznova A.D., Ivanova E.A., Xitrov N.B., Stepanov A.L. Mikrobiologicheskie idikatory ekologicheskix funkciy pochv (Obzor) [Microbiological indicators of ecological functions of soils (Review)] // Pochvovedenie [Soil science]. 2022. No 2. P. 228–243. doi: 10.31857/S0032180X22020095.

11. Petrov A.M., Vershinin A.A., Karimullin L.K., Akajkin D.V., Tarasov O.Yu. Dinamika ekologo-biologicheskixarakteristik dernovo-podzolistyx pochv v usloviyax dlitel'nogo vozdejstviya neftyanogo zagryazneniya [Dynamics of ecologo-biological characteristics of sod-podzolic soils under prolonged exposure to oil pollution] // Pochvovedenie [Soil science]. 2016. No 7. P. 848–856. doi: 10.7868/S0032180X16050130.

12. PND F 16.1.2.2.22–98. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli nefteproduktov v mineral'nyx, organogennyx, organo-mineral'nyx pochvax i donnyx otlozheniyax metodom IK-spektrometrii [Methods for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments by infrared spectrometry].

13. Utombaeva A.A., Zajnulgabidinov E.R., Kuznecova T.V., Petrov A.M. Skringing rastenij dlya fitoremediacii neftezagryaznennykh pochv [Screening of plants for phytoremediation of oil contaminated soils] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 1. P. 68–75. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.68.75>.

14. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zajnulgabidinov E.R., Kuznecova T.V., Vershinin A.A., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. Vliyanie granulyata osadka stochnykh vod na karakteristiki seroj

lesnoj pochvy i produktivnost' rastenij [Effect of sewage sludge granulate on gray forest soil characteristics and plant productivity] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2023. No 1. P. 52–60. doi:10.24852/2411-7374.2023.1.52.60.

15. Ekologicheskij sertifikat sootvetstviya №RA.RU. 11NA15.P.00114 «Udobrenie organicheskoe granulirovannoe na osnove osadkov stochnykh vod, izgotavlivayemoye serijno po TU 37.00.20-001-03317648-2022 na ochistnykh sooruzheniyah kanalizatsii g. Kazani» [Organic granulated fertilizer based on sewage sludge, serially produced according to TU 37.00.20-001-03317648-2022 at sewage treatment facilities in Kazan].

16. Alotaibi F., Hijri M., St-Arnaud M. Overview of approaches to improve rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils // Applied microbiology. 2021. Vol. 1, No 2. P. 329–351. doi: 10.3390/applmicrobiol1020023.

17. Zhang, X., Xu, D., Zhu, C., Lundaa, T., Scherr, K.E. Isolation and identification of biosurfactant producing and crude oil degrading *Pseudomonas aeruginosa* strains // Chemical engineering journal. 2012. Vol. 209. P. 138–146. doi: 10.1016/j.cej.2012.07.110.

Utombaeva A.A., Vershinin A.A., Zajnulgabidinov E.R., Knyazev I.V., Petrov A.M. **Study of the possibility of using sewage sludge for biological reclamation of oil-contaminated gray forest soils.**

The effect of thermomechanically treated granular urban sewage sludge on the respiratory activity of recultivated oil-contaminated gray forest medium loamy soil was studied in laboratory conditions. The main characteristics of granular sewage sludge, information on the effect of the content of petroleum products on the rate of basal and substrate-induced respiration, the values of the microbial respiration coefficient of soil samples incubated with or without granulate are presented. Data on the effect of plant cultivation on the efficiency of pollutant destruction and the biochemical activity of the soil containing granulate sewage sludge are presented. It has been established that the introduction of granular sediment at the rate of 10 t/ha into soils containing 2.7, 6.1, 14.4 and 19.7 g/kg of petroleum products leads to the intensification of oxidative processes, reduces the toxic effect, and increases the resistance of soil microbiocenosis to pollutants. In the presence of granulate at a concentration of oil products of 6.1–19.7 g/kg, the efficiency of their destruction is 1.7–2.5 times higher than without it, which confirms the promise of using sewage sludge for the recultivation of oil-contaminated soils.

Keywords: wastewater sludge; soil; petroleum hydrocarbons; microbial respiration; recultivation.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 03.02.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 16.03.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 22.03.2023

Информация об авторах

Утомбаева Алина Александровна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: semionova.alin@yandex.ru.

Вершинин Анатолий Андреевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: A-vershinin@mail.ru.

Зайнулгабидинов Эрик Ренатович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: comp05@mail.ru.

Князев Игорь Владимирович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: Kneze3@yandex.ru.

Петров Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: zpam2@rambler.ru.

Information about the authors

Alina A. Utombaeva, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: semionova.alin@yandex.ru.

Anatoly A. Vershinin, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya str., Kazan, 420087, Russia, E-mail: A-vershinin@mail.ru.

Erik R. Zainulgabidinov, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: comp05@mail.ru.

Igor V. Knyazev, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya str., Kazan, 420087, Russia, E-mail: Kneze3@yandex.ru.

Andrey M. Petrov, Ph.D. in Biology, Head of the Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: zpam2@rambler.ru.

