

Научная статья

УДК 631.879

DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-36-50

**Дыхательная активность и фитопродуктивность загрязненной нефтью  
серой лесной почвы в зависимости от подхода к рекультивации**

**Алина Александровна Утомбаева<sup>1</sup>, Анатолий Андреевич Вершинин<sup>2</sup>, Эрик  
Ренатович Зайнулгабидинов<sup>3</sup>, Андрей Михайлович Петров<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики  
Татарстан, Казань, Россия

<sup>1</sup> semionova.alin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7407-9108>

<sup>2</sup> A-vershinin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1807-5727>

<sup>3</sup> comp05@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5372-9984>

<sup>4</sup> zpram2@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5117-2609>

**Аннотация.** Исследовано влияние полученного при термомеханической обработке осадка сточных вод (ОСВ) гранулированного продукта на дыхательную активность и фитопродуктивность загрязненной нефтью серой лесной почвы. На биологических очистных сооружениях г. Казани ОСВ подвергаются термомеханической обработке, в результате которой образуются достаточно устойчивые к влаге и механическому воздействию гранулы размером 3–9 мм с влажностью 5–10 % (далее «гранулят»). Гранулят сертифицирован и фактически является комплексным, органоминеральным удобрением, с потенциальной возможностью стимуляции микробиологических процессов, интенсификации роста растений на деградированных и загрязненных почвах. Внесение гранулята (органическое вещество – 60,4 %, N<sub>общ.</sub> – 3,0 %, P<sub>общ.</sub> – 1,5 %, класс опасности IV) стимулирует дыхательную активность, повышает эффективность деструкции нефтепродуктов, увеличивает фитопродуктивность растений, что указывает на возможность его применения при биологической рекультивации нефтезагрязненной почвы. Наблюдаемое снижение коэффициента микробного дыхания в присутствии гранулята отражает повышение устойчивости почвенных микроорганизмов к нефтяному загрязнению. Сравнение исследованных подходов продемонстрировало более высокую эффективность деструкции высоких концентраций нефтепродуктов в серой лесной почве при биологической рекультивации относительно технической. Предусматривающая увлажнение и перемешивание техническая рекультивация почвы в диапазоне содержания нефтепродуктов 2,7–19,7 г/кг мало влияла на дыхательную активность и продуктивность растений, при этом в варианте, содержавшем 2,7 г/кг, эффективность деструкции поллютанта была выше, чем в опытах с гранулятом. При проведении рекультивационных мероприятий на почвенных образцах с высоким содержанием нефтепродуктов внесение гранулята ОСВ из расчета 10 т/га повышает эффективность их деструкции.

**Ключевые слова:** нефтяное загрязнение, рекультивация, осадок сточных вод, дыхательная активность, фитопродуктивность.

**Для цитирования:** 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.

Original article

### **Respiratory activity and phytoproductivity of oil-contaminated gray forest soil depending on remediation approach**

**Alina A. Utombaeva<sup>1</sup>, Anatoliy A. Vershinin<sup>2</sup>, Erik R. Zaynulgabidinov<sup>3</sup>, Andrey M. Petrov<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Institute of Ecology and Subsoil Use Problems, Academy of Sciences of RT, Kazan, Russia

<sup>1</sup> semionova.alin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7407-9108>

<sup>2</sup> A-vershinin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1807-5727>

<sup>3</sup> comp05@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5372-9984>

<sup>4</sup> zpam2@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5117-2609>

**Abstract.** The influence of granular product obtained by thermomechanical treatment of municipal sewage sludge on respiratory activity and phytoproductivity of oil-contaminated gray forest soil has been studied. At the biological treatment facilities of the city of Kazan sewage sludge are subjected to thermomechanical treatment, which results in the formation of granules 3–9 mm in size with moisture content of 5–10% (hereinafter referred to as granulate), which are sufficiently resistant to moisture and mechanical impact. Granulate is certified and is actually a complex, organomineral fertilizer, with the potential ability to stimulate microbiological processes, intensification of plant growth on degraded and contaminated soils. The application of granulate (organic matter – 60.4 %, N total – 3.0 %, N total – 1.5 %, hazard class IV) stimulates respiratory activity, increases the efficiency of oil products destruction, increases phytoproductivity of plants, which indicates the possibility of its application in biological remediation of oil-contaminated soil. The observed decrease of microbial respiration coefficient in the presence of granulate reflects the increase of soil microorganisms resistance to oil pollution. Comparison of the studied approaches demonstrated higher efficiency of destruction of high concentrations of petroleum products in gray forest soil under biological remediation as compared to technical remediation. Technical reclamation of soil in the range of petroleum products content of 2.7–19.7 g/kg, presupposing moistening and mixing, had little effect on respiratory activity and plant productivity, while in the variant containing 2.7 g/kg the efficiency of pollutant degradation was higher than in the experiments with granulate. When carrying out reclamation measures on soil samples with high content of oil products, application of SS granulate at the rate of 10 t/ha increases the efficiency of their destruction.

**Key words:** oil pollution, remediation, sewage sludge, respiratory activity, phytoproductivity.

**For citation:** Utombaeva A. A., Vershinin A. A., Zainulgabidinov E. R., Petrov A. M. Respiratory activity and phytoproductivity of oil-contaminated gray forest soil depending on remediation approach // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2024;(73): 36-50. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-36-50.

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость оперативного восстановления характеристик и плодородия нефтезагрязненных почв, снижения экологических последствий и скорейшего возвращения в хозяйственный оборот требуют применения научно обоснованных экономически и экологически эффективных приемов их рекультивации.

Используемые при рекультивации нефтезагрязненных почв приемы разнообразны. Это техническая рекультивация, внесение повышающих интенсивность роста и активность аборигенной микрофлоры органических и минеральных удобрений, интродукция отдельных штаммов и комплексов микроорганизмов-деструкторов, сорбентов и окислителей, фиторекультивация, приемы и их комбинации, повышающие устойчивость и деструктивную активность микроорганизмов [1–3].

Нейтрализация поллютантов различной химической природы в почве осуществляется благодаря деятельности микробного сообщества, а сроки восстановления свойств почв определяются их активностью [4–6]. Состояние микробиоценозов техногенно загрязненных почв оценивается по таким параметрам, как качественный и количественный состав микробного пула, его ферментативная и дыхательная активность [7–11]. В настоящем исследовании для оценки биологической активности почвы использовали показатели почвенного дыхания, которые объективно отражают состояние почвенного микробиоценоза.

Эксплуатация городских очистных сооружений сопровождается образованием значительных объемов ОСВ, складирование которых отрицательно влияет на санитарную обстановку, создает потенциальную опасность для окружающей среды. На очистных сооружениях г. Казани ОСВ подвергаются обезвоживанию и термомеханической обработке, в результате которых образуются устойчивые к механическому воздействию и влаге гранулы размером 3–9 мм. Гранулят сертифицирован [12] и фактически является комплексным органоминеральным удобрением с потенциальной возможностью стимуляции микробиологических процессов, интенсификации роста растений на деградированных и загрязненных почвах [13, 14]. Большие объемы требующего утилизации гранулята ОСВ делают актуальным изучение возможности его использования при рекультивации нефтезагрязненных почв.

Цель работы – изучить влияние комплекса подходов к рекультивации на дыхательную активность, фитопродуктивность и эффективность деструкции поллютанта в загрязненной нефтью серой лесной почве.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования служили: серая лесная среднесуглинистая почва (гумус – 4,4 %,  $N_{\text{вал.}}$  – 0,21 %,  $P_{\text{подв.}}$  – 103 мг/кг,  $K_{\text{подв.}}$  – 81 мг/кг,  $pH_{\text{вод.}}$  – 6,3); термомеханически обработанный ОСВ очистных сооружений г. Казани (органическое вещество – 60,4 %,  $N_{\text{общ.}}$  – 3,0 %,  $P_{\text{общ.}}$  – 1,5 %,  $P_{\text{подв.}}$  – 2000 мг/кг,  $pH_{\text{сол.}}$  – 6,2, влажность – 6,3 %, класс опасности IV); парафинистая сернистая нефть Ямашинского месторождения (Республика Татарстан); растения: двудольное – вика посевная (*Vicia sativa* L.), однодольное – рожь посевная (*Secale cereale* L.). Перед экспериментом в почвенные образцы были внесены разные дозы нефти. Начальное содержание нефтепродуктов в опытных вариантах В1, В2, В3 и В4 составило 2,7 г/кг, 6,1 г/кг, 14,4 г/кг и 19,7 г/кг соответственно [15]. В часть загрязненных и незагрязненных нефтью почвенных образцов был добавлен термомеханически обработанный ОСВ из расчета 10 т/га.

Двухэтапный эксперимент включал три параллельных опыта, которые с учетом эффектов биоаугментации и биостимуляции при внесении гранулята и условий проведения были обозначены: Т – техническая рекультивация; М – микробиологическая рекультивация; ФМ – фито-микробиологическая рекультивация. В опыте Т контролем (К) служила исходная серая лесная почва, в опытах М и ФМ – исходная серая лесная почва с гранулятом.

Опыты Т, М и ФМ после первого этапа эксперимента по рекультивации были обозначены как 1Т, 1М и 1ФМ, после второго этапа – как 2Т, 2М и 2ФМ соответственно (табл. 1). Результаты первого этапа эксперимента по рекультивации нефтезагрязненной серой лесной почвы опубликованы в [16].

На втором этапе рекультивационных мероприятий (фиторекультивация) во все варианты опытов была посеяна смесь вышеуказанных растений.

Таблица 1. Варианты опытов на этапах эксперимента  
 Table 1. Variants of procedures at the stages of the experiment

Исходные образцы (варианты опытов)		
Т	М	ФМ
Незагрязненные и загрязненные нефтью почвенные образцы	Незагрязненные и загрязненные нефтью почвенные образцы, содержащие гранулят из расчета 10 т/га	
1 этап (рекультивация)		
1Т	1М	1ФМ
Пробы Т после 42-суточной инкубации в условиях перемешивания и увлажнения	Пробы М после 42-суточной инкубации в условиях перемешивания и увлажнения	Пробы ФМ после 42-суточного культивирования растений в условиях увлажнения
2 этап (фиторекультивация)		
2Т	2М	2ФМ
Пробы 1Т после 42-суточного культивирования растений в условиях увлажнения	Пробы 1М после 42-суточного культивирования растений в условиях увлажнения	Пробы 1ФМ после 42-суточного культивирования растений в условиях увлажнения

Интенсивность почвенного дыхания определяли на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2», детектор – катарометр. Использовали колонку длиной 3,0 м, диаметром 3 мм и адсорбент Hayesep N 80/100 [17]. Были определены отражающие активность микробного комплекса и доступность органического вещества скорости субстрат-индуцированного ( $V_{\text{сид.}}$ ) и базального ( $V_{\text{базал.}}$ ) дыхания. Состояние почвенных микробиоценозов оценивали по значению коэффициента микробного дыхания ( $Q_r$ ), равного отношению  $V_{\text{базал.}} / V_{\text{сид.}}$  [7].

В основу этапа фиторекультивации была положена представленная в ГОСТ Р ИСО 22030-2009 [18] методика. В хроническом эксперименте использовали два растения (рожь посевную и вику посевную), которые на первом этапе высевали в образцы опыта ФМ, на втором – в рекультивированные в опытах 1Т, 1М, 1ФМ почвенные образцы в соотношении 1:1 (6+6 растений). Смесь растений выращивали в пластиковых емкостях высотой 9 см и объемом 550 мл, содержащих по 400 г почвы. Условия культивирования: температура 19–25 °С, влажность 20–25 %, световой день 16 часов, интенсивность освещения 4000 Лк. Количество повторностей в каждом варианте – 3. В ходе эксперимента местоположение емкостей с растениями периодически меняли. Через две недели культивирования в емкостях оставляли по 6 растений (3+3). На 42 сутки растения аккуратно удаляли, а почвенные образцы анализировали. На втором этапе эксперимента контролями служили инкубированные в соответствии с условиями эксперимента незагрязненная почва (опыт 2Т) и незагрязненная нефтепродуктами почва с «гранулятом» (опыты 2М и 2ФМ). Побеги растений высушивали при 105 °С и определяли их массу.

Статистическая обработка результатов выполнена в программе Microsoft Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Посев растений в большинстве случаев является завершающим этапом восстановительных процедур на техногенно загрязненных почвах, что делает актуальным изучение влияния внесения гранулята ОСВ на начальных этапах рекультивационных мероприятий на рост высших растений, биохимическую активность и восстановление свойств нефтезагрязненных почв при последующей реализации фиторекультивационных мероприятий.

На первом этапе эксперимента минимальный уровень базального дыхания обнаруживался при проведении технической (Т) рекультивации. Самое интенсивное дыхание на первом этапе выявлено в образцах, восстанавливаемых по технологии фиторемедиации (1ФМ). Интродукция органического субстрата на первом этапе опыта (1М) привела к закономерному росту  $V_{\text{базал.}}$ , которая в контрольных образцах опытов с гранулятом была в 1,6 раза выше, чем в опыте без гранулята (рис. 1).

Выращивание растений на втором этапе эксперимента нивелировало различия в значениях  $V_{\text{базал.}}$  контрольных образцов, в опытах с гранулятом она снизилась, а без гранулята не изменилась. Проведение фиторекультивационных мероприятий на загрязненных нефтью образцах во всех вариантах опытов сопровождалось 1,7–2,1-кратным снижением  $V_{\text{базал.}}$ . После фиторекультивации в вариантах В2–В4 скорость эмиссии  $\text{CO}_2$  была ниже, при этом в варианте В4 опыта

2М она незначительно отличалась от полученных на первом этапе эксперимента значений (рис. 1).

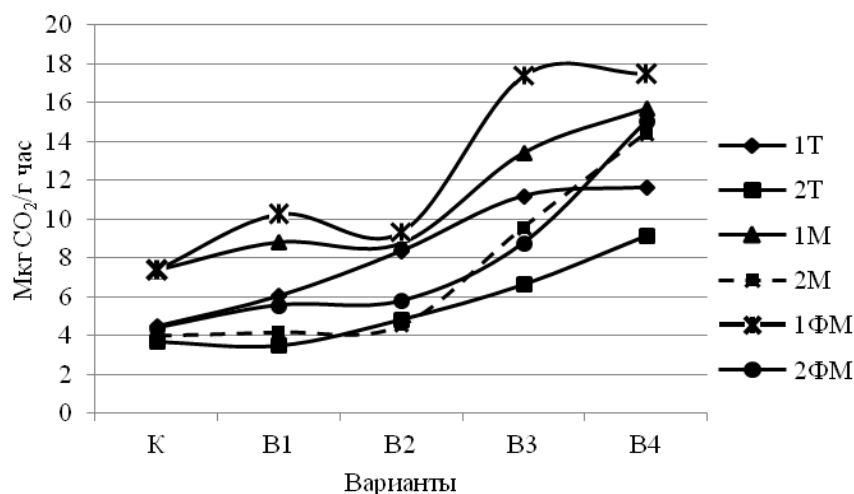


Рис. 1. Интенсивность базального дыхания ( $V_{\text{базал.}}$ ) почвенных образцов на последовательных этапах эксперимента

Fig. 1. Intensity of basal respiration ( $V_{\text{basal.}}$ ) of soil samples at successive stages of the experiment

Особый интерес при сравнении различных подходов к рекультивации представляет изучение субстрат-индуцированного дыхания почв, поскольку оно отражает долю жизнеспособных микробных клеток в почве, характеризуя тем самым активность и потенциал микробного пула почвы. Способ рекультивации оказывал существенное влияние на  $V_{\text{сид.}}$  как незагрязненных, так и загрязненных нефтью почв. В незагрязненных почвах на первом этапе эксперимента интенсивность  $V_{\text{сид.}}$  почвенных образцов опыта 1М в 2,4 и 1,5 раза превосходила показатели дыхания опытов 1Т и 1ФМ соответственно. Наиболее заметны различия  $V_{\text{сид.}}$  между технологиями рекультивации проявились в загрязненных нефтью почвенных образцах (рис. 2).

На первом этапе эксперимента в варианте В1 опыта 1М показатели  $V_{\text{сид.}}$  достигали чрезвычайно высоких значений (81,22 мкг  $\text{CO}_2$  / г час). Несколько ниже были величины  $V_{\text{сид.}}$  в опыте 1ФМ (рис. 2). Минимальная скорость субстрат-индуцированного дыхания зарегистрирована в опыте по технической рекультивации (1Т). Зависимость  $V_{\text{сид.}}$  от концентрации поллютанта в почве индивидуальна для каждого подхода к рекультивации. Как правило, при переходе от низких к средним концентрациям поллютанта интенсивность  $V_{\text{сид.}}$  увеличивалась (исключение – опыт по технической рекультивации). В большинстве случаев при достижении определенного порога концентраций нефти в почве происходил спад  $V_{\text{сид.}}$ . В целом добавление гранулята (технологии 1М и 1ФМ) способствовало существенной стимуляции почвенной микрофлоры загрязненных почв.

На первом этапе эксперимента в вариантах В1–В3 опытов с гранулятом наблюдалось снижение пресса нефтяных загрязнений на микробный комплекс,  $Q_T$  этих образцов был ниже, чем в опыте без гранулята (рис. 3).

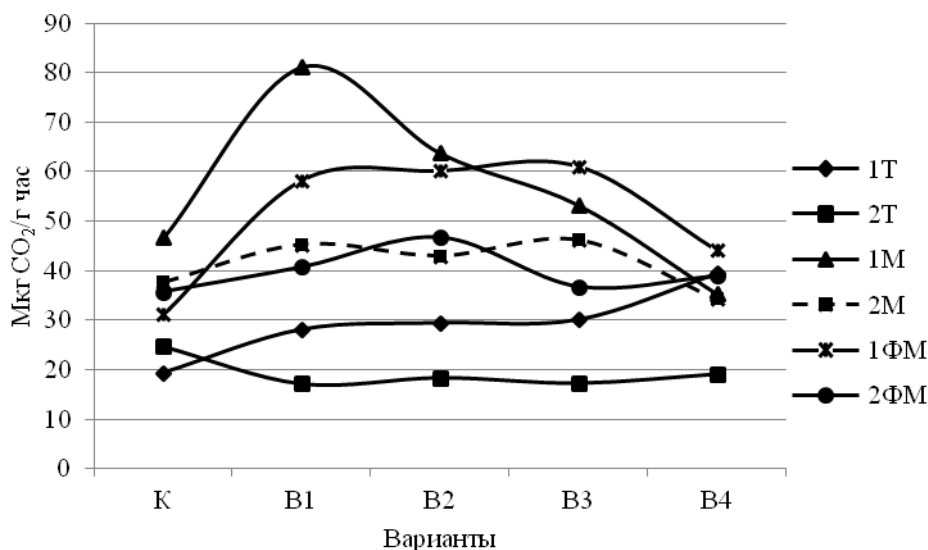


Рис. 2. Интенсивность субстрат-индуцированного дыхания ( $V_{\text{сид.}}$ ) почвенных образцов на последовательных этапах эксперимента  
Fig. 2. Intensity of substrate-induced respiration ( $V_{\text{sid.}}$ ) of soil samples at successive stages of the experiment

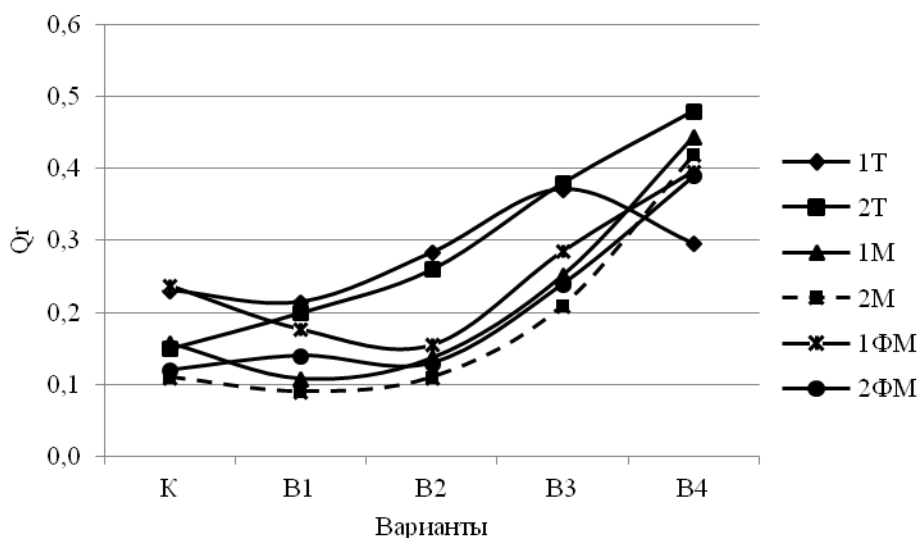


Рис. 3. Коэффициент микробного дыхания ( $Q_r$ ) почвенных образцов на последовательных этапах эксперимента  
Fig. 3. Microbial respiration coefficient ( $Q_r$ ) of soil samples at successive stages of the experiment

Проведение фиторекультивационных мероприятий привело к снижению значений  $Q_r$  в вариантах В1–В3 опытов 2М и 2ФМ, тогда как в опыте 2Т значения  $Q_r$  в этих вариантах практически не изменилось, а в варианте В4 увеличилось до 0,48. Ориентируясь на характеризующие состояние микробного сообщества почвы, когда благоприятное значения  $Q_r = 0,10–0,25$  [19], следует отметить, что в

опытах 2М и 2ФМ более стабильное состояние микробного пула наблюдалось в вариантах В1–В3, тогда как в опыте 2Т стабильное состояние микрофлоры фиксировалось только в варианте с минимальной концентрацией загрязнителя.

В опыте по микробиологической рекультивации незначительное увеличение продуктивности фитомассы вики посевной относительно опыта 2Т было зарегистрировано только в варианте В3 (5 %), при этом в опыте 2ФМ продуктивность фитомассы загрязненной почвы была выше и достоверно отличалась от опыта по технической рекультивации (рис. 4). Следует отметить, что по мере увеличения содержания загрязнителя в почве различия в продуктивности двудольного растения между опытами 2Т и 2ФМ снижались.

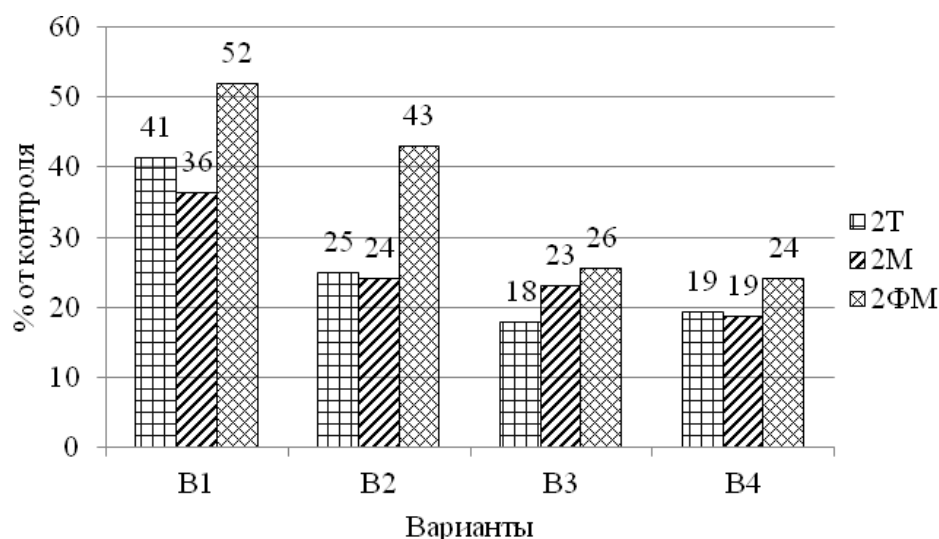


Рис. 4. Влияние гранулята на прирост зеленой массы вики посевной при разных уровнях нефтяного загрязнения

Fig. 4. Influence of granulate on common vetch green mass gain at different levels of oil pollution

Внесение гранулята повышало резистентность ржи посевной к испытанному загрязнителю. Наблюдаемый в вариантах В1–В3 опыта 2ФМ стимулирующий эффект приводил к 1,7–2,6-кратному росту продуктивности фитомассы, что указывает на положительное влияние культивирования растений на загрязненных нефтью образцах с гранулятом на первом этапе эксперимента (рис. 5).

Полученные в ходе эксперимента данные показывают, что суммарная продуктивность зеленой массы смеси выращенных растений в опытах с гранулятом была выше, чем в опыте без гранулята (табл. 2), причем в опыте, включающем два этапа фиторекультивации, суммарная «урожайность» зеленой массы на загрязненных нефтью образцах была в 2,6–3,0 раза выше, чем в опыте по микробиологической рекультивации.



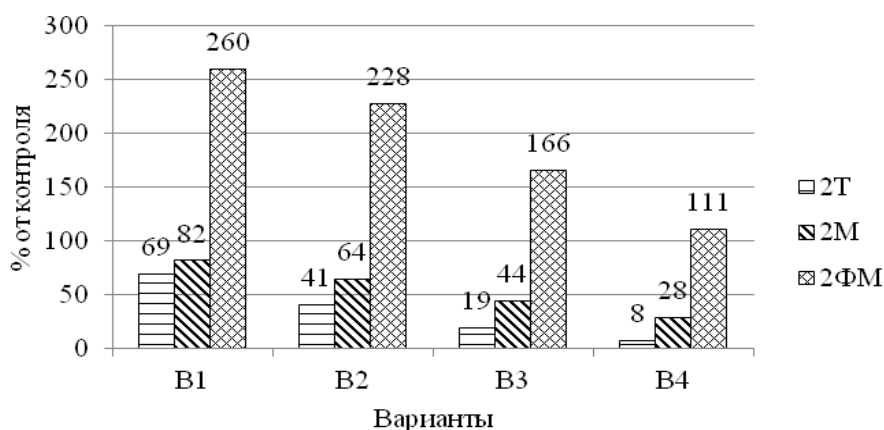


Рис. 5. Влияние гранулята на прирост зеленой массы ржи посевной при разных уровнях нефтяного загрязнения.

Fig. 5. Influence of granulate on sowing ryeat green mass gain at different levels of oil pollution

Таблица 2. Влияние гранулята на суммарную продуктивность фитомассы выращенных растений

Table 2. Influence of granulate on the total phytomass productivity of grown plants

Опыты	Варианты				
	К	B1	B2	B3	B4
	Кратность увеличения относительно опыта 2Т, раз				
2М	1,1	1,2	1,5	2,0	1,8
2ФМ	1,1	3,2	4,6	5,6	5,0

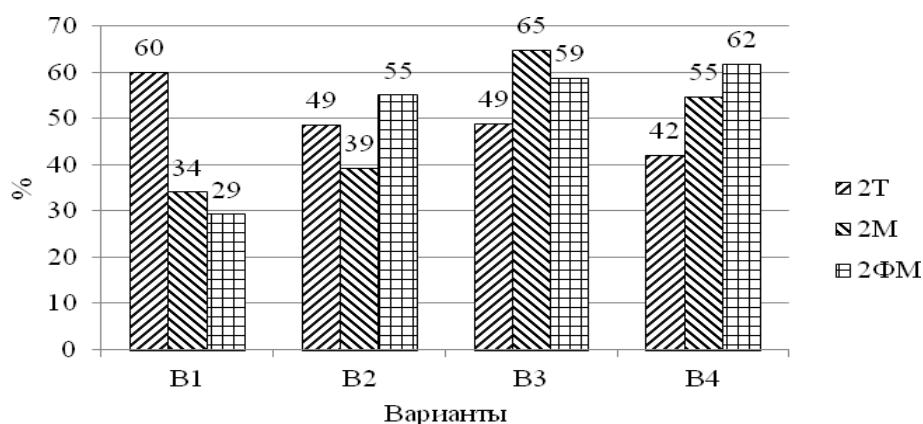


Рис. 6. Эффективность деструкции нефтепродуктов в опытах по рекультивации нефтезагрязненной почвы

Fig. 6. Efficiency of oil products destruction in experiments on the remediation of oil-contaminated soil

Сравнение эффективности деструкции нефтепродуктов в опытах показало, что в варианте В1 опыта без гранулята она была в 1,8–2,1 раза выше, чем в опытах с гранулятом, что, вероятно, определяется первоочередным окислением микроорганизмами легкодоступного субстрата при отсутствии выраженного токсического действия «низких» концентраций поллютанта (рис. 6). В вариантах с высоким начальным содержанием нефтепродуктов (В3, В4) в опытах с гранулятом интенсивность разложения нефтепродуктов была на 10–20 % выше, чем в опыте без него.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В опытах по микробиологической и фито-микробиологической рекультивации загрязненной нефтью серой лесной почвы параметры почвенного дыхания превосходили полученные при технической рекультивации параметры. При любом подходе к рекультивации посев растений в загрязненную нефтью почву сопровождался снижением (в разной степени) интенсивности базального и субстрат-индуцированного дыхания.

В опытах с гранулятом культивирование растений приводило к снижению коэффициента микробного дыхания, что указывает на повышение устойчивости микробного пула загрязненной нефтью почвы. В случае технической рекультивации снижение значений  $Q_T$  не наблюдалось, а в варианте с максимальным содержанием нефтепродуктов, напротив, отмечался некоторый его рост.

Предварительное инкубирование содержащих гранулят не загрязненных и загрязненных нефтью образцов серой лесной почвы на этапе фиторекультивации практически не влияло на продуктивность зеленой массы вики посевной, повышало продуктивность зеленой массы ржи посевной.

Проведение двух последовательных фиторекультиваций на образцах, исходно содержащих до 6,1 г/кг нефтепродуктов, снижало ингибирующее действие поллютанта на вику посевную, приводило к 4,9–19,0-кратному увеличению «урожайности» зеленой массы ржи посевной относительно образцов без гранулята, 3,3–4,1-кратному росту относительно образцов с гранулятом инкубированных на первом этапе эксперимента без растений.

Состав и свойства гранулята обеспечивают снижение токсического действия присутствующей в почве нефти, повышение устойчивости растений к поллютанту, что интенсифицирует суммарный прирост зеленой массы использованных на этапе фиторекультивации растений.

Совокупность полученных данных показывает, что при проведении рекультивационных мероприятий на почвенных образцах с высоким содержанием нефтепродуктов внесение гранулята ОСВ из расчета 10 т/га повышает эффективность их деструкции. При концентрации нефтепродуктов в почве до 2,7 г/кг в присутствии гранулята наблюдалось снижение интенсивности их разложения.

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения гранулята в опытах по микробиологической и фито-микробиологической рекультивации загрязненной нефтью серой лесной почвы. Некоторое снижение дыхательной активности в опыте по фиторекультивации не следует рассматривать

как негативный фактор, поскольку наличие на поверхности почвы растений повышает устойчивость микробного пула почв. Техническая рекультивация не оказывала заметного положительного воздействия на биологическую активность и фитопродуктивность загрязненной нефтью почвы.

#### Список источников

1. Денежкина А. А. Теоретико-методическое обоснование выбора способа биоремедиации нефтезагрязненных почв // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. 2022. № 6/2. С. 9–13. DOI: 10.37882/2223–2966.2022.06–2.09.
2. Иларионов С. А. Экологические аспекты восстановления нефтезагрязненных почв: монография. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 194 с.
3. Технология биологической рекультивации загрязненных земель в результате аварийного разлива нефти / А. Х. Яппаров, И. А. Дегтярева, Н. Н. Хабипов, А. Я. Хидиятуллина: Казань, 2010. 59 с.
4. Гузев В. С., Левин С. В. Техногенные изменения сообщества почвенных микроорганизмов // Перспективы развития почвенной биологии / Под ред. Д. Г. Звягинцева. Москва: Изд-во МАКС Пресс, 2001. С. 178–219.
5. Киреева Н. А., Водопьянов В. В., Мифтахов А. М. Биологическая активность нефтезагрязненных почв: монография. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.
6. Маслов М. Н., Маслова О. А., Ежелев З. С. Микробиологическая трансформация органического вещества в нефтезагрязненных тундровых почвах после рекультивации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 70–78. DOI: 10.1134/S0032180X19010106.
7. Anderson T.-H., Domsch K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (q CO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils // Soil Biol. Biochem. 1993. V. 25. No 3. P. 393–395.
8. Гузев В. С., Левин С. В. Перспективы эколого-микробиологической экспертизы состояния почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1991. № 9. С. 50–62.
9. Полянская Л. М., Звягинцев Д. Г. Содержание и структура микробной массы как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. № 6. С. 706–714.
10. Состав микробных сообществ при разном содержании нефтепродуктов в серых лесных почвах / Т. В. Кузнецова, А. М. Петров, И. В. Князев, Р. Э. Хабибуллин // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 14. С. 165–68.
11. Физиологическая активность почв при разных уровнях нефтяного загрязнения / Л. К. Каримуллин, А. М. Петров, А. А. Вершинин, Н. В. Шурмина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 4. С. 797–803.
12. 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.

13. Характеристики и направления утилизации термомеханически обработанного осадка городских сточных вод / Р. Р. Шагидуллин, Д. В. Иванов, А. М. Петров, Т. В. Кузнецова, И. В. Князев // *Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения»* (г. Киров, 23–24 апреля 2023 г.). Киров: ВятГУ, 2023. Книга 1. С. 411–415.

14. Влияние гранулята осадка сточных вод на характеристики серой лесной почвы и продуктивность растений / А. А. Утомбаева, А. М. Петров, Э. Р. Зайнулгабидинов, Т. В. Кузнецова, А. А. Вершинин, Д. В. Иванов, Р. Р. Шагидуллин // *Российский журнал прикладной экологии*. 2023. № 1. С. 52–60. DOI: 10.24852/2411-7374.2023.1.52.60.

15. ПНД Ф 16.1.2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. Москва, 1998 (издание 2005). 13 с.

16. Изучение возможности применения осадков сточных вод для биологической рекультивации нефтезагрязненной серой лесной почвы / А. А. Утомбаева, А. А. Вершинин, Э. Р. Зайнулгабидинов, И. В. Князев, А. М. Петров // *Российский журнал прикладной экологии*. 2023. № 2. С. 63–68. DOI: 10.24852/2411-7374.2023.2.63.69.

17. Динамика эколого-биологических характеристик дерново-подзолистых почв в условиях длительного нефтяного загрязнения / А. М. Петров, А. А. Вершинин, Л. К. Каримуллин, Д. В. Акайкин, О. Ю. Тарасов // *Почвоведение*. 2016. № 7. С. 848–856. DOI: 107868/S0032180x16050130.

18. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. Введ. 2011-01-01. Москва. 2010. 15 с.

19. Благодатская Е. В., Ананьева Н. Д., Мякшина Т. Н. Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине метаболического коэффициента // *Почвоведение*. 1995. № 2. С. 205–210.

## References

1. Denezhkina A. A. Teoretiko-metodicheskoe obosnovanie vybora sposoba bioremediatsii neftezagryaznennykh pochv [Theoretical and methodological substantiation of the choice of bioremediation method of oil-contaminated soils]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 6/2, pp. 9–13. DOI: 10.37882/2223–2966.2022.06–2.09.

2. Ilarionov S. A. *Ekologicheskie aspekty vosstanovleniya neftezagryaznennykh pochv* [Ecological aspects of oil-contaminated soil remediation]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2004, 194 p.

3. Yapparov A. Kh., Degtyareva I. A., Khabipov N. N., Khidiyatullina A. Ya. *Tekhnologiya biologicheskoy rekul'tivatsii zagryaznennykh zemel' v*

*rezul'tate avariynogo razliva nefi* [Technology of biological remediation of contaminated lands as a result of accidental oil spills]. Kazan, 2010, 59 p.

4. Guzev V. S., Levin S. V. Tekhnogennyye izmeneniya soobshchestva pochvennykh mikroorganizmov [Anthropogenic changes in the soil microorganism community]. *Perspektivy razvitiya pochvennoy biologii*, MAKS Press Publ., 2001, pp. 178–219.

5. Kireeva N. A., Vodop'yanov V. V., Miftakhov A. M. *Biologicheskaya aktivnost' neftezagryaznennykh pochv* [Biological activity of oil-contaminated soils]. Ufa, Gilem Publ., 2001, 376 p.

6. Maslov M. N., Maslova O. A., Ezhelev Z. S. Mikrobiologicheskaya transformatsiya organicheskogo veshchestva v neftezagryaznennykh tundrovyykh pochvakh posle rekul'tivatsii [Microbiological transformation of organic matter in oil contaminated tundra soils after remediation]. *Pochvovedenie*, 2019, no. 1, pp. 70–78. DOI: 10.1134/S0032180X19010106.

7. Anderson T.-H., Domsch K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (q CO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 1993, vol. 25, no. 3, pp. 393–395.

8. Guzev V. S., Levin S. V. Perspektivy ekologo-mikrobiologicheskoy ekspertizy sostoyaniya pochv pri antropogennykh vozdeystviyakh [Prospects of ecological-microbiological expertise of soil condition under anthropogenic impacts]. *Pochvovedenie*, 1991, no. 9, pp. 50–62.

9. Polyanskaya L. M., Zvyagintsev D. G. Soderzhanie i struktura mikrobnoy massy kak pokazatel' ekologicheskogo sostoyaniya pochv [Content and structure of microbial mass as an indicator of the ecological state of soils]. *Pochvovedenie*, 2005, no. 6, pp. 706–714.

10. Kuznetsova T. V., Petrov A. M., Knyazev I. V., Khabibullin R. E. Sostav mikrobnyykh soobshchestv pri raznom soderzhanii nefteproduktov v serykh lesnykh pochvakh [Composition of microbial communities at different contents of oil products in gray forest soils]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 14, pp. 165–168.

11. Karimullin L. K., Petrov V. M., Vershinin A. A., Shurmina N. V. Fiziologicheskaya aktivnost' pochv pri raznykh urovnyakh neftyanogo zagryazneniya [Physiological activity of soils at different levels of oil pollution]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 797–803.

12. Ecological Certificate of Conformity № RA.RU.11NA15.P.00114 «Organic granular fertilizer on the basis of sewage sludge, produced serially according to TU 37.00.20-001-03317648-2022 at the sewage treatment facilities of Kazan city». Issued to LLC "BIFAR-Ecology" validity period 16.08.2022–15.08.2025 (In Russian).

13. Shagidullin R. R., Ivanov D. V., Petrov A. M., Kuznetsova T. V., Knyazev I. V. Kharakteristiki i napravleniya utilizatsii termomekhanicheski obrabotannogo osadka gorodskikh stochnykh vod [Characteristics and directions of utilization of thermomechanically treated municipal sewage sludge]. *Materialy XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekologiya rodnogo kraya: problemy i puti ikh resheniya»* (g. Kirov, 23–

24 апреля 2023 г.) [Proceedings of the XVIII All-Russian scientific-practical conference with international participation "Ecology of native land: problems and ways of their solution" (Kirov, April 23–24, 2023)]. Kirov, 2023, vol. 1, pp. 411–415.

14. Utombaeva A. A., Petrov A. M., Zaynulgabidinov E. R., Kuznetsova T. V., Vershinin A. A., Ivanov D. V., Shagidullin R. R. Vliyanie granulyata osadka stochnykh vod na kharakteristiki seroy lesnoy pochvy i produktivnost' rasteniy [Effect of sewage sludge granulate on gray forest soil characteristics and plant productivity]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*, 2023, no. 1, pp. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.52.60>.

15. PND F 16.1.2.2.22-98. Methodology for performing measurements of the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments by infrared spectrometry method. Moscow, 1998 (publ. 2005). 13 p. (In Russian).

16. Utombaeva A. A., Vershinin A. A., Zaynulgabidinov E. R., Knyazev I. V., Petrov A. M. Izuchenie vozmozhnosti primeneniya osadkov stochnykh vod dlya biologicheskoy rekul'tivatsii neftezagryaznennoy seroy lesnoy pochvy [Study of the possibility of sewage sludge application for biological remediation of oil-contaminated gray forest soil]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*, 2023, no. 2, pp. 63–68, <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.63.69>.

17. Petrov A. M., Vershinin A. A., Karimullin L. K., Akaykin D. V., Tarasov O. Yu. Dinamika ekologo-biologicheskikh kharakteristik dernovo-podzolistykh pochv v usloviyakh dlitel'nogo neftyanogo zagryazneniya [Dynamics of ecological and biological characteristics of sod-podzolic soils under conditions of long-term oil pollution]. *Pochvovedenie*, 2016, no. 7, pp. 848–856. DOI: 107868/S0032180x16050130.

18. GOST R ISO 22030-2009 Soil quality. Biological methods. Chronic phytotoxicity in relation to higher plants. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 15 p. (In Russian).

19. Blagodatskaya E. V., Anan'eva N. D., Myakshina T. N. Kharakteristika sostoyaniya mikrobnogo soobshchestva pochvy po velichine metabolicheskogo koeffitsienta [Characterization of soil microbial community condition by the value of metabolic coefficient]. *Pochvovedenie*, 1995, no. 2, pp. 205–210.

### Информация об авторах

**А. А. Утомбаева** – аспирант, младший научный сотрудник

**А. А. Вершинин** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

**Э. Р. Зайнулгабидинов** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

**А. М. Петров** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией экологических биотехнологий

### Information about the authors

**A. A. Utombaeva** – postgraduate student, junior researcher

**A. A. Vershinin** – Ph.D. in Biology, senior researcher

**E. R. Zainulgabidinov** – Ph.D. in Biology, senior researcher

**A. M. Petrov** – Ph.D. in Biology, leading researcher, head of the environmental biotechnology laboratory

Статья поступила в редакцию 20.10.2023; одобрена после рецензирования 06.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 20.10.2023; approved after reviewing 06.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.