

УДК 579.6

DOI: 10.31040/2222-8349-2026-0-1-93-99

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЬЮ И ГЕРБИЦИДОМ, И ВЛИЯНИЕ НА НЕЕ ШТАММА-НЕФТЕДЕСТРУКТОРА И РАСТЕНИЙ-РЕМЕДИАНТОВ****© Л.А. Кульбаева, Е.В. Кузина, С.Р. Мухаматдярова,  
М.Г. Искужина, Г.Ф. Рафикова, Т.Ю. Коршунова**

Загрязнение сельскохозяйственных почв нефтепродуктами и остаточными количествами химических средств защиты растений негативно влияет на ее биологическую активность, что требует разработки эффективных методов восстановления. В лабораторном вегетационном эксперименте была оценена эффективность применения штамма бактерий-деструкторов нефти *Pseudomonas citronellolis* H2 совместно и по отдельности с растениями овса и люпина в условиях загрязнения почвы нефтью (20 г/кг), гербицидом Октапон Экстра (д.в. 2,4-Д) (2.5 мг/кг) или их комбинацией в указанных количествах. Изучались изменения численности гетеротрофных и углеводородокисляющих микроорганизмов в почве, ее респираторная и ферментативная активность, а также остаточное содержание нефтепродуктов по завершении опыта. Комбинированное загрязнение в почве без ремедиации приводило к угнетению обеих групп микроорганизмов, но комплексное применение растений и бактерий на порядок увеличивало количество углеводородокисляющих микроорганизмов. Раздельное и совместное использование люпина и *P. citronellolis* H2 увеличивало дыхательную активность почвы по сравнению с вариантами без рекультивации при всех видах загрязнения на 17.6 и 75.2% соответственно. Все способы биоремедиации приводили к росту активности почвенной каталазы. Инвертазная активность в почве с нефтью возрастала при использовании ремедиантов и микроорганизмов, в том числе одновременном. Бактеризация вне зависимости от наличия посевов растений способствовала увеличению активности инвертазы в комбинированно загрязненной почве в среднем на 38%. Минимальные значения уреазной активности были зафиксированы при внесении Октапона Экстра (0.24–0.90 мг N-NH<sub>4</sub>/г), а максимальные – в рекультивированной нефтезагрязненной почве (1.37–1.47 мг N-NH<sub>4</sub>/г). Самое низкое содержание нефтепродуктов (4.1–5.3 г/кг) в почве было достигнуто при комплексном применении растений овса и *Pseudomonas citronellolis* H2. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем при разработке методов биоремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами и гербицидами.

Ключевые слова: углеводородокисляющие и гетеротрофные микроорганизмы, овес, люпин, респираторная и ферментативная активность почвы, биодеструкция.

**Введение.** Нефть и гербициды являются наиболее устойчивыми и широко распространенными загрязнителями почв. В результате поступления этих соединений нарушается структура почвенного микробиоценоза, снижается активность ферментов и угнетаются процессы

круговорота веществ, что приводит к долговременной деградации почв и потере ими биологической активности [1]. При нефтеразливах на территории сельхозугодий остаточные количества гербицидов могут выступать в качестве дополнительных поллютантов и затруднять

КУЛЬБАЕВА Лилия Ахметовна, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,

e-mail: l.kulbaeva78@mail.ru

КУЗИНА Елена Витальевна – к.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,

e-mail: misshalen@mail.ru

МУХАМАТДЬЯРОВА Светлана Ринатовна – к.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,

e-mail: svetrm@gmail.com

ИСКУЖИНА Миляша Галимьяновна – к.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,

e-mail: ishmurzina82@mail.ru

РАФИКОВА Гульназ Фаилевна – к.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,

e-mail: rgf07@mail.ru

КОРШУНОВА Татьяна Юрьевна – д.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,

e-mail: korshunovaty@mail.ru

очистку почвы от нефтепродуктов, тем самым еще более ограничивая возможность ее эффективного применения в сельском хозяйстве.

Одним из наиболее перспективных направлений восстановления антропогенно загрязненных почв является биоремедиация, основанная на применении микроорганизмов, способных использовать загрязнители и, в частности, нефтепродукты для своей жизнедеятельности [2]. Благодаря им углеводороды частично превращаются в углекислый газ и метан, часть углерода интегрируется в клеточную биомассу, а оставшаяся часть трансформируется в гумусовые вещества и закрепляется в почве [3]. В последние годы особое внимание уделяется микробно-растительным ассоциациям, в которых растения не только стабилизируют структуру почвы, но и создают условия для развития активных микробных сообществ [4]. Корневые выделения способствуют активации ферментативных процессов и усилению дыхания почвы, что ускоряет разложение органических поллютантов. В то же время, растения различаются по эффективности участия в этих процессах, что обусловлено их физиолого-биохимическими особенностями и составом корневых экссудатов.

Растения овса и люпина рассматриваются как перспективные фиторемедианты, применяемые при загрязнении почв углеводородами и гербицидами [5, 6]. Они обладают развитой корневой системой и высокой устойчивостью к токсикантам, благодаря чему способны активировать микробиоту ризосферы и восстанавливать биологическую активность почвы. Использование данных видов совместно с микроорганизмами-деструкторами может повысить эффективность процессов очищения почвы за счет комплексного взаимодействия.

Биохимические показатели почвы, такие как дыхательная и ферментативная активность служат чувствительными индикаторами ее физиологического состояния [7]. Эти параметры отражают общее направление метаболических процессов и позволяют оценивать результативность ремедиации.

Целью работы является оценка эффективности применения микробно-растительных ассоциаций для восстановления биологической активности почвы, загрязненной нефтью и(или) гербицидом и снижения содержания в ней нефтепродуктов.

**Материалы и методы.** Для бактериализации почвы использовали штамм микроорганизмов

*Pseudomonas citronellolis* H2 из коллекции Уфимского Института биологии УФИЦ РАН (ВКМ В-3756D). Штамм разлагает нефть в жидкой среде на 72.6%, синтезирует фитогормон индоллил-3-уксусную кислоту (ИУК) и способствует росту растений в почве, загрязненной нефтью или гербицидом [8].

В качестве фиторемедиантов выступали растения люпина белого (*Lupinus albus* L.) сорта Дера (сем. *Fabaceae*) и овса посевного (*Avena sativa* L.) сорта Рысак (сем. *Poaceae*), обладающие устойчивостью к нефти и гербицидам различных классов [9].

Для обработки почвы применяли системный гербицид Октапон Экстра (д.в. 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота (2,4-Д), ООО «АХК-АГРО», г. Уфа).

В эксперименте использовали чернозем оподзоленный (*Luvic Phaeozems*) (верхний горизонт (0–20 см)), очищенный от камней и растительных остатков и характеризующийся следующими признаками: гумус – 9.5%, N<sub>общ</sub> – 0.53, P<sub>вал</sub> – 0.2, K<sub>вал</sub> – 1.6, рН<sub>KCl</sub> – 6.16%. В сосуды объемом 500 мл помещали по 400 г почвенно-песчаной смеси (9:1) или аналогичной смеси, загрязненной товарной нефтью в количестве 20.0 г/кг почвы. Далее увлажняли водой или раствором гербицида, доза внесения которого (2.5 мл/кг почвы) двухкратно превышала рекомендованную производителем.

Семена растений проращивали в течение 3 суток, после чего помещали по 5 (люпин) или 6 (овес) штук в сосуд. Почву предварительно поливали водопроводной водой или культуральной жидкостью штамма *P. citronellolis* H2 с титром 10<sup>6</sup> КОЕ/мл. Растения выращивали 21 сутки при температуре 22–24°C на светоплощадке при интенсивности светового потока 240 мкмоль м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ФАР, 14-часовом фотопериоде. Для сохранения оптимального водно-воздушного режима использовали дренаж и стеклянные трубки, влажность поддерживали на уровне 60% от полной влагоемкости. Схема эксперимента представлена в табл. 1.

Содержание нефтепродуктов в почве устанавливали гравиметрически в соответствии с ПНД Ф 16.1.41–04.

Анализ численности учитываемых эколого-трофических групп микроорганизмов осуществляли путем посева почвенной суспензии на агаризованные питательные среды: гетеротрофных – на мясо-пептонный агар, углеводородокисляющих (УВОМ) – на среду Раймонда со 100 мкл стерильного дизельного топлива в качестве источника углерода [10].

## Варианты опыта

№	Добавки к почве	№	Добавки к почве
1	Нефть	10	Н2, нефть
2	Октапон	11	Н2, Октапон
3	Нефть, Октапон	12	Н2, нефть, Октапон
4	Овес, нефть	13	Овес, Н2, нефть
5	Овес, Октапон	14	Овес, Н2, Октапон
6	Овес, нефть, Октапон	15	Овес, Н2, нефть, Октапон
7	Люпин, нефть	16	Люпин, Н2, нефть
8	Люпин, Октапон	17	Люпин, Н2, Октапон
9	Люпин, нефть, Октапон	18	Люпин, Н2, нефть, Октапон

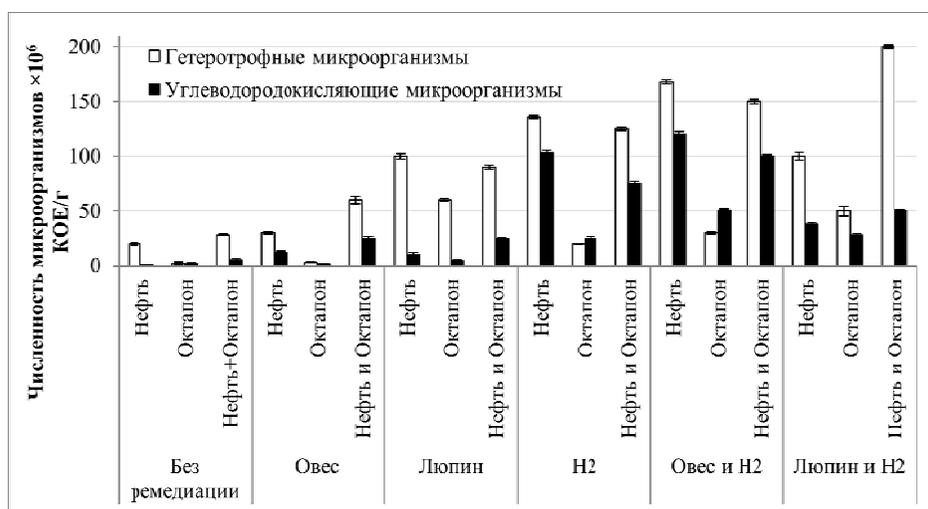


Рис. 1. Численность микроорганизмов в почве

Активность каталазы определяли газометрическим методом, основанным на измерении скорости разложения перекиси водорода при ее взаимодействии с почвой, по объему выделившегося кислорода. Инвертазную активность анализировали спектрофотометрически, путем определения количества редуцирующих сахаров, образующихся в результате гидролиза сахарозы под действием фермента. Активность уреазы оценивали колориметрическим методом через образование окрашенных комплексов при взаимодействии продуктов ферментативного гидролиза мочевины с реактивом Несслера [11].

Для количественной оценки выделившегося углекислого газа (респираторная активность) применяли реакцию с раствором NaOH, в результате которой CO<sub>2</sub> абсорбируется и образует карбонаты. Измеряя количество поглощенного углекислого газа, оценивали уровень дыхательной активности почвы [12].

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных программ MS Excel. Результаты представлены как сред-

нее ± стандартная ошибка. Достоверность различий оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента. Повторность вариантов трехкратная.

**Результаты и обсуждение.** Угнетающее действие поллютантов на почвенный микробиоценоз выражалось в том, что в вариантах без ремедиации численность гетеротрофных микроорганизмов и УВОМ была минимальной (рис. 1). Посадка растений обоих видов способствовала увеличению плотности популяции каждой из учитываемых групп, что, вероятно, объясняется поступлением дополнительных питательных веществ вместе с корневыми экссудатами, при этом более выраженный эффект наблюдался в почве с люпином. Внесение штамма Н2 вызывало заметное повышение численности обеих эколого-трофических групп микроорганизмов как под посевами овса, так и под посевами люпина. Количество УВОМ было выше при совместном применении овса и *P. citronellolis* Н2, по сравнению с аналогичными вариантами «люпин + бактерии».

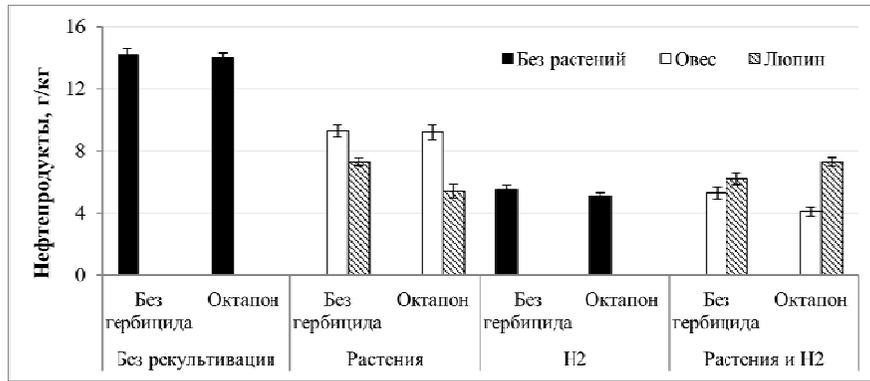


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов в почве

Т а б л и ц а 2

*Дыхательная и ферментативная активность почвы*

Вариант (добавки к почве)		Дыхание, мкг СО <sub>2</sub> -С/Г·ч	Каталаза, мл О <sub>2</sub> /Г·мин	Инвертаза, мг глюкозы/24 ч/г	Уреаза, мг N-NH <sub>4</sub> /г
Без ремедиации	Нефть	7.00±0.48	6.97±0.33	1.56±0.31	0.81±0.04
	Октапон	8.01±0.52	7.52±0.42	2.51±0.25	0.68±0.02
	Нефть и Октапон	9.02±0.45	6.78±0.46	1.93±0.14	0.99±0.02
Овес	Нефть	7.51±0.35	9.27±0.26	2.98±0.14	1.13±0.04
	Октапон	6.67±0.34	10.88±0.25	1.04±0.21	0.77±0.01
	Нефть и Октапон	7.51±0.31	9.77±0.33	0.83±0.28	0.97±0.03
Люпин	Нефть	9.17±0.38	11.63±0.45	2.71±0.26	1.29±0.02
	Октапон	9.51±0.48	10.17±0.31	2.00±0.12	0.24±0.04
	Нефть и Октапон	9.59±0.47	9.63±0.24	1.79±0.11	0.72±0.02
Н2	Нефть	8.00±0.52	9.52±0.22	3.51±0.23	0.93±0.07
	Октапон	9.17±0.37	10.00±0.56	2.09±0.19	0.59±0.02
	Нефть и Октапон	13.34±0.48	9.92±0.41	3.11±0.17	1.47±0.05
Овес и Н2	Нефть	13.34±0.36	10.15±0.38	3.56±0.24	1.37±0.05
	Октапон	9.67±0.57	10.38±0.24	2.13±0.18	0.90±0.01
	Нефть и Октапон	11.68±0.47	8.54±0.36	2.54±0.16	0.95±0.03
Люпин и Н2	Нефть	12.51±0.41	8.63±0.41	4.37±0.22	1.47±0.07
	Октапон	10.43±0.57	9.75±0.38	3.12±0.19	0.24±0.05
	Нефть и Октапон	19.18±0.39	9.13±0.49	2.36±0.13	0.72±0.03

Что касается содержания остаточных нефтепродуктов, то их уровень в почве без рекультивационных мероприятий снизился с 20 до 14.0–14.2 г/кг (рис. 2). Внесение бактерий-нефтедеструкторов способствовало уменьшению этого показателя до 5.1–5.5 г/кг. Посадка растений оказалась менее эффективной по сравнению с использованием микроорганизмов, однако также привела к сокращению количества нефтепродуктов в почве. При комбинированном воздействии загрязнителей люпин продемонстрировал более выраженные фиторемедиационные свойства чем овес. Но наилучшие результаты были достигнуты путем совместного применения растений овса с бактериями *P. citronellolis* Н2 – в этих вариантах содержание нефтепродуктов снизилось до 4.1–5.3 г/кг.

Почвенное дыхание – это процесс выделения углекислого газа почвенными организмами, включая бактерии, грибы и корни растений. Наличие поллютантов может как повышать, так и снижать респираторную активность. В почве без биорекультивации и там, где использовали растения и бактерии по отдельности, респираторная активность в присутствии гербицида Октапона Экстра была не ниже, чем в почве с нефтью (за исключением почвы, для биоремедиации которой применяли только растения овса). Комплексное загрязнение не только не ингибировало этот показатель, но чаще всего увеличивало его по сравнению с аналогичными вариантами с контаминацией либо нефтью, либо гербицидом. Использование растений люпина и бактерий, в том числе совместно, способ-

ствовало повышению эмиссии  $\text{CO}_2$  относительно почвы без рекультивации. Этот эффект, вероятно, отражает интенсификацию микробного катаболизма углеводов: УВОМ используют нефтяные соединения как источник углерода и энергии, окисляя их до промежуточных метаболитов и/или конечных продуктов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ), что в последствии проявляется в повышении дыхательной активности. Полученные данные хорошо соотносятся с результатами по количеству УВОМ и гетеротрофных микроорганизмов (рис. 1), а также содержанию остаточных нефтепродуктов в почве (рис. 2). При этом самая высокая численность микроорганизмов и скорость биодеструкции, а также респираторная активность наблюдались в бактеризованной почве под посевами растений. Эта согласованность параметров отражает тенденцию усиления метаболической активности при применении растительно-микробных ассоциаций [13].

Почвенные ферменты – это биологические катализаторы, играющие ключевую роль в разложении органических веществ и обеспечении круговорота питательных элементов. Они способствуют поддержанию жизнедеятельности микроорганизмов и улучшают плодородие почвы. Каталаза опосредует расщепление перекиси водорода на воду и кислород. Ее основная роль – защита клеток от вредного воздействия этого соединения, которое образуется при окислительных процессах, например, при разложении нефтепродуктов. Все варианты биоремедиации при всех видах загрязнения увеличивали каталазную активность по сравнению с почвой без рекультивации (табл. 2). Как и в случае с респираторной активностью не было отмечено более значительного угнетающего действия гербицида на реактивность фермента по сравнению с нефтью и комплексным загрязнением – по сравнению с обоими видами монозагрязнения.

Инвертаза ускоряет гидролиз сахарозы с образованием глюкозы и фруктозы. В почве она играет важную роль в биохимических процессах разложения органических веществ и обеспечения микроорганизмов энергией. В настоящем опыте все типы биоремедиации повышали активность этого фермента в почве с нефтью по сравнению с таковой без восстановительных мероприятий (табл. 2). В исследовании Yang и соавторов (2022) показано, что внесение бактерий *Microcococcus luteus* WN01 в загрязненную нефтью почву с растениями *Vigna unguiculata* приводило к значительному усилению активности инвертазы [14]. Штамм *P. citronellolis* H2 помимо стимулирующего действия на инверта-

зу в почве с нефтью повышал ее активность при сочетанном загрязнении независимо от наличия или отсутствия посевов растений. Вероятно, это происходило за счет его способности к деградации нефти, благодаря которой токсическое влияние поллютанта уменьшалось.

Уреазную активность рассматривают как один из показателей способности почвы к самоочищению. В зависимости от уровня загрязнения нефтью она может меняться: при средних концентрациях (до 10%) стимулируются процессы гидролиза мочевины, а с увеличением содержания нефти биохимические процессы обмена азотсодержащих соединений ослабляются. Среди всех видов загрязнения самый низкий уровень реактивности уреазы был зафиксирован в почве с гербицидом независимо от того, применялась ли в ней биоремедиация или нет (табл. 2). Восстановительные мероприятия не способствовали повышению активности фермента в почве с комплексом поллютантов, но положительно влияли на нее при загрязнении только углеводородами. Самые высокие показатели уреазной активности выявлены в бактеризованной нефтесодержащей почве под посевами растений. Wang и соавторы (2025) указывают, что при комплексной обработке почвы, загрязненной нефтью, бактериальным консорциумом совместно с суданской травой наблюдается явное улучшение биологической активности почвы: возрастает активность ряда ферментов, в том числе каталазы и уреазы. Аналогичная тенденция наблюдается в работе Meištinkas и соавт. (2024), в которой комбинированное использование микробиологического препарата, состоящего из различных видов бактерий, грибов и дрожжей и растений лядвенца заметно стимулировало активность уреазы в почве, контаминированной нефтью [15].

**Заключение.** Присутствие нефти и гербицида вызывало нарушения в системе почвы, затрагивающие как микробное сообщество, так и ключевые биологические процессы. При этом комбинированное загрязнение не оказывало более значительный негативный эффект, чем каждый из поллютантов по отдельности. Применение штамма бактерий-нефтедеструктора *Pseudomonas citronellolis* H2 с растениями овса или люпина как совместно, так и самостоятельно положительно сказывалось на биологической активности почвы, загрязненной нефтью и/или гербицидом. Это проявлялось в увеличении численности гетеротрофных и углеводородокисляющих микроорганизмов, улучшении респираторной и ферментативной активности

почвы, а также в снижении в ней содержания нефтепродуктов, особенно при одновременном действии обоих биологических агентов. Таким образом, использованные микробно-растительные ассоциации обладают определенной перспективой при разработке технологий очистки и восстановления нефтезагрязненных почв, в том числе, при наличии в них остаточных количеств гербицидов на основе 2,4-Д.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00130, <https://rscf.ru/project/23-24-00130/>*

### Литература

1. Babaniyi B.R., Thompson S.O., Ogundele O.D., Oluwole O.F. Effects of agrochemicals on soil microbial enzymes // *Ecological interplays in microbial enzymology. Environmental and microbial biotechnology* / Ed. by N.R. Maddela, A.S. Abiodun, R. Prasad. Singapore. 2022. P. 353–377. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0155-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0155-3_16)
2. Varjani S.J. Remediation processes for petroleum oil polluted soil // *Indian journal of biotechnology*. 2017. V. 16. № 2. P. 157–163.
3. Ron E.Z., Rosenberg E. Enhanced bioremediation of oil spills in the sea // *Current opinion in biotechnology*. 2014. V. 27. P. 191–194. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.02.004>
4. Wang X., Chi Y., Song S. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review // *Frontiers in microbiology*. 2024. V. 15:1347745. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1347745>
5. Wyszowski M., Kordala N. Assessment of effectiveness of organic and mineral sorbents for in situ stabilisation of petrol-contaminated soils: effect on trace element bioaccumulation in oats (*Avena sativa* L.) // *Applied sciences*. 2025. V. 15. № 21:11555. <https://doi.org/10.3390/app152111555>
6. Zhelezova S.V., Kolupaeva V.N., Stepanova E.V., Melnikov A.V., Voronov M.A., Stepanova A.E., Veller V.E. Effect of sulfonylureas residues on the lupine and vigna seedlings development during biotesting research on sod-podzolic soil // *Russian agricultural sciences*. 2023. V. 49. (Suppl 1). P. S125–S133. <https://doi.org/10.3103/S1068367423070388>
7. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the south of Russia after bioremediation // *Toxics*. 2023. V. 11. № 4:355. <https://doi.org/10.3390/toxics11040355>
8. Применение штамма бактерий *Pseudomonas citronellolis* для стимуляции роста растений-фиторемедиантов ячменя и клевера в почве, загрязненной нефтью или имазетапиром: пат. 2832341С1. Рос. Федерация № 2024111846, заявл. 30.04.24; опубл. 23.12.24; Бюл. № 36.
9. 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. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165>

10. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии. М.: Аккадемия. 2005. 608 с.
11. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука. 2005. 252 с.
12. Xu Y., Seshadri B., Bolan N., Sarkar B., Ok Y.S., Zhang W., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T., Dong Z. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals // *Environment international*. 2019. V. 125. P. 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.071>
13. Nemati B., Baneshi M.M., Akbari H., Dehghani R., Mostafaii G. Phytoremediation of pollutants in oil-contaminated soils by *Alhagi camelorum*: evaluation and modeling // *Scientific reports*. 2024. V. 14. № 1:5502. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56214-y>
14. Yang K.M., Poolpak T., Pokethitiyook P., Kruatrachue M. Assessment of dynamic microbial community structure and rhizosphere interactions during bioaugmented phytoremediation of petroleum contaminated soil by a newly designed rhizobox system // *International journal of phytoremediation*. 2022. V. 24. № 14. P. 1505–1517.
15. Meištininkas R., Vaškevičienė I., Piotrowicz-Cieślak A.I., Krupka M., Žaltauskaitė J. Sustainable recovery of the health of soil with old petroleum hydrocarbon contamination through individual and microorganism-assisted phytoremediation with *Lotus corniculatus* // *Sustainability*. 2024. V. 16. № 17:7484. <https://doi.org/10.3390/su16177484>

### References

1. Babaniyi B.R., Thompson S.O., Ogundele O.D., Oluwole O.F. Effects of agrochemicals on soil microbial enzymes // *Ecological interplays in microbial enzymology. Environmental and microbial biotechnology* / Ed. by N.R. Maddela, A.S. Abiodun, R. Prasad. Singapore, 2022, pp. 353–377, [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0155-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0155-3_16)
2. Varjani S.J. Remediation processes for petroleum oil polluted soil // *Indian journal of biotechnology*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 157–163.
3. Ron E.Z., Rosenberg E. Enhanced bioremediation of oil spills in the sea // *Current opinion in biotechnology*, 2014, vol. 27, pp. 191–194, <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.02.004>
4. Wang X., Chi Y., Song S. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review // *Frontiers in microbiology*, 2024, vol. 15:1347745, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1347745>
5. Wyszowski M., Kordala N. Assessment of effectiveness of organic and mineral sorbents for in situ stabilisation of petrol-contaminated soils: effect on trace element bioaccumulation in oats (*Avena sativa* L.) // *Applied sciences*, 2025, vol. 15, no. 21:11555. <https://doi.org/10.3390/app152111555>
6. Zhelezova S.V., Kolupaeva V.N., Stepanova E.V., Melnikov A.V., Voronov M.A., Stepano-

va A.E., Veller V.E. Effect of sulfonylureas residues on the lupine and vicia seedlings development during biotesting research on sod-podzolic soil // Russian agricultural sciences, 2023, vol. 49 (Suppl 1), pp. S125–S133. <https://doi.org/10.3103/S1068367423070388>

7. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the south of Russia after bioremediation // Toxics, 2023, vol. 11, no. 4:355, <https://doi.org/10.3390/toxics11040355>

8. Primenenie shtamma bakterij *Pseudomonas citronellolis* dlya stimulyacii rosta rastenij-fitoremediantov yachmenya i klevera v pochve, zagryaznennoj neft'yu ili imazetapirom: pat. 2832341C1. Ros. Federaciya no. 2024111846, zayavl. 30.04.24; publ. 23.12.24: Byul. № 36.

9. Korshunova T.Yu., Iskuzina M.G., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Rameev T.V. Evaluation of the influence of various pollutant on the growth and development of remediant plants // Ėkobioteh, 2023, vol. 6, no. 3, pp. 156–165, <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165>

10. Netrusov A.I. Praktikum po mikrobiologii. Moscow: Akademiya, 2005, 608 p.

11. Xaziev F.X. Metody pochvennoj e'nzimologii. Moscow: Nauka, 2005, 252 p.

12. Xu Y., Seshadri B., Bolan N., Sarkar B., Ok Y.S., Zhang W., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T., Dong Z. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals // Environment international, 2019, vol. 125, pp. 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.071>

13. Nemati B., Baneshi M.M., Akbari H., Dehghani R., Mostafaii G. Phytoremediation of pollutants in oil-contaminated soils by *Alhagi camelorum*: evaluation and modeling // Scientific reports, 2024, vol. 14, no. 1:5502, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56214-y>

14. Yang K.M., Poolpak T., Pokethitiyook P., Kruatrachue M. Assessment of dynamic microbial community structure and rhizosphere interactions during bioaugmented phytoremediation of petroleum contaminated soil by a newly designed rhizobox system // International journal of phytoremediation, 2022, vol. 24, no. 14, pp. 1505–1517.

15. Meištinkas R., Vaškevičienė I., Piotrowicz-Cieślak A.I., Krupka M., Žaltauskaitė J. Sustainable recovery of the health of soil with old petroleum hydrocarbon contamination through individual and microorganism-assisted phytoremediation with *Lotus corniculatus* // Sustainability, 2024, vol. 16, no. 17:7484, <https://doi.org/10.3390/su16177484>

---

## BIOLOGICAL ACTIVITY OF SOIL CONTAMINATED WITH OIL AND HERBICIDE AND THE INFLUENCE OF A OIL-DEGRADING STRAIN AND PHYTOREMEDIATOR PLANTS ON IT

© L.A. Kulbaeva, E.V. Kuzina, S.R. Mukhamatdyarova,  
M.G. Iskuzhina, G.F. Rafikova, T.Y. Korshunova

Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences,  
69, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

Contamination of agricultural soils with petroleum products and residual amounts of chemical plant protection products negatively affects its biological activity, which requires the development of effective restoration methods. In a laboratory vegetation experiment, the effectiveness of using a strain of *Pseudomonas citronellolis* H2 oil destructor bacteria together and separately with oat and lupine plants in conditions of soil contamination with oil (20 g/kg), Octapone Extra herbicide (active substance 2,4-D) (2.5 mg/kg) or their combination in the indicated amounts was evaluated. The changes in the number of heterotrophic and hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the soil, its respiratory and enzymatic activity, as well as the residual content of petroleum products at the end of the experiment were studied. Combined contamination in the soil without remediation led to the suppression of both groups of microorganisms, but the combined use of plants and bacteria increased the number of hydrocarbon-oxidizing microorganisms by an order of magnitude. Separate and shared use of lupine and *P. citronellolis* H2 increased soil respiration activity by 17.6 and 75.2%, respectively, compared with non-reclamation options for all types of pollution. All bioremediation methods led to an increase in the activity of soil catalase. Invertase activity in soil with oil increased with the use of remediant and microorganisms, including simultaneous use. Bacterization, regardless of the presence of crops, contributed to an increase in invertase activity in combined contaminated soil by an average of 38%. The minimum values of urease activity were recorded when Octapone Extra was applied (0.24–0.90 mg N-NH<sub>4</sub>/g), and the maximum values were recorded in reclaimed oil-contaminated soil (1.37–1.47 mg N-NH<sub>4</sub>/g). The lowest content of petroleum products (4.1–5.3 g/kg) in the soil, this was achieved with the combined use of oat plants and *Pseudomonas citronellolis* H2. The results obtained can be used further in the development of methods for bioremediation of soils contaminated with petroleum products and herbicides.

Keywords: hydrocarbon-oxidizing and heterotrophic microorganisms, oats, lupine, respiratory and enzymatic activity of soil, biodegradation.