



Реакция микробного сообщества ризосферы растений-фиторемедиантов на нефтяное загрязнение и применение биопрепаратов

А.С. Григориади*✉, Н.В. Зобкова**, Ю.М. Сотникова*,
А.А. Ямалеева*, Р.Г. Фархутдинов*

*Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Российская Федерация

**Оренбургский государственный медицинский университет, г. Оренбург, Российская Федерация

Аннотация. Целью представленного исследования являлась оценка микробиологической активности ризосферы растений, произрастающих в условиях нефтяного загрязнения и в присутствии биопрепаратов разного спектра действия. В качестве растений-фиторемедиантов были выбраны подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.) и житняк гребневидный (*Agropyron cristatum* L.). Для обработки почвы использовали углеводородокисляющий препарат «Ленойл» и два препарата неспецифического действия, оказывающие ростстимулирующее влияние: «Елена» и «Азолен». Для проведения биоремедиации с использованием растений была выбрана концентрация загрязнителя в почве 4%. В результате исследования было показано, что в ризосфере растений под влиянием загрязнения незначительно увеличивалось общее микробное число и количество микроскопических грибов, но снижалась численность аминоавтотрофов и целлюлозолитиков. Внесение в почву неспецифических биопрепаратов активировало развитие микроорганизмов-деструкторов, несмотря на то, что микроорганизмы в составе препаратов не предназначены для детоксикации и очистки почвы. Под влиянием биопрепаратов в ризосфере растений подсолнечника и житняка отмечалось увеличение или стабилизация микробиологической активности, что может свидетельствовать об их положительном влиянии на микробиологические процессы, протекающие в почве, находящейся в условиях загрязнения. В целом в ризосфере растений *Agropyron cristatum* L. складывалась более благоприятная среда для развития таких групп бактерий, как аминоавтотрофы, целлюлозолитики, микромицеты и углеводородокисляющие бактерии. Среди изученных вариантов обработки почвы биопрепаратами для фиторемедиационных мероприятий предпочтительным является совмещение внесения в нефтезагрязненную почву биопрепарата «Ленойл» и посадки растений-фиторемедиантов.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, фиторемедиация, *Helianthus annuus* L., *Agropyron cristatum* L., микробные препараты, ризосферная микробиота

Благодарности. В работе использовались биопрепараты, предоставленные ЗАО НПП «Биомедхим» (<http://bmch.su>).

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке проекта Российского научного фонда № 23-24-00358 (<https://rscf.ru/project/23-24-00358/>).

Для цитирования: Григориади А.С., Зобкова Н.В., Сотникова Ю.М., Ямалеева А.А., Фархутдинов Р.Г. Реакция микробного сообщества ризосферы растений-фиторемедиантов на нефтяное загрязнение и применение биопрепаратов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 4. С. 523–531. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-523-531. EDN: LUBZKE.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Response of the rhizosphere microbial community of phytoremediation plants to oil pollution and the application of biopreparations

Anna S. Grigoriadi*✉, Natalia V. Zobkova**, Yuliya M. Sotnikova*,
Anna A. Yamaleeva*, Rashit G. Farkhutdinov*

*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

**Orenburg State Medical University, Orenburg, Russian Federation

© Григориади А.С., Зобкова Н.В., Сотникова Ю.М., Ямалеева А.А., Фархутдинов Р.Г., 2023

Abstract. The present study aims to evaluate microbiological activity in the rhizosphere of plants growing under oil pollution conditions and in the presence of biopreparations having a different spectrum of action. Common sunflower (*Helianthus annuus* L.) and crested wheatgrass (*Agropyron cristatum* L.) were selected as phytoremediation plants. The soil was treated with the hydrocarbon-oxidizing preparation "Lenoil" and two preparations of nonspecific action having a growth-stimulating effect: "Elena" and "Azolen". A soil pollutant concentration of 4% was selected for conducting plant-based bioremediation. The study showed a slight increase in the total microbial count and the microscopic fungi count in the rhizosphere of plants due to pollution, while indicating a decrease in the count of amino-autotrophs and cellulolytics. The introduction of non-specific biopreparations into the soil promoted the growth of destructive microorganisms despite the fact that microorganisms in the preparations are not designed for soil detoxification and decontamination. Under the effect of biopreparations, the rhizosphere of sunflower and wheatgrass plants exhibited an increase or stabilization of microbiological activity, which may indicate their positive effect on microbiological processes occurring in contaminated soil. The rhizosphere of *Agropyron cristatum* L. plants generally provided a more favorable environment for the development of such groups of bacteria as amino-autotrophs, cellulolytics, micromycetes, and hydrocarbon-oxidizing bacteria. Of the studied variants of soil treatment with biopreparations for phytoremediation purposes, it is recommended to combine the application of the "Lenoil" biopreparation and the planting of phytoremediation plants in oil-contaminated soil.

Keywords: oil pollution, phytoremediation, *Helianthus annuus* L., *Agropyron cristatum* L., microbial preparations, rhizosphere microbiota

Acknowledgements. CJSC RPE "Biomedkhim" (<http://bmch.su/>) kindly provided with biological preparations for the study.

Funding. The Russian Science Foundation, (project no. 23-24-00358, <https://rscf.ru/project/23-24-00358/>) supported the study.

For citation: Grigoriadi A.S., Zobkova N.V., Sotnikova Yu.M., Yamaleeva A.A., Farkhutdinov R.G. Response of the rhizosphere microbial community of phytoremediation plants to oil pollution and the application of biopreparations. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(4):523-531. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-523-531. EDN: LUBZKE.

ВВЕДЕНИЕ

Нефть и продукты ее переработки являются частой причиной загрязнения почвы и, как следствие, нарушения структуры микробиомов и фитоценозов [1–3]. Это приводит к изъятию из оборота загрязненных земель, реабилитировать которые крайне сложно. Разработка эффективных методов борьбы с данным типом загрязнителей является перспективным направлением экологической биотехнологии. К биообъектам, применяемым в технологиях рекультивации почв, относятся микроорганизмы, в первую очередь углеводородокисляющие, и растения-фиторемианты [4–6]. Бактерии имеют способность утилизировать нефтяные углеводороды за счет активации ферментных систем и являются ведущим звеном в процессе детоксикации ксенобиотиков. Роль растений в очистке почвы от нефтяного загрязнения значительно сложнее. Они способны аккумулировать, экстрагировать, стабилизировать загрязнители, ко всему прочему, в их прикорневой зоне создаются условия, в которых активно происходит размножение и рост микроорганизмов, участвующих в деструкции углеводородов [7–10]. Для усиления эффективности мероприятий по очистке и восстановлению плодородия почвы перспективно использовать комплексные методы, включающие как биопрепараты, так и растения-фиторемианты. Однако, так или иначе, ключевым объектом в процессе рекультивации остаются микроорганизмы. В связи с этим целью представленного исследования являлась оценка микробиологической активности ризосферы растений, произрастающих в условиях нефтяного загрязнения и в присутствии биопрепаратов разного спектра действия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве растений-фиторемиантов нами были выбраны подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.) и житняк гребневидный (*Agropyron cristatum* L.). Подсолнечнику предпочтение было отдано из-за его способности аккумулировать загрязнители [11]. В свою очередь житняк, обладая мочковатой корневой системой, образует дерновину [12], что увеличивает площадь, благоприятную для развития микроорганизмов.

Для постановки опыта использовали чернозем южный Оренбургской области. По 400 г почвы помещали в вегетационные сосуды объемом 0,5 л с дренажом, загрязняли товарной нефтью в концентрации 4%. Повторность опыта была трехкратной. Спустя 30 суток, исходя из рекомендаций производителя, вносили биопрепараты из расчета 0,3 мл на 100 г почвы и производили посев заранее простерилизованных в хлорсодержащем растворе семян растений-фиторемиантов в количестве 3–5 шт. в каждый сосуд. Далее сосуды помещали на световую площадку при 12-часовом световом дне и температуре 22–25 °С. Полив растений осуществляли через день. Для дальнейших исследований использовали 30-суточные растения. В качестве контроля использовали растения, выращенные на незагрязненной почве.

Для обработки почвы применялись микробные препараты разнонаправленного действия. В качестве активного агента деструкции нефтяных углеводородов использовали препарат «Ленойл», в состав которого входят бактерии *Pseudomonas turukhanskensis* ИБ 1.1 (титр не менее 1×10^8 КОЕ/г). Препарат «Азолен», созданный на основе бактерий *Azotobacter vinelandii* ИБ (титр $(4-8) \times 10^9$ КОЕ/мл), представляет собой биоудобрение, обогащающее почву биогенным азотом, и обладает

фунгицидным и ростостимулирующим действием. Препарат «Елена», состоящий из *Pseudomonas aureofaciens* ИБ 51 (титр $(2-3) \times 10^9$ КОЕ/мл), предназначен для оздоровления и восстановления плодородия земли и для защиты растений от инфекций. Выбор данных препаратов обусловлен тем, что один из них представляет собой активные углеводородокисляющие бактерии [13], второй может способствовать нормализации баланса между азотом и углеродом, который всегда нарушен в случае нефтяного загрязнения¹, третий же способен защитить растения-фиторемигранты от влияния фитопатогенных грибов, являющихся характерными представителями нарушенной почвы [14].

Почвенные образцы ризосферы получали путем встряхивания прилипших частиц с корней растений и далее счищали стерильным скальпелем с соблюдением условий стерильности². Для определения микробиологической активности почвы использовали показатели численности микроорганизмов разных эколого-физиологических групп. Культивирование гетеротрофных бактерий, микроорганизмов, использующих минеральные формы азота (аминоавтотрофов), целлюлозолитических микроорганизмов, микроскопических грибов и углеводородокисляющих микроорганизмов проводили на следующих питательных средах: мясо-пептонный агар, крахмал-аммиачный агар, среда Гетчинсона, Чапека и Диановой – Ворошиловой соответственно³.

Обработку результатов и построение диаграмм проводили с помощью лицензированного пакета программ Excel (MS Office 2010). Рассчитывали среднее арифметическое, ошибку средней арифметической, доверительный интервал.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предварительно нами проводилось исследование уровня фитотоксичности почв с разным уровнем загрязнения в отношении выбранных растений для выявления оптимальной концентрации нефти, которая не будет значительно подавлять ростовые процессы и в которой растения будут способны выполнять функции фиторемигрантов. Исходная всхожесть семян житняка гребневидного была хуже, чем всхожесть семян подсолнечника, и составляла 46%. С увеличением концентрации нефти для обоих растений показатель снижался (рис. 1). Начиная с уровня загрязнения 6% всхожесть

снижалась на 35% и более. Также была оценена всхожесть семян подсолнечника под влиянием биопрепаратов. В результате было выявлено, что препараты «Ленойл» (всхожесть 65%) и «Елена» (всхожесть 57%) не оказали значительного влияния на прорастание семян по сравнению с вариантом опыта, в котором использовалась водопроводная вода (всхожесть 67%). Обработка препаратом «Азолен» стимулировала прорастание семян до уровня 95%.

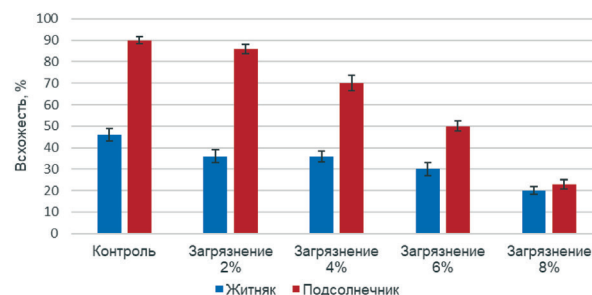


Рис. 1. Всхожесть семян растений-фиторемигрантов под влиянием разных концентраций нефти в почве

Fig. 1. Germination of seeds of phytoremediant plants under the influence of different oil concentrations for soil pollution

Дополнительно была проведена морфометрическая оценка проростков растений подсолнечника в условиях загрязнения почвы нефтью в разных концентрациях (табл. 1). Нефтяные углеводороды оказывали на растение токсическое действие, что выразилось в снижении длины как подземной, так и надземной части. Однако снижение параметров было неравномерным. В вариантах опыта с 4 и 6%-м загрязнением морфометрические показатели не сильно отличались друг от друга, в частности при увеличении концентрации нефти длина корня снижалась на 31 и 37%. В связи с этим однозначно выделить уровень загрязнения, с которого начинается интенсивное влияние поллютанта, не удалось. Умеренное изменение длины проростков при достаточно высокой степени загрязнения не было связано с улучшением состояния растений: это явление, скорее, вызвано тем, что некоторые компоненты нефти по своей химической структуре напоминают стимуляторы роста растений [15–17]. Также следует отметить обратную зависимость массы проростков от концентрации поллютанта в почве (см. табл. 1).

Таблица 1. Морфометрические параметры растений *Helianthus annuus* L. под влиянием разных концентраций нефти в почве

Table 1. Morphometric parameters of *Helianthus annuus* L. plants under the influence of different oil concentrations in the soil

Показатель	Контроль	Концентрация нефти, %			
		2	4	6	8
Длина корня, мм	58,10±3,80	40,50±4,25	36,90±1,80	29,40±1,90	17,40±1,70
Длина стебля, мм	28,10±2,45	20,50±2,10	18,80±1,90	16,80±1,50	13,80±1,25
Масса проростка, г	1,54±0,11	1,83±0,15	1,32±0,07	1,24±0,07	0,80±0,04

¹Биккинина А.Г. Разработка технологии рекультивации нефтезагрязненных объектов с использованием комплекса микробиологических препаратов: дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.23. Уфа, 2007. 113 с.

²Асеева И.В., Бабьева И.П., Бызов Б.А., Гузев В.С., Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.

³Практикум по микробиологии / под ред. А.И. Нетрусова: учеб. пособие. М.: ИЦ «Академия», 2005. 608 с.

Таким образом, для проведения дальнейшей биоремедиации с использованием растений была определена концентрация нефти в 4%. Аналогичные данные неоднократно были получены нами, а также другими исследователями [18, 19].

Использование микробных препаратов для рекультивации нефтезагрязненной почвы, безусловно, влияет на количественный состав аборигенной микробиоты, в том числе в ризосфере растений-фиторемедиантов. Наиболее общими показателями, характеризующими почвенный микробоценоз, являются значение общего микробного числа (ОМЧ) и численность аминокислототрофов. Показатель ОМЧ соответствует численности гетеротрофных бактерий, выросших на питательной среде общего назначения. Нефтяное загрязнение не оказало значительного влияния на количество гетеротрофных микроорганизмов в ризосфере подсолнечника и привело к стимуляции развития данной группы на 44% в прикорневой зоне житняка (рис. 2). После внесения препарата «Ленойл» ОМЧ в загрязненной почве по сравнению с загрязненными образцами ризосферы подсолнечника не изменилось, в почвенных же образцах житняка отмечалось незначительное снижение указанного параметра, что может быть отнесено к погрешностям отбора проб. Рядом авторов уже отмечалось подобное явление роста числа гетеротрофных бактерий, и объяснялось оно тем, что углеводороды нефти могут использоваться в качестве источника углерода [20, 21]. Использование препаратов «Елена» и «Азолен» привело к незначительной стимуляции роста гетеротрофных микроорганизмов в ризосфере житняка, показатель ОМЧ вырос по сравнению с контролем на 48 и 30% соответственно. Однако в случае подсолнечника влияние рекультивирующих биоагентов не оказало стимулирующего влияния на показатель ОМЧ. Наблюдаемый рост численности гетеротрофных бактерий может быть связан с тем, что для некоторых видов почвенных бактерий в ризосфере житняка за счет корневых выделений создается благоприятная среда как в условиях загрязнения, так и в присутствии биопрепаратов.

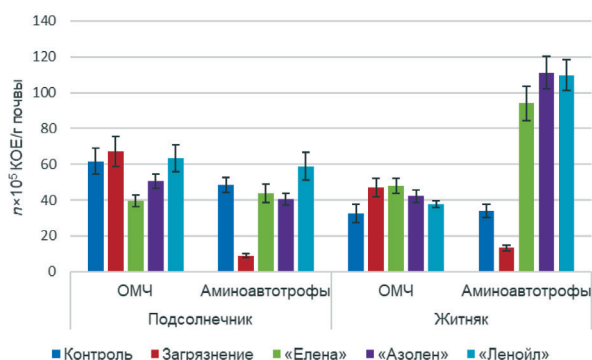


Рис. 2. Численность гетеротрофных микроорганизмов и аминокислототрофов в ризосфере растений в условиях загрязнения и рекультивации

Fig. 2. The number of heterotrophic microorganisms and amino acidotrophs in the rhizosphere of plants under the influence of pollution and bioremediation

При изучении изменения численности аминокислототрофов было выявлено значительное ингибирующее влияние на них нефти (см. рис. 2). Показатель снизился

в 2,5 и 5 раз в ризосфере житняка и подсолнечника соответственно, что может быть связано с общим обеднением нефтезагрязненной почвы азотом [22]. В прикорневой зоне подсолнечника численность микроорганизмов, использующих минеральные формы азота, под влиянием биопрепаратов восстановилась до контрольных значений. В ризосфере житняка численность аминокислототрофов под влиянием препаратов «Елена», «Азолен» и «Ленойл» выросла в 8 раз (см. рис. 2). Наличие доступных минеральных форм азота способствует развитию аминокислототрофов, что подтверждает положительное влияние житняка на азотный баланс в почве [23], а также свидетельствует о восстановлении нарушенного равновесия между содержанием углерода и азота, характерного для нефтезагрязненных почв [22, 24]. Также следует отметить дисбаланс в соотношениях численности гетеротрофов и микроорганизмов, использующих минеральные формы азота, в ризосфере житняка. Показатель соотношения численности бактерий на соответствующих питательных средах (крахмал-амиачный агар / мясо-пептонный агар) характеризуется как коэффициент минерализации [25]. Увеличение численности аминокислототрофов приводит к росту данного коэффициента, что свидетельствует об интенсивности процессов минерализации, которая в числе прочего может затрагивать компоненты нефти. Таким образом, обработка биопрепаратами в значительной степени стимулировала развитие микроорганизмов, использующих минеральные формы азота, в ризосфере всех исследуемых растений-фиторемедиантов, что может свидетельствовать об изменении нарушенного азотного баланса в почве. Различий же во влиянии препаратов отмечено не было.

В составе прикорневой микробиоты к постоянно присутствующим микроорганизмам относятся представители микроскопических грибов (микромикеты) и целлюлозолитиков. Из данных, представленных в табл. 2, видно, что численность целлюлозолитиков снизилась под влиянием загрязнения нефти в ризосфере подсолнечника и житняка в 10 и 6 раз соответственно. Указанная группа микроорганизмов является высокочувствительной к действию поллютанта, что было показано уже неоднократно [5, 26]. Обработка препаратом «Ленойл» благоприятно повлияла на показатель численности целлюлозолитиков в прикорневой зоне житняка, однако токсическое действие полностью не ликвидировалось и восстановление до контрольных значений не произошло. Из всех препаратов в опытах с растениями подсолнечника на численность целлюлозоразрушающих микроорганизмов наиболее благоприятное влияние оказал препарат «Елена». Тем не менее и в данном варианте опыта показатель был в 2 раза ниже контрольных значений.

Микроскопические грибы способны активно развиваться в нарушенных почвах [27, 28], что подтвердилось результатами проведенного опыта. В присутствии нефти в почве численность микромикетов выросла в 2,3 раза в ризосфере подсолнечника и на 87% в ризосфере житняка. Обработка биопрепаратами привела к снижению данного показателя в прикорневой зоне подсолнечника (см. табл. 2), что свидетельствует о нормализации соотношения бактерий и грибов в микробиоме почвы. Внесение препарата «Азолен» перед посевом житняка

Таблица 2. Численность некоторых эколого-физиологических групп микроорганизмов в ризосфере растений в условиях загрязнения и рекультивации

Table 2. The number of some ecologo-physiological groups of microorganisms in the rhizosphere of plants under the influence of pollution and bioremediation

Показатель	Углеродородокисляющие микроорганизмы, $n \times 10^3$ КОЕ/г почвы		Микромицеты, $n \times 10^2$ пропагул/г почвы		Целлюлозолитики, $n \times 10^2$ КОЕ/г почвы	
	<i>Helianthus annuus</i> L.	<i>Agropyron cristatum</i> L.	<i>Helianthus annuus</i> L.	<i>Agropyron cristatum</i> L.	<i>Helianthus annuus</i> L.	<i>Agropyron cristatum</i> L.
Контроль	1,10±0,04	0,53±0,02	12,00±1,61	19,30±2,46	28,20±1,91	58,90±4,10
Загрязнение	7,50±0,22	11,00±0,44	27,70±2,23	35,70±3,35	2,70±0,30	9,30±0,51
«Елена»	40,00±2,10	10,30±0,51	11,10±2,12	29,50±3,42	15,60±1,97	15,90±2,47
«Азолен»	11,50±0,81	18,00±1,62	9,30±1,34	37,30±2,74	12,20±1,82	31,30±2,69
«Ленойл»	140,00±11,20	132,40±7,90	4,80±0,34	30,40±3,25	8,80±0,79	40,70±3,25

не повлияло на численность микроскопических грибов. Препарат «Елена» оказал благоприятное воздействие на данный показатель, снизив этот параметр на 17% по сравнению с образцами загрязненной почвы. Однако желаемого биофунгицидного действия от данного препарата получено не было.

К специфической группе микроорганизмов, развивающихся в смоделированных условиях, относятся углеводородокисляющие бактерии. Они присутствуют в почве естественным образом, однако внесение питательного субстрата в виде нефтяных углеводородов приводит к росту их численности [4, 5, 29]. Аналогичные выводы были получены нами при анализе данной группы микроорганизмов в ризосфере растений-фиторемедиантов (см. табл. 2). Внесение в почву товарной нефти привело к увеличению показателя в 7 и 21 раз в ризосфере подсолнечника и житняка соответственно. Значительного роста углеводородокисляющих микроорганизмов после применения неспецифического биопрепарата «Азолен» отмечено не было. В образцах, обработанных препаратом «Ленойл», зарегистрированы максимальные значения численности данной группы микроорганизмов. Достоверной разницы между показателями в прикорневой зоне подсолнечника и житняка не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате предварительных исследований фитотоксичности различных концентраций нефти в отношении изучаемых растений было определено,

что для проведения фиторемедиации содержание загрязнителя может составлять 4% от массы почвы без существенного негативного влияния на растения.

В результате оценки численности разных групп микроорганизмов в ризосфере растений *Helianthus annuus* L. и *Agropyron cristatum* L. отмечалось увеличение или стабилизация микробиологической активности при обработке нефтезагрязненной почвы всеми исследуемыми биопрепаратами, что может свидетельствовать об их положительном влиянии на микробиологические процессы, протекающие в почве, находящейся в условиях загрязнения. В целом в ризосфере растений *Agropyron cristatum* L. складывалась более благоприятная среда для развития таких групп бактерий, как аминоавтотрофы, целлюлозолитики, микромицеты и углеводородокисляющие бактерии. Это может быть связано со спецификой как самой корневой системы растения, так и прикорневых выделений, характерных для растений семейства Злаки.

Из представленных вариантов обработки почвы для ее восстановления и очищения от нефтяного загрязнения наиболее предпочтительным оказалось совмещение внесения в загрязненную почву биопрепарата «Ленойл» и выращивания растений-фиторемедиантов. В данном случае происходило усиление потенциала предложенного способа рекультивации в результате внесения углеводородокисляющих микроорганизмов в виде биопрепарата, а также вследствие растительно-микробного взаимодействия, которое вносит большой вклад в процессы детоксикации загрязнителей [6, 9, 21].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мелехина Е.Н., Канев В.А., Маркарова М.Ю., Надежкин С.М., Новаковский А.Б., Таскаева А.А. [и др.]. Оценка состояния загрязненных нефтью экосистем Европейской Субарктики: мультидисциплинарный подход // Теоретическая и прикладная экология. 2020. N 2. С. 123–129. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-2-123-129. EDN: WWQBYT.
2. Рябухина М.В., Филиппова А.В., Рябинина З.Н. Фитомониторинг районов сбора нефти и газа со скважин Романовского месторождения Оренбургской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. N 6. С. 202–204. EDN: VDOOVV.
3. Shi L., Liu Z., Yang L., Fan W. Effects of oil pollution on soil microbial diversity in the Loess hilly areas, China // Annals of Microbiology. 2022. Vol. 72. P. 26. DOI: 10.1186/s13213-022-01683-7.
4. Логинов О.Н., Силищев Н.Н., Бойко Т.Ф., Галимзянова Н.Ф. Биорекультивация: микробиологические технологии очистки нефтезагрязненных почв и техногенных отходов. М.: Наука, 2009. 111 с. EDN: QLAIWR.
5. Коршунова Т.Ю., Четвериков С.П., Бакаева М.Д., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Четверикова Д.В. [и др.]. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) // Прикладная биохимия

и микробиология. 2019. Т. 55. N 4. С. 338–349. DOI: 10.1134/S0555109919040093. EDN: HNVQRU.

6. Wang A., Fu W., Feng Y., Liu Z., Song D. Synergetic effects of microbial-phytoremediation reshape microbial communities and improve degradation of petroleum contaminants // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 429. P. 128396. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128396.

7. Merkl N., Schultze-Kraft R., Infante C. Phytoremediation in the tropics – influence of heavy crude oil on root morphological characteristics of graminoids // *Environmental Pollution*. 2005. Vol. 138, no. 1. P. 86–91. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.02.023.

8. Kechavarzi C., Pettersson K., Leeds-Harrison P., Ritchie L., Ledin S. Root establishment of perennial ryegrass (*L. perenne*) in diesel contaminated surface soil layers // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 145, no. 1. P. 68–74. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.03.039.

9. Турковская О.В., Позднякова Н.Н., Муратова А.Ю., Дубровская Е.В., Голубев С.Н. Деградационный потенциал растений и микроорганизмов в отношении полициклических ароматических углеводородов // *Биомика*. 2018. Т. 10. N 2. С. 193–201. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2018-27. EDN: XVBOHZ.

10. Kafle A., Timilsina A., Gautam A., Adhikari K., Bhattarai A., Aryal N. Phytoremediation: mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents // *Environmental Advances*. 2022. Vol. 8. P. 100203. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100203.

11. Киреева Н.А., Григориади А.С., Багаутдинов Ф.Я. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Теоретическая и прикладная экология*. 2011. N 3. С. 4–10. EDN: OOFKOH.

12. Деревянникова М.В. Изучение коллекции житняка гребневидного (*Agropyron pectiniforme*) по зимостойкости и энергии весеннего отрастания травостоя в условиях Ставропольского края // *Сельскохозяйственный журнал*. 2020. N 5. С. 30–36. DOI: 10.25930/2687-1254/005.5.13.2020. EDN: XKDIKJ.

13. Коршунова Т.Ю., Логинов О.Н. Токсикологическая оценка биопрепарата-нефтедеструктора «Ленойл»® – NORD, СХП // *Токсикологический вестник*. 2017. N 3. С. 58–60. DOI: 10.36946/0869-7922-2017-3-58-60. EDN: ZAGZJT.

14. Киреева Н.А., Рафикова Г.Ф., Галимзянова Н.Ф., Логинов О.Н., Григориади А.С., Якупова А.Б. Влияние биофунгицида Елена на комплексы микромицетов нефтезагрязненных почв различных типов при биоремедиации // *Микология и фитопатология*. 2010. Т. 44. N 1. С. 53–62. EDN: OIYKXZ.

15. Угрехелидзе Д.Ш., Дурмишидзе С.В. Поступление и детоксикация органических ксенобиотиков в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 1984. 230 с.

16. Талайбекова Г.Т., Кожобаев К.А., Токпаева Ж.К., Эсенжанова Г.К., Тотубаева Н.Э. Фитотестирование нефтезагрязненных почв с помощью фитотолерантных растений // *Проблемы региональной экологии*. 2019. N 2. С. 20–24. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-12020. EDN: MVBVAX.

17. Da Silva Correa H., Maranho L.T. The potential association of *Echinochloa polystachya* (Kunth) Hitchc. with bacterial consortium for petroleum degradation in contaminated soil // *SN Applied Sciences*. 2021. Vol. 3. P. 80. DOI: 10.1007/s42452-020-04070-6.

18. Athar H.-R., Ambreen S., Javed M., Hina M., Rasul S., Zafar Z.U., et al. Influence of sub-lethal crude oil concentration on growth, water relations and photosynthetic capacity of maize (*Zea mays* L.) plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 18320–18331. DOI: 10.1007/s11356-016-6976-7.

19. Сотникова Ю.М., Григориади А.С., Федяев В.В., Гарипова М.И., Фархутдинов Р.Г. Оценка влияния биопрепаратов на морфометрические и физиологические показатели растений-ремедиантов в условиях нефтяного загрязнения почв // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*. 2022. N 1. С. 51–63. DOI: 10.21685/2307-9150-2022-1-5. EDN: QYJLLE.

20. Kitamura R.S.A., Maranho L.T. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil using *Desmodium incanum* DC., Fabaceae // *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*. 2016. Vol. 7, no. 1. DOI: 10.7603/s40682-016-0001-1.

21. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Столярова Е.А., Логинов О.Н. Эффективность ассоциаций растений семейства бобовых и ростстимулирующих бактерий для восстановления нефтезагрязненных почв // *Агрохимия*. 2021. N 4. С. 87–96. DOI: 10.31857/S0002188121040074. EDN: AMIIVV.

22. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 206 с.

23. Панасов М.Н., Денисов Е.П., Уполовников Д.А., Денисов К.Ю., Марс А.М. Житняк как эффективный фитомелиорант в сухостепном Заволжье // *Нива Поволжья*. 2008. N 3. С. 47–54. EDN: JSILIF.

24. Chaudhary D.K., Bajagain R., Jeong S.-W., Kim J. Development of a bacterial consortium comprising oil-degraders and diazotrophic bacteria for elimination of exogenous nitrogen requirement in bioremediation of diesel-contaminated soil // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2019. Vol. 35. P. 99. DOI: 10.1007/s11274-019-2674-1.

25. Енкина О.В. Коробский Н.Ф. Микробиологические аспекты сохранения плодородия черноземов Кубани. Краснодар: Агропромполиграфист, 1999. 150 с.

26. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Велигонова Н.В., Патрушева Е.В., Азнаурьян Д.К., Вальков В.Ф. Изменение комплекса почвенных микроорганизмов при загрязнении чернозема обыкновенного нефтью и нефтепродуктами // *Агрохимия*. 2007. N 12. С. 44–48. EDN: IBJUID.

27. Терехова В.А. Микромицеты в экологической оценке водных и наземных экосистем. М.: Наука, 2007. 214 с.

28. Liu Q., Tang J., Liu X., Song B., Zhen M., Ashbolt N.J. Vertical response of microbial community and degrading genes to petroleum hydrocarbon contamination in saline alkaline soil // *Journal of Environmental Sciences*. 2019. Vol. 81. P. 80–92. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.001.

29. Wasen A.-A.A. Biodegradation and phytotoxicity of crude oil hydrocarbons in an agricultural soil // *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2019. Vol. 79. Iss. 2. P. 266–277. DOI: 10.4067/S0718-58392019000200266.

REFERENCES

1. Melekhina E.N., Kanev V.A., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Nowakowski A.B., Taskaeva A.A., et al. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: a multidisciplinary approach. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2020;2:123-129. (In Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2020-2-123-129. EDN: WWQBYT.
2. Ryabukhina M.V., Filippova A.V., Ryabinina Z.N. Phytomonitoring of areas of oil-and-gas production boring wells of the Romanovsky oil field in Orenburg Region. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;6:202-204. (In Russian). EDN: VDOOVB.
3. Shi L., Liu Z., Yang L., Fan W. Effects of oil pollution on soil microbial diversity in the Loess hilly areas, China. *Annals of Microbiology*. 2022;72:26. DOI: 10.1186/s13213-022-01683-7.
4. Loginov O.N., Silishchev N.N., Boiko T.F., Galimzyanova N.F. *Bioremediation: microbiological technologies for cleaning oil-contaminated soils and industrial waste*. Moscow: Nauka; 2009, 111 p. (In Russian). EDN: QLAIRW.
5. Korshunova T.Y., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., et al. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2019;55(4):338-349. (In Russian). DOI: 10.1134/S0555109919040093. EDN: HNVQRU.
6. Wang A., Fu W., Feng Y., Liu Z., Song D. Synergetic effects of microbial-phytoremediation reshape microbial communities and improve degradation of petroleum contaminants. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;429:128396. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128396.
7. Merkl N., Schultze-Kraft R., Infante C. Phytoremediation in the tropics – influence of heavy crude oil on root morphological characteristics of graminoids. *Environmental Pollution*. 2005;138(1):86-91. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.02.023.
8. Kechavarzi C., Pettersson K., Leeds-Harrison P., Ritchie L., Ledin S. Root establishment of perennial ryegrass (*L. perenne*) in diesel contaminated surface soil layers. *Environmental Pollution*. 2007;145(1):68-74. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.03.039.
9. Turkovskaya O.V., Pozdnyakova N.N., Muratova A.Yu., Dubrovskaya E.V., Golubev S.N. Potential of plants and microorganisms to degrade polycyclic aromatic hydrocarbons. *Biomika = Biomics*. 2018;10(2):193-201. (In Russian). DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2018-27. EDN: XVBOHZ.
10. Kafle A., Timilsina A., Gautam A., Adhikari K., Bhattarai A., Aryal N. Phytoremediation: mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*. 2022;8:100203. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100203.
11. Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Bagautdinov F.Ya. Phytoremediation as a way to purifying soils contaminated with heavy metals. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2011;3:4-10. (In Russian). EDN: OOFKOH.
12. Derevyannikova M.V. The study of the crested wheat grass collection (*Agropyron pectiniforme*) on winter hardness and energy of spring aftergrowing of grass in the Stavropol territory. *Sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = Agricultural Journal*. 2020;5:30-36. (In Russian). DOI: 10.25930/2687-1254/005.5.13.2020. EDN: XKDIKJ.
13. Korshunova T.Yu., Loginov O.N. Toxicological assessment of bio preparation oildestructor «Lenoil»® – NORD, SHP. *Toksikologicheskii vestnik = Toxicological Review*. 2017;(3):58-60. (In Russian). DOI: 10.36946/0869-7922-2017-3-58-60. EDN: ZAGZJT.
14. Kireeva N.A., Rafikova G.F., Galimzyanova N.F., Loginov O.N., Grigoriadi A.S., Yakupova A.B. Influence of biofungicide Elena on micromycetes complexes of oil-polluted soils under bioremediation. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. (In Russian). 2010;44(1):53-62. EDN: OIYKXZ.
15. Ugrekhelidze D.Sh., Durmishidze S.V. *Intake and detoxification of organic xenobiotics in plants*. Tbilisi: Metsniereba; 1984, 230 p. (In Russian).
16. Talaibekova G.T., Kozhobaev K.A., Tokpaieva J.K., Esenzhanova G.K., Totubaeva N.E. Phytotesting of oil-contaminated soils using phytotolerant plants. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2019;2:20-24. (In Russian). DOI: 10.24411/1728-323X-2019-12020. EDN: MVBVAX.
17. Da Silva Correa H., Maranho L.T. The potential association of *Echinochloa polystachya* (Kunth) Hitchc. with bacterial consortium for petroleum degradation in contaminated soil. *SN Applied Sciences*. 2021;3:80. DOI: 10.1007/s42452-020-04070-6.
18. Athar H.-R., Ambreen S., Javed M., Hina M., Rasul S., Zafar Z.U., et al. Influence of sub-lethal crude oil concentration on growth, water relations and photosynthetic capacity of maize (*Zea mays* L.) plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:18320-18331. DOI: 10.1007/s11356-016-6976-7.
19. Sotnikova YU.M., Grigoriadi A.S., Fedyaev V.V., Garipova M.I., Farkhutdinov R.G. The effect's evaluation of biological products on the morphometric and physiological parameters of plants-remediants in conditions of soil oil pollution. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences*. 2022;1:51-63. (In Russian). DOI: 10.21685/2307-9150-2022-1-5. EDN: QYJLLE.
20. Kitamura R.S.A., Maranho L.T. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil using *Desmodium incanum* DC., Fabaceae. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*. 2016;7(1). DOI: 10.7603/s40682-016-0001-1.
21. Kuzina E.V., Rafikova G.F., Stolyarova E.A., Loginov O.N. Efficiency of associations of legume plants and growth-stimulating bacteria for restoration of oil-contaminated soils. *Agrokhimiya*. 2021;4:87-96. (In Russian). DOI: 10.31857/S0002188121040074. EDN: AMIIVV.
22. Pikovskii Yu.I. *Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1993, 206 p. (In Russian).
23. Panasov M.N., Denisov E.P., Upolovnikov D.A., Denisov K.Yu., Mars A.M. Zhitnyak as an effective phytomeliorant in the dry steppe Trans-Volga. *Niva Povolzh'ya*. 2008;3:47-54. (In Russian). EDN: JSILIF.
24. Chaudhary D.K., Bajagain R., Jeong S.-W., Kim J. Development of a bacterial consortium comprising

oil-degraders and diazotrophic bacteria for elimination of exogenous nitrogen requirement in bioremediation of diesel-contaminated soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2019;35:99. DOI: 10.1007/s11274-019-2674-1.

25. Enkina O.V. Korobskii N.F. *Microbiological aspects of preserving the fertility of Kuban chernozem*. Krasnodar: Agroprompoligrafist; 1999, 150 p. (In Russian).

26. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Veligonova N.V., Patrusheva E.V., Aznaur'yan D.K., Val'kov V.F. Changes in the complex of soil microorganisms in ordinary chernozem contaminated with oil and oil products. *Agrokhimiya*. 2007;12:44-48. (In Russian). EDN: IBJUID.

27. Terekhova V.A. *Micromycetes in ecological evaluation of aquatic and terrestrial ecosystems*. Moscow: Nauka; 2007, 214 p. (In Russian).

28. Liu Q., Tang J., Liu X., Song B., Zhen M., Ashbolt N.J. Vertical response of microbial community and degrading genes to petroleum hydrocarbon contamination in saline alkaline soil. *Journal of Environmental Sciences*. 2019;81:80-92. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.001.

29. Wasen A.-A.A. Biodegradation and phytotoxicity of crude oil hydrocarbons in an agricultural soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2019;79(2):266-277. DOI: 10.4067/S0718-58392019000200266. .

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григориади Анна Сергеевна,

к.б.н., доцент,
Уфимский университет науки и технологий,
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32,
Российская Федерация,
✉ GrigoriadiAS@uust.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6891-1693>

Зобкова Наталья Викторовна,

старший преподаватель,
Оренбургский государственный
медицинский университет,
460014, г. Оренбург, ул. Советская, 6,
Российская Федерация,
zobkova_natali@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-4023-5242>

Сотникова Юлия Михайловна,

к.б.н., старший преподаватель,
Уфимский университет науки и технологий,
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32,
Российская Федерация,
sotnikova-bashedu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6636-9685>

Ямалеева Анна Александровна,

д.б.н., профессор, ведущий научный сотрудник,
Уфимский университет науки и технологий,
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32,
Российская Федерация,
frg2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9546-0461>

Фархутдинов Рашит Габдулхаевич,

д.б.н., профессор, профессор,
Уфимский университет науки и технологий,
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32,
Российская Федерация,
frg2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2541-8994>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna S. Grigoriadi,

Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi St., Ufa, 450076,
Russian Federation,
✉ GrigoriadiAS@uust.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6891-1693>

Natalia V. Zobkova,

Senior Lecturer,
Orenburg State Medical University,
6, Sovetskaya St., Orenburg, 460014,
Russian Federation,
zobkova_natali@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-4023-5242>

Yuliya M. Sotnikova,

Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer,
Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi St., Ufa, 450076,
Russian Federation,
sotnikova-bashedu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6636-9685>

Anna A. Yamaleeva,

Dr. Sci. (Biology), Professor, Leading Researcher,
Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi St., Ufa, 450076,
Russian Federation,
frg2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9546-0461>

Rashit G. Farkhutdinov,

Dr. Sci. (Biology), Professor, Professor,
Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi St., Ufa, 450076,
Russian Federation,
frg2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2541-8994>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 09.06.2023.
Одобрена после рецензирования 24.10.2023.
Принята к публикации 31.10.2023.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 09.06.2023.
Approved after reviewing 24.10.2023.
Accepted for publication 31.10.2023.