

Оценка эффективности ремедиации нефтезагрязнённых почв сорбционно-биологическими методами в лабораторных условиях

© 2022. Д. М. Успанова¹, аспирант, О. В. Нечаева¹, д. б. н., профессор, О. В. Абросимова¹, к. б. н., доцент, Е. В. Глинская^{1,2}, к. б. н., доцент, Е. И. Тихомирова¹, д. б. н., профессор, Н. В. Беспалова¹, к. ф-м. н., доцент,
¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 410052, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,
²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, 4100012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83,
 e-mail: olgav.nechaeva@mail.ru, elenavg-2007@yandex.ru

Статья посвящена использованию сорбционно-биологического метода в ремедиации нефтезагрязнённых почв. Объектом исследования являлась дерново-подзолистая почва с содержанием нефтепродуктов 2217 ± 10 мг/кг. В качестве микроорганизма-биодеструктора был выбран штамм бактерий *Bacillus pumilus* KM. В качестве природного сорбента использовали бентонит Даш-Салахлинского месторождения (Азербайджан). В образцы почвы вносили 1% взвеси суточной культуры бактерий, 0,5 или 1% сорбента. Для оценки эффективности ремедиации использовали тест-культуру *Raphanus sativus* L. Проводили измерения длины корневой и надземной частей проростков, а также регистрировали количество проросших семян в контрольном и опытных вариантах. Наибольшая эффективность снижения показателей фитотоксичности установлена для образцов почв, содержащих 1% бентонита или 1% взвеси бактерий. Наиболее высокой энергией прорастания семян тест-объекта характеризовалась почвенная вытяжка образца, в котором бактерии *B. pumilus* KM и сорбент находились в течение 30 дней. При внесении в почвенные образцы бактерий *B. pumilus* KM или бентонита динамика изменения фитотоксичности почв зависела от концентрации вносимого сорбента и длительности циркуляции микроорганизмов-деструкторов.

Ключевые слова: фитотоксичность, нефтезагрязнённые почвы, биоремедиация, бентонит, *Bacillus pumilus* KM.

Evaluation of the efficiency of remediation of oil-contaminated soils by sorption-biological methods in laboratory conditions

© 2022. D. M. Uspanova¹ ORCID: 0000-0002-3745-9494, O. V. Nechaeva¹ ORCID: 0000-0003-3331-1051, O. V. Abrosimova¹ ORCID: 0000-0002-0754-8373, E. V. Glinskaya^{1,2} ORCID: 0000-0002-1675-5438, E. I. Tikhomirova¹ ORCID: 0000-0001-6030-7344, N. V. Bepalova¹ ORCID: 0000-0003-3733-3119,
¹Saratov State Technical University named after Y. Gagarin, 77, Politechnicheskaya St., Saratov, Russia, 410052,
²Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky, 83, Astrakhanskaya St., Saratov, Russia, 4100012,
 e-mail: olgav.nechaeva@mail.ru, elenavg-2007@yandex.ru

The article is devoted to the use of the sorption-biological method of remediation of oil-contaminated soils. The object of the study was sod-podzolic soil with chronic oil pollution with an oil content of 2217 ± 10 mg/kg. A strain of saprophytic bacteria *Bacillus pumilus* KM with established carbohydrate-oxidizing activity, high adhesive ability and absence of virulence factors was selected as a biodestructive microorganism. Bentonite from the Dash-Salakhli deposit (Azerbaijan) was used as a natural sorbent with a high sorption capacity. For research, 1% of the suspension of the daily culture of bacteria, 0.5 or 1% of the sorbent was added to the soil samples. The effectiveness of remediation was assessed by changes in the phytotoxicity of soil samples on the test culture *Raphanus sativus* L., the seeds of which were treated with soil extracts. For this purpose, the length of the root and ground parts of the seedlings was measured, and the number of germinated seeds in the control and experimental samples was recorded. The greatest efficiency of reducing phytotoxicity was established for soil samples containing 1% bentonite or 1% bacterial suspension. On the 4th day of the experiment, the root part of the test object was absent, but the length of the ground parts of the plant exceeded the control values by 5.8 and 5.6 times, respectively. Similar results were obtained on the 12th day of the experiment: when

processing these samples of soil extracts, the intensity of root formation exceeded the control values by 3.9 and 3.3 times, the length of the ground part by 2.0 and 1.9 times, respectively. 30 days after the introduction of bacteria and sorbent into soil samples, the greatest intensity of reduction in soil phytotoxicity was established for similar samples. On the 4th day of the experiment, the length of the ground part exceeded the control values by 4.9 and 4.4 times, and on the 12th day – by 1.9 and 1.8 times, respectively. The formation of the root part of the plants occurred on day 12 and their length also exceeded the control by 5.9 and 5.3 times. The highest seed germination energy of the test object was characterized by soil extraction of the sample in which bacteria *B. pumilus* KM and sorbent were kept for 30 days. The most intense decrease in the toxicity index of soil samples was observed with the introduction of 1% sorbent or in the presence of 1% strain of *B. pumilus* KM for 30 days. When introducing bacteria *B. pumilus* KM or bentonite into soil samples, the dynamics of changes in the phytotoxicity of soils depends on the concentration of the introduced sorbent and the duration of circulation of destructive microorganisms.

Keywords: phytotoxicity, oil-contaminated soils, bioremediation, bentonite, *Bacillus pumilus* KM.

Углеводороды нефти относятся к приоритетным загрязнителям и являются одними из наиболее экологически опасных поллютантов [1, 2]. В ходе добычи, транспортировки и переработки, которые сопряжены с возникновением аварийных ситуаций, нефть попадает в окружающую среду (ОС), оказывая неблагоприятное воздействие, прежде всего, на почву. Это приводит к нарушению морфологии почвенного профиля, за счёт токсического действия происходит деградация покрова земель, снижается их продуктивность, дыхательная и ферментативная активность. Из-за нарушения соотношения между основными группами резидентных почвенных микроорганизмов (МО) или их полного уничтожения уменьшается скорость микробного самоочищения [3–5]. В связи с этим поиск эффективных методов очистки почв с хроническим нефтяным загрязнением является одной из важнейших задач.

Наиболее эффективной и экологически безопасной технологией очистки почв является биоремедиация, основанная на способности углеводородоокисляющих МО к утилизации различных фракций нефти [6]. Углеводородоокисляющие МО включают в себя представителей бактерий и микромицетов, способных использовать в качестве источника энергии углеводороды нефти. Их качественный состав может отличаться в зависимости от почв, но в большинстве это представители рр. *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Candida*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* и др. [7–12].

В настоящее время нефтеокисляющие МО составляют основу биопрепаратов, которые могут быть использованы для утилизации нефтяных загрязнений. Однако низкая эффективность их применения может быть связана, с одной стороны, действием лёгких фракций нефти, которые отличаются высокой токсичностью, а, с другой стороны, недоступностью для многих МО её тяжёлых фракций, особенно при их адсорбции на почвенных коллоидах. Также в качестве лимитирующих факторов эффек-

тивной биодеструкции выступает температура ОС и высокая концентрация солей, которые приводят к снижению скорости или блокировке метаболических реакций в клетках МО. Это и определяет поиск высокоэффективных штаммов микроорганизмов-биодеструкторов, которые, помимо широкого спектра нефтеокисляющих ферментов, способны сохранять свою биохимическую активность в широком диапазоне температур и засоленности почвы. Повышение устойчивости деструкторов может быть достигнуто использованием в составе биопрепаратов сорбентов, которые способны не только извлекать и концентрировать поллютанты, но и иммобилизовать на своей поверхности МО, тем самым обеспечивая их толерантность к действию неблагоприятных средовых факторов [13, 14]. При выборе сорбента предпочтения отдаются природному сырью, использование которого не приводит к нарушению баланса в ОС [15–20]. Среди агроминералов, применяемых в качестве сорбентов, особый интерес представляют бентониты, поскольку они характеризуются высокой сорбционной ёмкостью [21].

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы являлась оценка эффективности биоремедиации нефтезагрязнённых почв с использованием природного сорбента бентонита и штамма сапрофитных бактерий *Bacillus pumilus* KM.

Объекты и методы исследования

Определение фитотоксичности образцов нефтезагрязнённой почвы проводили на базе НОЦ «Промышленная экология» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Объектом исследования являлась хронически загрязнённая нефтью почва (тип подзолистая, подтип дерново-подзолистая) (Московская область, с. Колонтаево) с исходной концентрацией нефтепродуктов 2217 ± 10 мг/кг. Предварительно исследуемый образец почвы подвергали

Варианты эксперимента / Experiment options

Лабораторный шифр образца Laboratory sample code	Содержание в образце, % / Content in the sample, %	
	бентонит bentonite	взвесь бактерий <i>B. pumilus</i> КМ suspension of bacteria <i>B. pumilus</i> КМ
Контроль / Control	0	0
1	0,5	0
2	0,5	1
3	1	1
4	0	1
5	1	0

стерилизации в автоклаве при давлении 1 атм для уничтожения аборигенной микрофлоры. В образцы почвы вносили культуру бактерий *B. pumilus* КМ из коллекции кафедры микробиологии и физиологии растений СГУ имени Н.Г. Чернышевского, природный сорбент – бентонит (Даш-Салахлинское месторождение, Азербайджан), а также их комбинации, оптимальные концентрации которых были подобраны экспериментальным путём. Выбор штамма бактерий *B. pumilus* был связан с тем, что ранее проведённые исследования показали его биологическую безопасность, высокую ферментативную активность и адгезивную способность, что позволило рассматривать его в качестве компонента биопрепарата, а также для конструирования его иммобилизованной формы на гранулах бентонита [22]. Выбор сорбента был связан с его высокой пористостью, сорбционной способностью, а также наличием в структуре гранул полостей, необходимых для заселения МО [23–25]. Бактерии выращивали на среде ГРМ (Россия, Оболенск) при температуре 28 °С в течение 24 ч, затем готовили взвесь в физиологическом растворе по стандарту мутности 10 ед. (ГИСК Л. А. Тарасевича). Предварительно были подготовлены образцы почвы массой 500 г, которые помещали в пластиковые контейнеры с крышкой. В образцы почвы вносили бактериальную взвесь, сорбент, а также их комбинации в процентном соотношении от массы почвы (табл. 1). Контролем служил исходный образец исследуемой почвы.

Для изучения фитотоксичности исследуемых образцов почвы применяли метод проростков (ФР 1.39.2006.02264), который позволяет оценивать динамику токсического действия нефтепродуктов и изменение токсичности почв при внесении в пробы бактерий и сорбента [26]. В качестве тест-культуры использовали семена редиса *Raphanus sativus* L., которые в количестве 10 шт. помещали на фильтровальную бумагу в чашки Петри и смачивали приготовленными вытяжками

контрольных и опытных проб почвы. По мере высыхания семена увлажняли повторно. Подготовку образцов семян проводили для каждой серии экспериментов. Первые замеры длины корневой и надземной части проростков проводили на 4-й день, также подсчитывали количество проросших семян в контрольном и опытных вариантах. Повторный замер вегетативных частей растений проводили на 12-й день эксперимента. В экспериментах проводили определение следующих показателей: длину надземной и корневой частей проростков; энергию прорастания семян; индекс токсичности исследуемых образцов почвы.

Энергию прорастания (B) определяли по формуле:

$$B = a/b \cdot 100\%, \quad (1)$$

где a – число проросших семян; b – общее количество семян в опыте.

На основании среднеарифметических значений длин надземной и корневой частей проростков был рассчитан индекс токсичности оцениваемого фактора ($ИТФ$) [26]:

$$ИТФ = T\Phi_o / T\Phi_k, \quad (2)$$

где $T\Phi_o$ – значение регистрируемой тест-функции в опыте; $T\Phi_k$ – значение регистрируемой тест-функции в контроле (65%).

Согласно оценочной шкале токсичности почв устанавливались следующие показатели.

Стимуляция – $ИТФ > 1,1$.

Норма – $ИТФ = 0,91–1,10$.

Низкая токсичность – $ИТФ = 0,71–0,90$.

Средняя токсичность – $ИТФ = 0,5–0,7$.

Высокая токсичность (LD_{50}) – $ИТФ < 0,5$.

Сверхвысокая токсичность – $ИТФ = 0$.

Для подтверждения достоверности полученных результатов исследования проводили в пятикратной повторности. Статистическую обработку результатов осуществляли с применением пакета прикладных программ Statis-

tica 6.0 (for Windows; «Stat Soft Inc.», США), Statgraph (Version 2.6; Coulter), Microsoft Excel 2003 (for Windows XP). Различия между вариантами считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

На первом этапе работы для получения почвенной вытяжки экспозиция культуры бактерий, сорбента и их комбинации в образцах почвы составила 2 дня. Результаты проведённых исследований показали, что при обработке семян *R. sativus* как контрольной, так и опытными почвенными вытяжками на 4-й день от начала эксперимента корневая часть отсутствовала. Надземные части проросших семян тест-объекта, обработанные опытными образцами почвенных вытяжек, формировались более интенсивно по сравнению с контрольным образцом, причём наибольшую стимуляцию роста растения наблюдали при обработке образцами почвенной вытяжки, содержащими только 1% сорбента бентонита (длина надземной части превышала контроль в 5,8 раза) или клетки модельного штамма (длина надземной части превышала контроль в 5,6 раза) (рис. 1).

На 12-й день от начала эксперимента корневую часть образовывали все семена *R. sativus*, наибольшая интенсивность корнеобразования показана при обработке почвен-

ными вытяжками, содержащими 1% бентонита (длина корней превышала контроль в 3,9 раза) или взвесь бактерий без добавления сорбента (длина корней превышала контроль в 3,3 раза). Аналогичные результаты были получены и для надземных частей тест-объекта. Длина надземных частей проростков редиса при обработке почвенными вытяжками, содержащими 1% бентонита, превышала контроль в 2 раза, а при использовании взвеси бактерий без сорбента – в 1,9 раза по сравнению с контролем.

Представляло интерес оценить влияние продолжительности экспозиции ремедиационных компонентов на фитотоксичность хронически загрязнённых нефтью почв. Для этого опытные образцы нефтезагрязнённых почв оставляли на 30 дней при комнатной температуре. Дальнейшие исследования проводили аналогичным образом. Было установлено, что на 3-й день от начала эксперимента корневая часть растения отсутствовала при обработке семян почвенными вытяжками всех образцов нефтезагрязнённых почв, а надземная часть наиболее интенсивно формировалась при воздействии почвенных вытяжек, содержащих только клетки модельного штамма (длина надземной части превышала контроль в 4,4 раза) или 1% сорбента бентонита (длина надземной части превышала контроль в 4,9 раза) (рис. 2).

На 10-й день от начала эксперимента показатели формирования корневой части

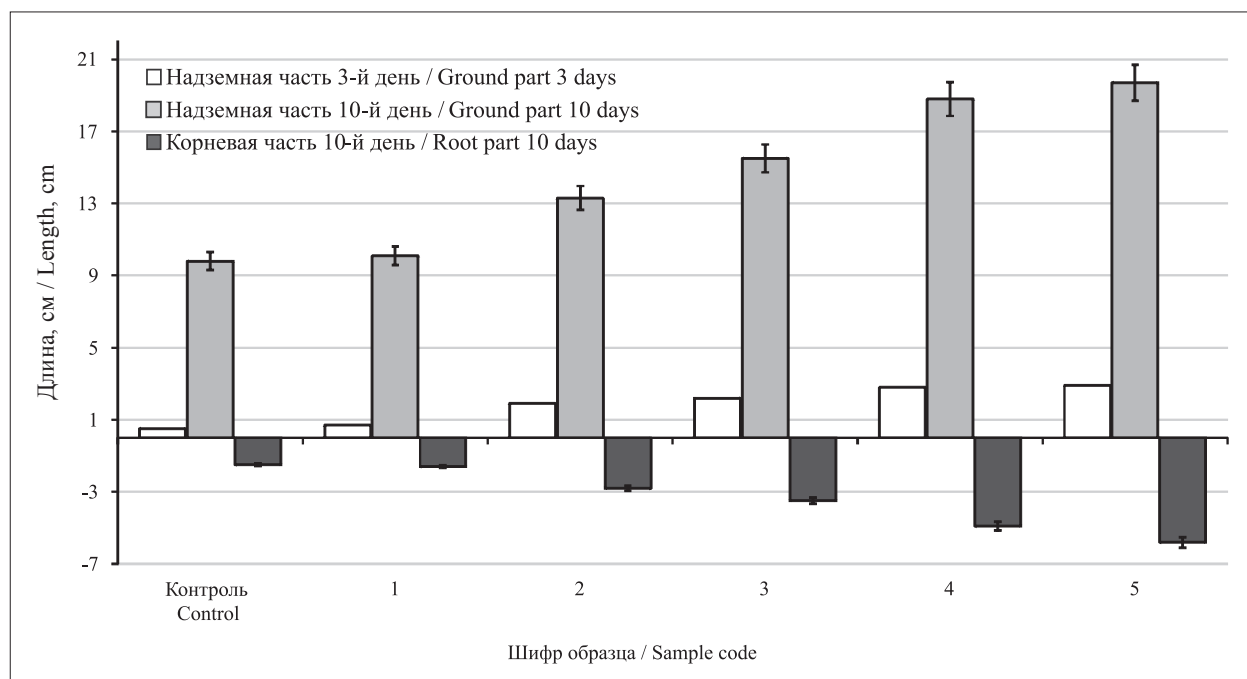


Рис. 1. Длина надземной и корневой частей проросших семян *R. sativus*, обработанных почвенными вытяжками (экспозиция 2 дня) ($p \leq 0,05$) (варианты эксперимента см. в таблице 1)

Fig. 1. The length of the ground and root parts of germinated seeds of *R. sativus*, treated with soil extracts (exposure for 2 days) ($p \leq 0.05$) (experimental options see Table 1)

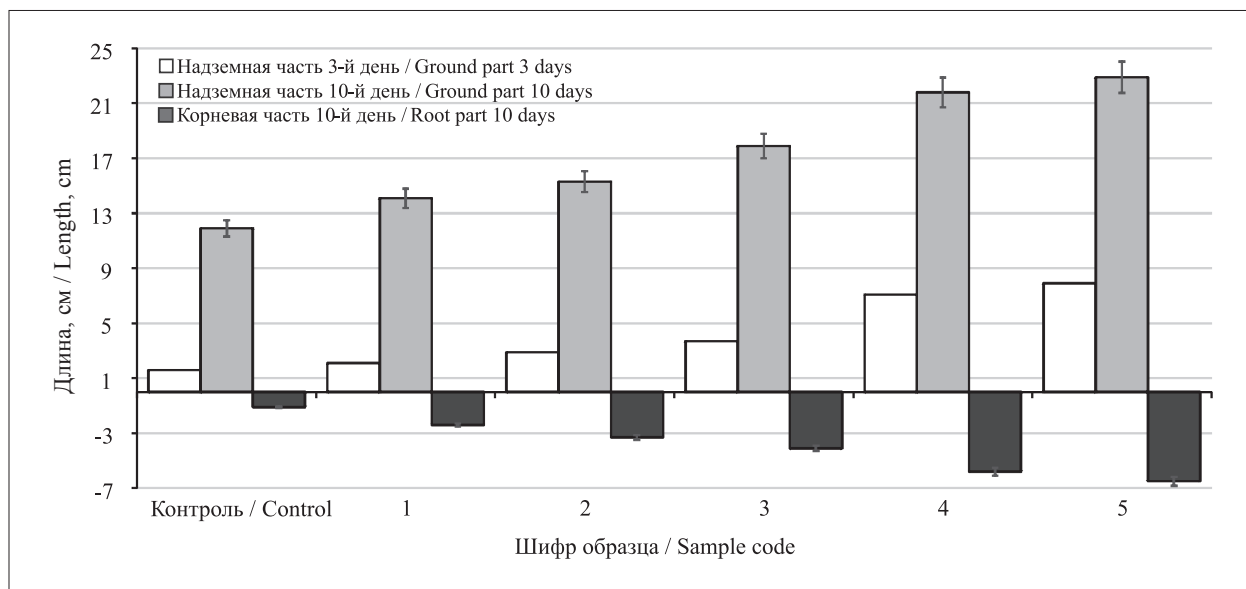


Рис. 2. Длина надземной и корневой частей проросших семян *R. sativus*, обработанных почвенными вытяжками (экспозиция 30 дней) ($p \leq 0,05$) (варианты эксперимента см. в таблице 1)
Fig. 2. The length of the ground and root parts of the germinated seeds of *R. sativus*, treated with soil extracts (exposure of 30 days) ($p \leq 0.05$) (experimental options see Table 1)

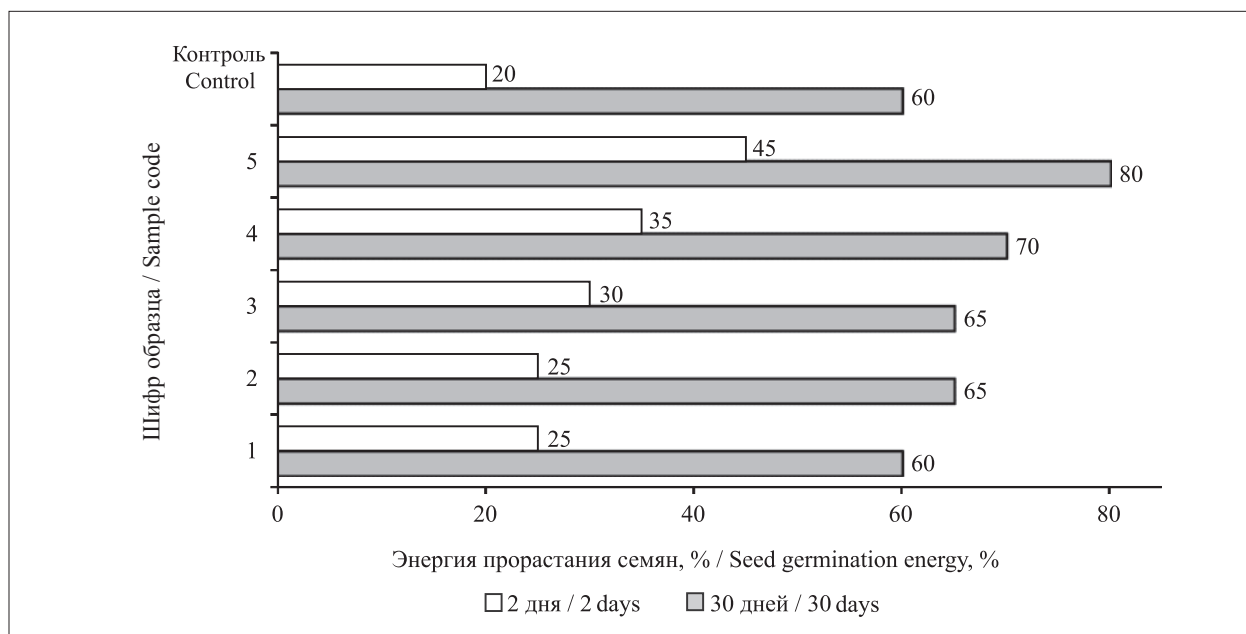


Рис. 3. Энергия прорастания семян в пробах с внесёнными бактериями и сорбентом (варианты эксперимента см. в таблице 1)
Fig. 3. Energy of seed germination in samples with introduced bacteria and sorbent (experimental options see Table 1)

R. sativus были достоверно выше аналогичных значений предыдущего эксперимента в 1,1–1,5 раза в различных вариантах опыта, причём наибольший стимулирующий эффект установлен также для образцов, содержащих взвесь бактерий без добавления сорбента (показатель выше контрольного

в 5,3 раза) или 1% бентонита (показатель выше контрольного в 5,9 раза). Показатели надземной части растений *R. sativus* к 10-му дню эксперимента превышали значения предыдущего эксперимента в 1,2–1,4 раза при использовании различных вариантов факторов ремедиации.

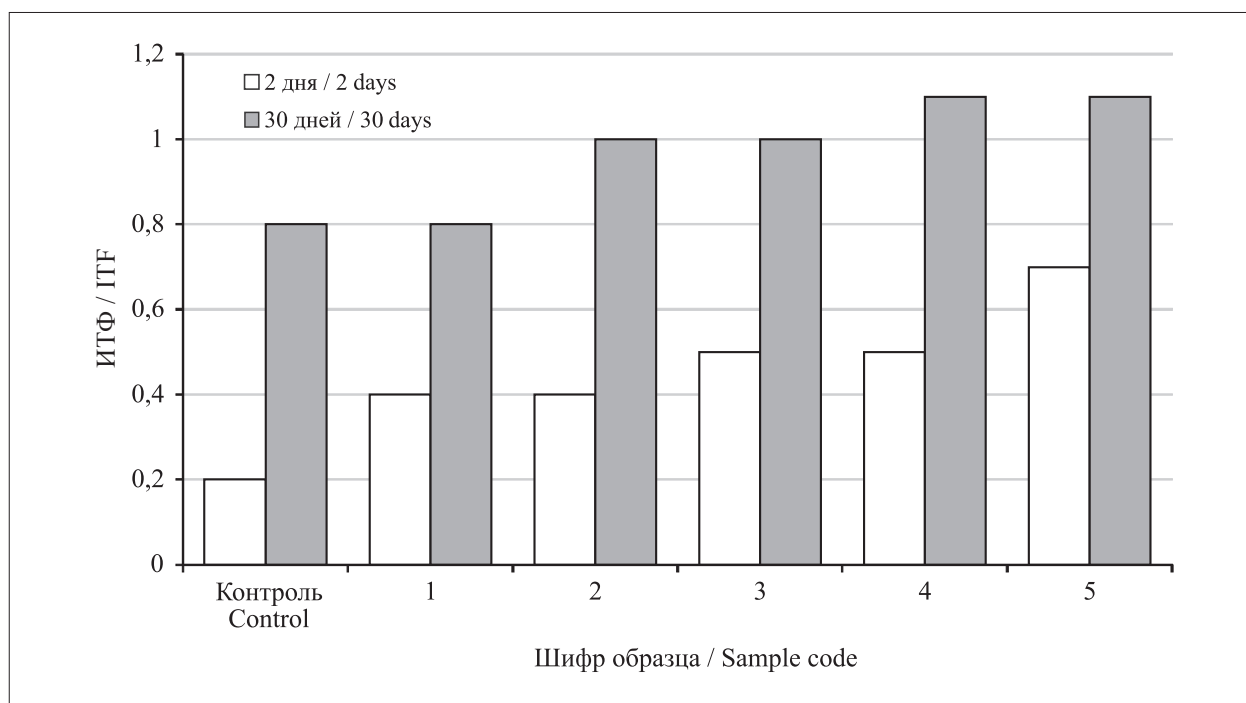


Рис. 4. Значение *ИТФ* в пробах с внесёнными бактериями и сорбентом (варианты эксперимента см. в таблице 1)
Fig. 4. The value of *ITF* in samples with introduced bacteria and sorbent (experimental options see Table 1)

Наилучшие результаты были получены при обработке семян почвенными вытяжками, содержащими взвесь бактерий без добавления сорбента (показатель выше контроля в 1,8 раза) или 1% бентонита (показатель выше контроля в 1,9 раза). Анализ результатов исследований по оценке энергии прорастания семян *R. sativus* показал, что значения показателя варьировали от 20 до 80% и зависели от количества внесённого сорбента и времени присутствия бактерий *B. pumilus* КМ и бентонита в образцах нефтезагрязнённых почв (рис. 3).

Установлено, что семена редиса, обработанные почвенными вытяжками образцов, в которые были внесены бактерии *B. pumilus* КМ и сорбент за 30 дней до начала эксперимента, характеризуются более высокой энергией прорастания. При определении индекса токсичности почвенных образцов с использованием различных приёмов ремедиации отмечено, что токсичность образцов почвенных вытяжек зависела от длительности присутствия бактерий *B. pumilus* КМ, бентонита и их комплексов в нефтезагрязнённой почве (рис. 4). Выявлено, что добавка 0,5% сорбента бентонита в присутствии или отсутствии бактерий *B. pumilus* КМ в течение 2 дней не оказывала значительного влияния на показатели токсичности почвенных вытяжек, индекс токсичности для указанных

образцов соответствовал высокому уровню, как и в контрольном варианте.

Использование более высоких концентраций сорбента в присутствии или отсутствии бактерий *B. pumilus* КМ приводило к уменьшению токсичной нагрузки на почву до среднего уровня. Присутствие бактерий *B. pumilus* КМ, бентонита, а также их комплексов в образцах нефтезагрязнённой почвы в течение 30 дней способствовало интенсивному снижению показателя токсичности. Так, контрольный и опытный образец, содержащий 0,5% бентонита, характеризовались низкой токсичностью, значения *ИТФ* образцов, имеющих в своём составе различные концентрации сорбента и взвесь бактерий, соответствовали норме. Почвенные вытяжки образцов, содержащих 1% сорбента бентонита как без использования бактерий, так и в их присутствии, способствовали стимуляции роста *R. sativus*. Снижение *ИТФ* в контрольном варианте, вероятно, было связано с процессами абиотического преобразования углеводов нефти.

Заключение

Таким образом, внесение в образцы нефтезагрязнённых почв штамма бактерий *B. pumilus* КМ, бентонита и их комплексов

приводило к снижению фитотоксичности, уровень которой зависел от длительности присутствия исследуемых компонентов и количества внесённого сорбента. Наилучшие результаты по снижению токсичности были получены для варианта нефтезагрязнённой почвы, в которой содержался 1% сорбента, и варианта, в котором присутствовали только бактерии штамма *V. pumilus* КМ. Следовательно, применение как монокультуры бактерий, так и природного сорбента бентонита открывает перспективы их использования при конструировании биопрепаратов для проведения эффективных реабилитационных мероприятий нефтезагрязнённых почв.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Nikonov A.N., Potapova S.O. Oil industry as one of the serious environmental pollutants // Fire Safety Problems and Prospects. 2018. V. 1. No. 9. P. 666–673 (in Russian).
2. Pikovskij Yu.I. Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment. Moskva: Izd-vo MGU, 2019. 208 p. (in Russian).
3. Alimbetova A.V., Sadanova A.K., Mukasheva T.D. Influence of oil pollution on soil microbiota // Modern Trends in the Development of Science and Technology. 2016. No. 12 (1). P. 55–57 (in Russian).
4. Grigoryan B.R., Koltsova T.G., Sungatullina L.M., Andreeva A.A., Kulagina V.I. Phytotoxicity of soddy-podzolic soils under oil pollution // Bulletin of the Kazan Technological University. 2016. V. 19. No. 15. P. 158–164 (in Russian).
5. Alotaibi H.S., Usman A.R., Adel S., Abduljabbar A.S., Ok Y.S., Al-Faraj A.I., Sallam A.S., Al-Wabel M.I. Carbon mineralization and biochemical effects of short-term wheat straw in crude oil contaminated sandy soil // Applied Geochemistry. 2018. V. 88. P. 276–287. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.02.017
6. GOST R 57447-2017. Best available technologies. Reclamation of lands and land contaminated with oil and oil products. Moskva: Standartinform, 2017. 32 p. (in Russian).
7. Shapiro T.N., Dolnikova G.A., Nemtseva N.V., Sandzhieva D.A., Lobakova E.S. Identification and physiological characteristics of the consortium of hydrocarbon oxidizing bacteria of oil and oil products // Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology. 2018. No. 4. P. 107–113 (in Russian). doi: 10.36233/0372-9311-2018-4-107-113
8. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Microorganisms in the aftermath of oil pollution (review) // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2019. V. 55. No. 4. P. 338–349 (in Russian). doi: 10.1134/S0555109919040093
9. Frank Yu.A., Nikitchuk K.L., Sapega A.A., Lukyanova E.A., Ivashenko D.A., Kosov A.V., Gerasimchuk A.L., Evseeva N.S. Improving the efficiency of remediation of oil-contaminated soils in the natural and climatic conditions of the north of the Tomsk Region and adjacent regions with the use of native microorganisms // Izvestiya of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources. 2020. V. 331. No. 9. P. 130–138 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2020/9/2815
10. Al-Hawash A.B., Dragh M.A., Li S., Alhujaily A., Abbood H.A., Zhang X., Ma F. Principles of microbial degradation of petroleum hydrocarbons in the environment // The Egyptian Journal of Aquatic Research. 2018. V. 44. No. 2. P. 71–76. doi: 10.1016/j.ejar.2018.06.001
11. Polyak Y.M., Bakina L.G., Chugunova M.V., Mayachkina N.V., Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil – A field study // International Biodeterioration & Biodegradation. 2018. V. 126. P. 57–68. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.10.004
12. Puustinen J., Jurgensen K.S., Strandberg T., Suortti A.M. Bioremediation of oil-contaminated soil from service stations // Environmental Pollution. 2020. No. 107. P. 245–254. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00144-X
13. Fokina N.V. Prospects for the use of sorbents of various modifications in the purification of natural environments from oil products in the conditions of the Kola North // Vestnik MSTU. 2019. V. 22. No. 1. P. 101–108 (in Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-101-108
14. Samkov A.A., Volchenkot N.N., Khudokormov A.A., Samkova S.M., Karaseva E.V. Optimization of conditions for immobilization of microbial cells in the creation of biological products for the biodegradation of hydrocarbons // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 194–202 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-194-202
15. An K., Fazylova D., Nazirova A., Zenitova L., Yanov V. Polyurethane foam filled with chitosan – a sorbent for the elimination of oil pollution // Ecology and Industry of Russia. 2019. V. 23. No. 5. P. 37–41 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-5-37-41
16. Kalinina E., Glushankova I., Rudakova L., Sabirov D. Obtaining a modified sorbent based on soda production sludge to eliminate oil and oil products spills from the water surface // Ecology and Industry of Russia. 2018. V. 22. No. 5. P. 30–35 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-5-30-35
17. Peregudov Yu. Magnetic oil sorbents based on technogenic and natural inorganic materials // Ecology and Industry of Russia. 2021. V. 25. No. 2. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-2-34-40

18. Peregudov Yu.S., Mezhri R., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I. Glauconite-based sorbents for skimming oil and oil products // *Condensed Matter and Interphases*. 2020. V. 22. No. 2. P. 257–265. doi: 10.17308/kcmf.2020.22/2852
19. Bidgoli H., Mortazavi Y., Khodadadi A.A. A functionalized nano-structured cellulosic sorbent aerogel for oil spill cleanup: Synthesis and characterization // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. V. 366. P. 229–239. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.08
20. Hoang P.H., Hoang A.T., Chung N.H., Dien L.Q., Nguyen X.P., Pham X.D. The efficient lignocellulose-based sorbent for oil spill treatment from polyurethane and agricultural residue of Vietnam // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2018. V. 40. No. 3. P. 312–319. doi: 10.1080/15567036.2017.1415397
21. Research in the field of nanobiotechnologies in agriculture and international cooperation with the Socialist Republic of Vietnam / Ed. A.H. Yapparov. Kazan: Center for Innovative Technologies, 2017. 320 p. (in Russian).
22. Uspanova D.M., Nechaeva O.V., Shurshalova N.F., Kameneva V.V., Bychkov A.R. Study of the effectiveness of using a saprophytic strain of bacteria *Bacillus pumilus* for the utilization of xenobiotics of I–II hazard class // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Himiya. Biologiya. Ekologiya*. 2020. V. 20. No. 2. P. 200–206 (in Russian). doi: 10.18500/1816-9775-2020-20-2-200-206
23. Annagiev M.H., Mamedov U.A. Study of the textural characteristics of bentonites from the Gyzyldare deposit (Azerbaijan) // *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2010. No. 2. P. 10–13 (in Russian).
24. Koshelev A.V., Vedeneeva N.V., Zamatyrina V.A., Tihomirova E.I., Skidanov E.V. Development of technology for obtaining sorbents based on bentonite clays for water treatment systems // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2018. No. 2 (74). P. 32–39 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2018.20.2.32-39
25. Ilina N.A., Tikhomirova E.I., Kazakova N.A., Andronova T.A., Ksenofontova O.Yu. Efficiency assessment of biological samples for destruction of phenol compounds // *International Conference on Health and Well-Being in Modern Society (ICHW 2019)*. Series: Advances in Health Sciences Research. 2019. V. 16. P. 120–125. doi: 10.2991/ichw-19.2019.29
26. M-P-2006 FR.1.39.2006.02264. Method for measuring the germination of seeds and the length of the roots of seedlings of higher plants to determine the toxicity of technogenically contaminated soils. Sankt-Peterburg: Fora-Print, 2009. 19 p. (in Russian).