

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОЙ
БУРОЙ ПОЛУПУСТЫННОЙ ПОЧВЫ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИЯ
(МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)**

© 2023 г. Т.В. Минникова, А.С. Русева, С.Ю. Ревина, С.И. Колесников, В.Г. Гайворонский

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского

Южного федерального университета

Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 194/1. E-mail: loko261008@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023. После доработки 06.07.2023. Принята к публикации 01.07.2023.

Бурые полупустынные почвы Республики Калмыкия подвержены высокому уровню загрязнения нефтью. Чтобы оценить экологическое состояние почв, необходимо проанализировать не только остаточное содержание нефти, но биологические показатели почв. Цель данной работы – оценить эффективность биоремедиации нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы Республики с помощью физико-химических и биологических показателей. В нефтезагрязненную почву (5% от массы почвы) вносили биочар, нитроаммофос, гумат натрия и «Байкал ЭМ-1». Для оценки эффективности ремедиации бурой полупустынной почвы по истечении 30 суток исследовали остаточное содержание нефти, активность каталазы и дегидрогеназ, численность бактерий, длину корней и всхожесть редиса. Установлено, что внесение биочара и «Байкал ЭМ-1» снижает остаточное содержание нефти в бурой полупустынной почве. Биочар и нитроаммофос влияют на содержание легкорастворимых солей, а «Байкал ЭМ-1» – на окислительно-восстановительный потенциал. Гумат натрия вызывает стимуляцию активности каталазы ($r = -0.48$), длины побегов ($r = -0.54$), корней ($r = -0.54$), а также всхожести редиса ($r = -0.64$). Нитроаммофос стимулирует численность бактерий ($r = -0.56$), активность каталазы ($r = -0.63$) и дегидрогеназ ($r = -0.84$), но угнетает длину побегов и корней редиса (*Raphanus sativus* L.). Внесение «Байкал ЭМ-1» стимулирует численность почвенных бактерий ($r = -0.83$), активность дегидрогеназ ($r = -0.89$) и угнетает длину корней, побегов и всхожесть. Результаты исследования целесообразно использовать при биомониторинге и диагностике состояния нефтезагрязненных бурых полупустынных почв Республики Калмыкия.

Ключевые слова: почва, ремедиация, экологическое состояние, биоиндикация.

DOI: 10.24412/1993-3916-2023-4-166-176

EDN: YVASSE

Почвы на территории Республики Калмыкия находятся в зоне контакта аридных и семиаридных ландшафтов: черноземы, каштановые, бурые полупустынные, солончаки и другие (Ташнинова Л.Н., Ташнинова А.А., 2010). Аридные почвы занимают значительную площадь на территории Юга Европейской части России и в мире в целом – до 30%. Кроме того, они значительно подвержены воздействию глобальных антропогенных процессов, таких как опустынивание, аридизация и химическое загрязнение (Залибеков и др., 2022; Юферев и др., 2022; Бананова, Лазарева, 2014; Новикова и др., 2020; Дауд и др., 2019, 2021). Почвы Республики подвержены высокому уровню загрязнения нефтью. Это обусловлено тем, что на территории числится 41 месторождение углеводородного сырья, в т.ч. 19 нефтяных, 11 газовых, 6 нефтегазовых и 5 нефтегазоконденсатных (Стратегия ..., 2019; Цомбуева, 2013; Цомбуева и др., 2013; Павлова и др., 2015). В этом регионе расположены уникальные почвы для Юга России, подверженные нефтяному загрязнению. По данным А.Н. Пархоменко (2018), биологическая активность почв, отобранных на территории нефтебазы № 5 ООО «ЛУКОЙЛ-НВНП», относится к высокоопасной категории. Установлено, что наибольшая устойчивость биохимических показателей по сравнению с микробиологическими характерна для образцов почвы, максимально приближенных к источнику загрязнения.

Среди наиболее распространенных почв Калмыкии выделяют бурые полупустынные почвы,

занимающие около 27.5% почвенного покрова Республики (Перекрестов, 2019). Почвы в регионе подвержены загрязнению нефтью и нефтепродуктами вследствие работы нефтепромыслов и ее транспортировки. Ранее было изучено загрязнение аридных почв Астраханской области и Республики Калмыкия тяжелыми металлами и нефтепродуктами (Дауд и др., 2019, 2021; Колесников и др., 2019; Daoud et al., 2020). На основании данных модельного эксперимента была рассчитана региональная ПДК нефти для бурых полупустынных почв – 0.24%. Однако данных о состоянии бурых полупустынных почв после нефтяного загрязнения и биоремедиации представлено недостаточно (Булуктаев, 2020; Булуктаев, Сангаджиева, 2015; Булуктаев и др., 2017).

Цель нашей работы – оценить эффективности биоремедиации нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы Республики Калмыкия

Объекты и методы

Почва. Образцы бурой полупустынной почвы (Eutric Cambisols (Loamic, Protocalcic)) или бурые аридные почвы, согласно «Классификации и диагностике почв России» (2004), были отобраны в Наримановском районе п. Дрофиный (Калмыкия) из верхнего слоя почвы (0-10 см; World Reference Base for Soil Resources, 2022). Почву после отбора и транспортировки тщательно просушивали до воздушно-сухого состояния, очищали от камней, корней и побегов растений и других инородных включений. Характеристика основных свойств бурой полупустынной почвы: содержание органического вещества – 1%, гранулометрический состав – средний суглинок.

Нефть. Для моделирования загрязнения использовали нефть, предоставленную Новошахтинским нефтеперерабатывающим заводом (г. Новошахтинск). Для загрязнения почв в модельном эксперименте использовали нефть с плотностью – 0.861 кг/м³, содержанием серы – 1.34%, массовой долей воды – 0.27%, концентрацией хлористых солей – 73 мг/дм³, массовой долей механических примесей – 0.006%, массовой долей парафина – 4.46%. В каждый сосуд с предварительно увлажненной почвой вносили нефть в расчете 5% от массы почвы.

Ремедианты. Для восстановления экологического состояния нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы в нее вносили 4 ремедианта различной природы и механизмов действия: биочар – как адсорбент и биостимулятор (ООО «ДианАгро», г. Новосибирск, Новосибирская область, Россия), нитроаммофос – как источник азота для выравнивания соотношения C : N (ОАО «Минудобрения», Россошь, Воронежская область, Россия), гумат натрия – как биостимулятор аборигенной биоты (НВП «Башинком», г. Уфа, Республика Башкортостан), «Байкал ЭМ-1» – как источник различных микроорганизмов-нефтедеструкторов, т.к. это микробиологический препарат, содержащий различные микроорганизмы, такие как бактерии, гибридные дрожжи и грибы (ООО «Научно-Производственное Объединение ЭМ-ЦЕНТР», г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия).

Микробиологический препарат «Байкал ЭМ-1» содержит штаммы бактерий *Paenibacillus pabuli*¹, *Azotobacter vinelandii*², *Lactobacillus casei*³, *Clostridium limosum*⁴, *Cronobacter sakazakii*⁵, *Rhodotorulla mucilaginosa*⁶, *Cryptococcus spp.*, гибридные дрожжи *Saccharomyces sp.*, *Candida lipolitica*⁷, *Candida norvegensis*⁸, *Candida guilliermondii*⁹ и грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Actinomycetales*. Это микроорганизмы-нефтедеструкторы, которые способствуют разложению нефти и восстановлению экологических функций почвы после нефтяного загрязнения (Чачина, Чачина, 2018). Все ремедианты вносили в 3 дозах: Д – рекомендуемая производителями или рекомендуемая на основе ранее проведенных исследований, Д0.5 – половина от рекомендуемой дозы, Д2 – удвоенная рекомендуемая доза.

¹ Латинские названия бактерии приводятся по работе С. Ash с соавторами (1993).

² Латинские названия бактерии приводятся по работе N. Menhart с соавторами (1991).

³ Латинские названия бактерии приводятся по работе А. Felten с соавторами (1999).

⁴ Латинские названия бактерии приводятся по работе К.Д. Ryan с соавторами (2003).

⁵ Латинские названия бактерии приводятся по работе J.J. Farmer с соавторами (1980).

⁶ Латинские названия бактерии приводятся по работе F. Wirth с соавторами (2012).

⁷ Латинские названия бактерии приводятся по работе С.Р. Kurtzman с соавторами (2011).

⁸ Латинские названия бактерии приводятся по работе P. Sandven с соавторами (1997).

⁹ Латинские названия бактерии приводятся по работе Н.Б. Градовой с соавторами (1971).

Модельный эксперимент. Образцы подготовленной почвы помещали в вегетационные сосуды и увлажняли до 25-30% от массы почвы. Перед загрязнением нефтью почву увлажняли водой (для вариантов с биочаром и нитроаммофосом) или раствором гумата натрия и «Байкал ЭМ-1» (для вариантов с растворами ремедиантов). В увлажненную почву вносили нефть 5% от массы почвы и тщательно перемешивали. В загрязненную почву вносили ремедианты и тщательно перемешивали гумат натрия и «Байкал ЭМ-1» – в форме растворов, а биочар и нитроаммофос – в форме сухих порошков.

Методы. Для оценки степени восстановления экологического состояния нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы после ремедиации исследовали физические, физико-химические и биологические показатели (табл. 1).

В результате выполнения биологических показателей был рассчитан интегральный показатель биологического состояния бурой полупустынной почвы или ИПБС (Kolesnikov et al., 2013, 2019).

Статистическая обработка полученных данных была проведена с использованием программного пакета Statistica 12.0. Статистика (средние значения, дисперсия) была определена, а надежность различных образцов была установлена с использованием дисперсионного анализа (Student's t-test).

Таблица 1. Методы исследования физических и биологических свойств почвы после ремедиации.

№	Наименование	Метод
1	Остаточное содержание нефти	Экстракция из почвы четыреххлористым углеродом с последующим определением количественного содержания методом ИК-спектроскопии, мг/кг
2	Реакция почвенной среды (рН)	В почвенной вытяжке (вода:почва – 2.5 : 1) потенциометрическим методом
3	Содержание легкорастворимых солей	В почвенной вытяжке (вода:почва – 2.5 : 1) кондуктометрическим методом, ppm
4	Окислительно-восстановительный потенциал	В почвенной вытяжке (вода:почва – 2.5 : 1) вольтамперометрическим методом, мВ
5	Общая численность бактерий	Методом люминесцентной микроскопии при окрашивании раствором акридинового оранжевого, млрд./г почвы
6	Активность каталазы	Газометрическим методом по разложению перекиси водорода, мл O ₂ / 1 г / 1 мин
7	Активность дегидрогеназ	По восстановлению солей тетразолия хлористого в трифенилформазаы с колориметрическим окончанием, мг ТФФ / 10 г / 24 ч
8	Всхожесть	Количество проросших семян редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.) за 7 суток фитотоксического эксперимента, %
9	Длина побегов	Измерение длины надземных побегов редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), мм
10	Длина корней	Измерение длины корней редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), мм

Результаты и обсуждение

Остаточное содержание нефти. По истечении 30 суток эксперимента содержание нефти снизилось после внесения биочара и «Байкал ЭМ-1» на 12-17 и 7-18% соответственно по сравнению с нефтезагрязненным фоном (рис. 1). Остальные вещества (нитроаммофос и гумат натрия) не оказывали достоверного отличного от нефтезагрязненного фона отличия по содержанию нефти.

Такие свойства нитроаммофоса, как ремедианта, обусловлены неправильно рассчитанной дозой азота для данного типа почв. Поскольку бурые полупустынные почвы имеют более легкий гранулометрический состав и реакцию среды (рН), чем черноземы, необходимо применять индивидуальный подход при санации таких почв азотными удобрениями. Ранее для чернозема обыкновенного применение мочевины снижало содержание нефти (Minnikova et al., 2019). Внесение

гумата натрия в чернозем обыкновенный и бурую лесную почву (Республика Адыгея) снижает содержание нефти (Минникова и др., 2019; Minnikova et al., 2022).

Физико-химические показатели почвы. Нефть оказывает непосредственное воздействие на физико-химическое состояние почвы. Оценку состояния проводили по изменению реакции почвенной среды (рН), окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и содержанию легкорастворимых солей (табл. 2).

Биочар, гумат натрия и «Байкал ЭМ-1» не влияют на реакцию среды. В то время как повышение дозы нитроаммофоса приводит к подкислению почвы до 6.5 рН. Окислительно-восстановительный потенциал нефтезагрязненной почвы при добавлении биочара, гумата натрия и нитроаммофоса недостоверно снижается относительно нефтезагрязненного фона. При добавлении «Байкал ЭМ-1» установлена стимуляция ОВП на 5%. Содержание легкорастворимых солей при добавлении биочара увеличивается на 24-34%, нитроаммофоса – в 2.5-6.8 раз. При внесении гумата натрия и «Байкал ЭМ-1» содержание легкорастворимых солей снизилось на 15-32 и 20-30% относительно фона соответственно.

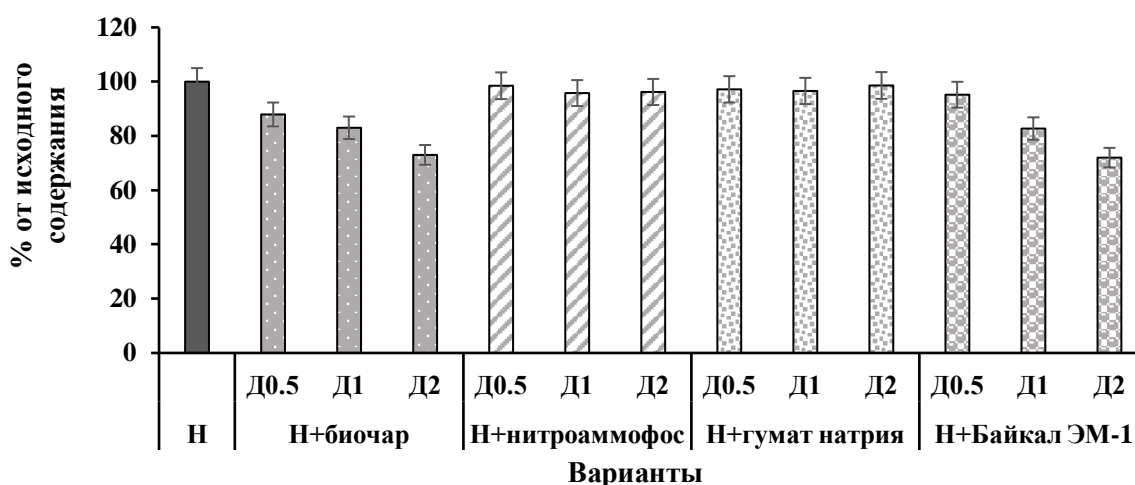


Рис. 1. Изменение остаточного содержания нефти в нефтезагрязненной бурой полупустынной почве после внесения биочара, нитроаммофоса, гумата натрия и «Байкал ЭМ-1», % от содержания нефти без ремедиантов. *Условные обозначения:* Н – почва, загрязненная нефтью.

Таблица 2. Физико-химические свойства бурой полупустынной почвы после ремедиации.

Вариант		рН	ОВП	С _{лс}
Н		8.0	312	218
Н + биочар	Д0.5	7.9	309	289
	Д1	7.8	308	363
	Д2	8.0	297	330
Н + нитроаммофос	Д0.5	7.2	283	547
	Д1	6.9	308	858
	Д2	6.5	297	1483
Н + гумат натрия	Д0.5	7.5	283	184
	Д1	7.8	273	165
	Д2	7.9	282	148
Н + «Байкал ЭМ-1»	Д0.5	8.0	314	175
	Д1	8.0	324	152
	Д2	8.0	319	170

Примечания к таблице 2: Н – почва, загрязненная нефтью; ОВП – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; С_{лс} – содержание легкорастворимых солей, ppm.

Численность почвенных бактерий. Общая численность при добавлении биочара и

нитроаммофоса изменялась незначительно по сравнению с нефтезагрязненным фоном (рис. 2).

Добавление гумата натрия уже при дозе Д0.5 простимулировало численность бактерий на 85% с повышением до 159% (Д2) относительно фона. При внесении «Байкал ЭМ-1» численность бактерий была простимулирована на 186-240% относительно контроля.

Таким образом, стимуляция численности бактерий в нефтезагрязненной бурой полупустынной почве достигается при любой дозе гумата натрия и «Байкал ЭМ-1».

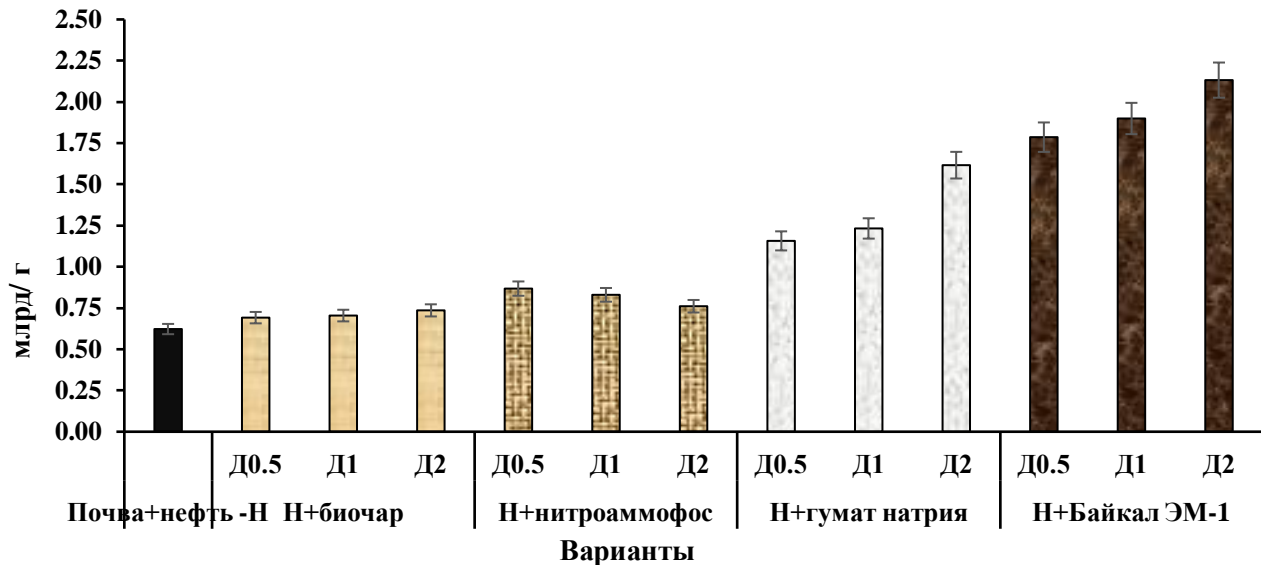


Рис. 2. Изменение численности почвенных бактерий в нефтезагрязненной бурой полупустынной почве после внесения биочара, нитроаммофоса, гумата натрия и «Байкал ЭМ-1».

Активность каталазы и дегидрогеназ. Активность ферментов при добавлении ремедиантов изменялась по похожему сценарию (рис. 3, 4). Активность каталазы почвы при добавлении нитроаммофоса была простимулирована в 4.2, 3.8 и 2.9 раза больше, чем в контроле (5.7, 5.2 и 4 раза больше чем в нефтезагрязненном фоне). Внесение биочара стимулировало активность каталазы при Д0.5 на 14% по сравнению с нефтезагрязненным фоном (ингибировала на 17% по сравнению с контролем). Гумат натрия так же, как и биочар, стимулировал при Д0.5 на 43% относительно фона (на 5% выше, чем в контроле).

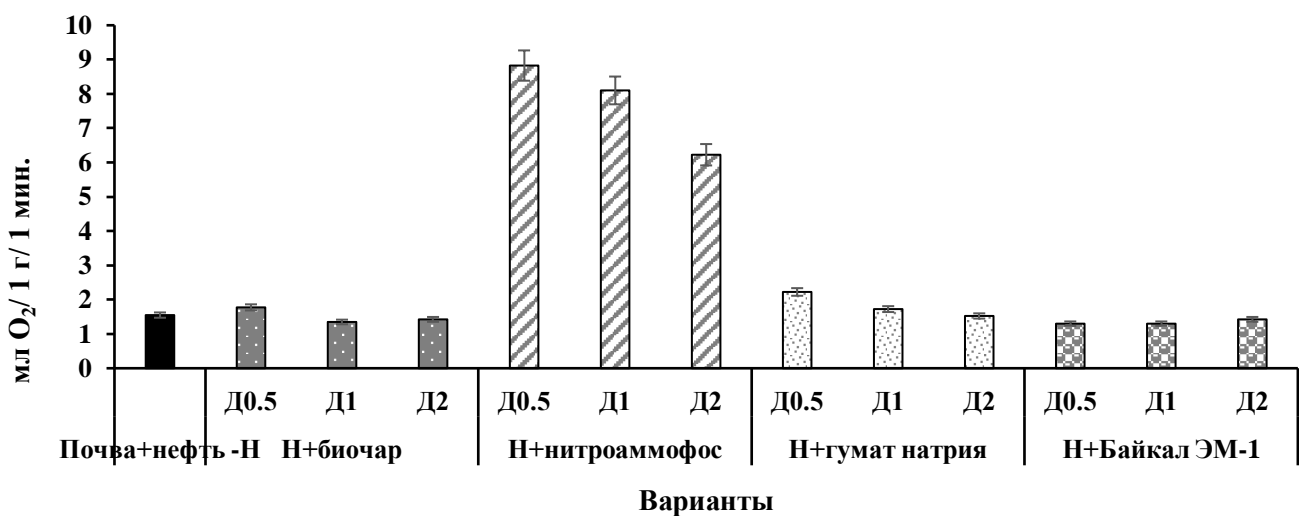


Рис. 3. Изменение активности каталазы в нефтезагрязненной бурой полупустынной почве после внесения биочара, нитроаммофоса, гумата натрия и «Байкал ЭМ-1».

Остальные дозы гумата натрия и биочара вызвали ингибирование активности фермента.

Все дозы «Байкал ЭМ-1» ингибировали активность каталазы на 9-17%. Наименьшее ингибирование установлено при дозе «Байкал ЭМ-1» Д2 на 9% ниже, чем в фоне (на 33% ниже, чем в контроле).

Активность дегидрогеназ также была простимулирована в вариантах с нитроаммофосом 2.4, 2.5, 2.6 раз при Д0.5, Д1 и Д2 соответственно. Биочар только в дозе Д1 достоверно отличался от нефтезагрязненного фона на 8%, в то время как остальные дозы (Д0.5 и Д2) достоверно не отличались от фона. Внесение гумата натрия стимулировало активность дегидрогеназ на 34, 35 и 60% по сравнению с фоном в Д0.5, Д1 и Д2 соответственно. Внесение «Байкал ЭМ-1» простимулировало активность фермента на 31, 39 и 55% по сравнению с фоном в Д0.5, Д1 и Д2 соответственно.

Ферментативная активность почв при внесении нитроаммофоса была простимулирована в несколько раз по сравнению с контролем и фоном, при внесении гумата натрия и «Байкал ЭМ-1» установлена стимуляция активности дегидрогеназ.

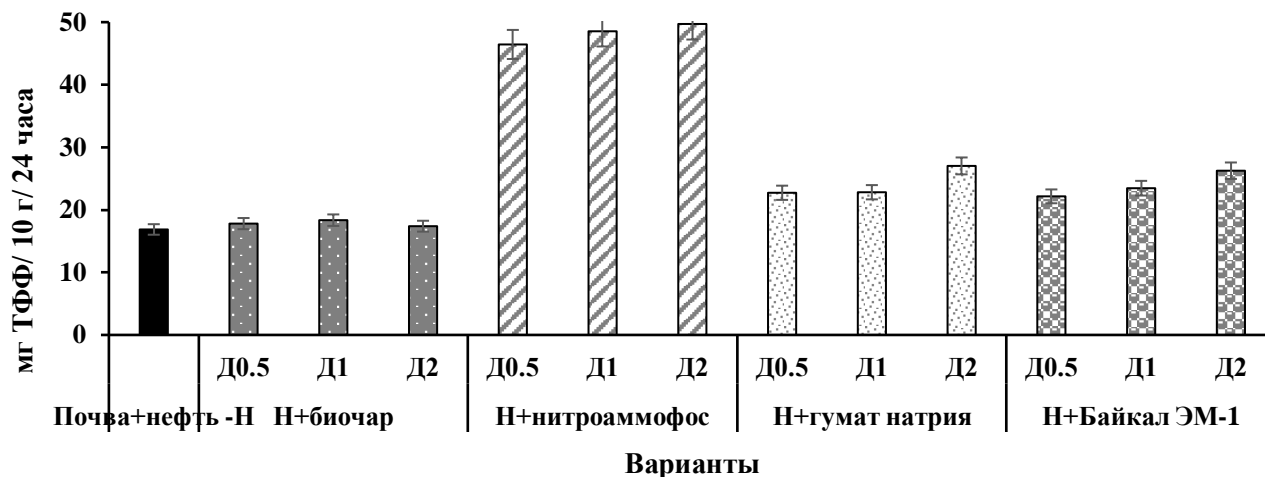


Рис. 4. Изменение активности дегидрогеназ в нефтезагрязненной бурой полупустынной почве после внесения биочара, нитроаммофоса, гумата натрия и «Байкал ЭМ-1».

Показатели интенсивности начального роста и развития семян. Всхожесть редиса после внесения ремедиантов изменилась значительно (рис. 5). Установлено, что всхожесть в почве с нитроаммофосом была ингибирована на 70-94% по сравнению с контролем (61-91% по сравнению с контролем). Всхожесть также была ингибирована при дозах Д2 гумата натрия и «Байкала ЭМ-1» на 30 и 60% по сравнению с контролем (9 и 48% по сравнению с нефтезагрязненным фоном).

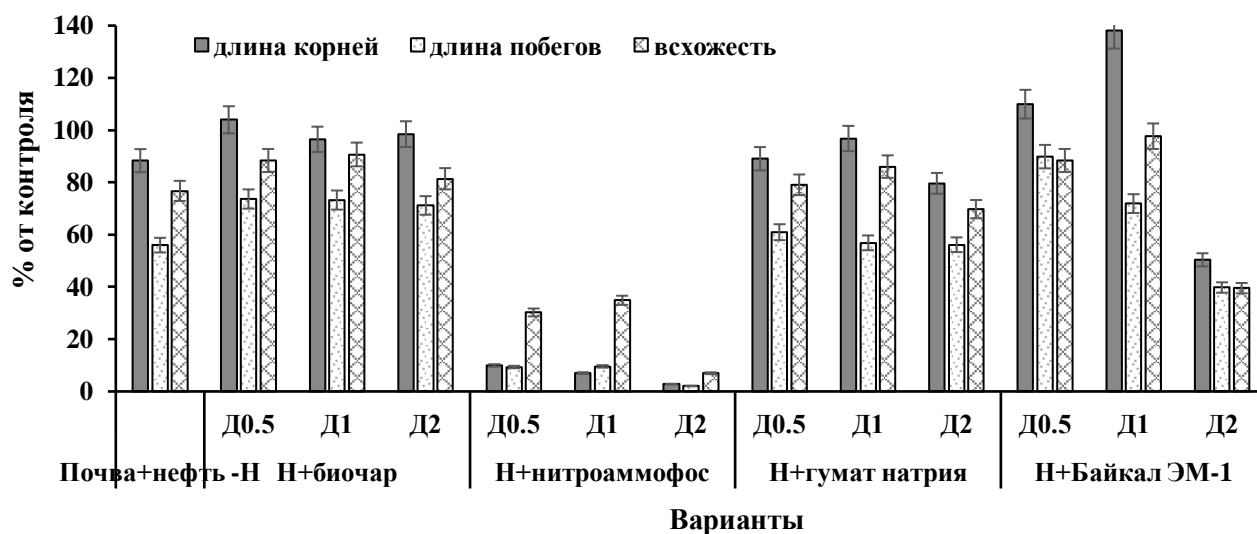


Рис. 5. Изменение всхожести, длины корней и побегов в нефтезагрязненной бурой полупустынной почве после внесения биочара, нитроаммофоса, гумата натрия и «Байкал ЭМ-1».

Длина побегов редиса была простимулирована при добавлении любой дозы биочара на 27-32%

по сравнению с фоном, при добавлении «Байкал ЭМ-1» Д0.5 и Д1 – на 35 и 17% выше, чем в нефтезагрязненном фоне. По длине корней получены похожие закономерности: биочар при любой дозе стимулировал длину корней на 9-18% выше, чем в фоне, а «Байкал ЭМ-1» Д0.5 и Д1 – на 22 и 50% соответственно.

Нитроаммофос ингибирует все фитотоксические показатели нефтезагрязненной почвы, при этом биочар и гумат натрия оказывают стимулирующее воздействие во всех дозах.

Для сравнения эффективности ремедиантов по их воздействию на экологическое состояние почвы оценивали ИПБС бурой полупустынной почвы (рис. 6).

Установлено, что биочар вызывает стимуляцию ИПБС при дозах Д0.5, Д1, Д2 – 11, 7 и 6% соответственно по сравнению с нефтезагрязненным фоном, но при этом он на 14, 17 и 19% ниже, чем в контроле. Нитроаммофос, несмотря на угнетение фитотоксических показателей, стимулирует по результатам расчета ИПБС при дозах Д0.5, Д1 и Д2 на 58, 54 и 33% по сравнению с нефтезагрязненным фоном и на 32, 29 и 8% выше, чем в контроле. Гумат натрия стимулировал ИПБС бурой полупустынной почвы при дозах Д0.5, Д1 и Д2 на 21, 20 и 23% относительно нефтезагрязненного фона, при этом достоверно не отличаясь от контроля. Внесение «Байкал ЭМ-1» в дозах Д0.5, Д1 и Д2 простимулировало ИПБС на 34, 40 и 18% относительно нефтезагрязненного фона, но лишь в двух дозах Д0.5 и Д1 была установлена стимуляция относительно контроля – на 8 и 15% соответственно. Таким образом, наиболее благоприятно на экологическое состояние нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы влияет внесение ремедиантов в виде следующей последовательности: гумат натрия (Д0.5, Д, Д2) > «Байкал ЭМ-1» (Д0.5 и Д1) > биочар (Д0.5) > нитроаммофос (Д0.5).

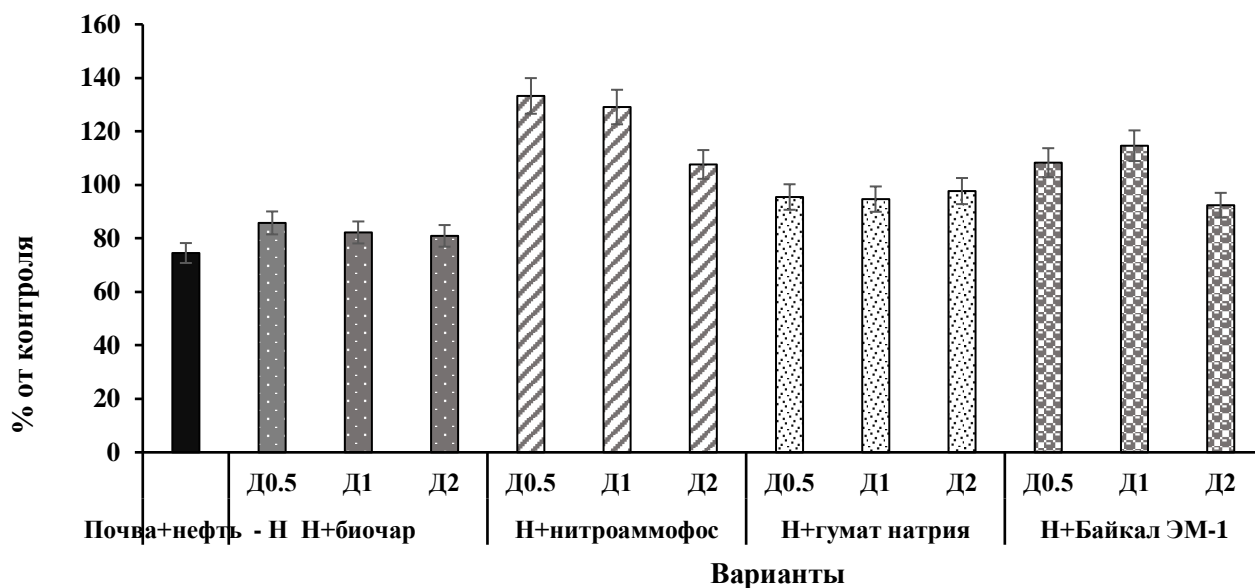


Рис. 6. Изменение интегрального показателя биологического состояния нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы после внесения биочара, нитроаммофоса, гумата натрия и «Байкал ЭМ-1».

При этом внесение нитроаммофоса хотя и вызывает стимуляцию ферментативной активности почвы, но не может считаться наиболее экологически эффективным для ее ремедиации, поскольку при внесении этого вещества реакция почвенной среды становится очень кислой (рН – 3-3.5). Внесение азотных удобрений с высоким содержанием азота (15-20%) в такую щелочную почву, как чернозем, не оказывает токсического воздействия (Вальков и др., 2008). При внесении в бурую полупустынную почву, обладающую более легким гранулометрическим составом и содержанием карбонатов, высоким содержанием легкорастворимых солей, внесение нитроаммофоса вызывает токсический эффект для микробиоты и ферментативной активности вследствие реакции почвенной среды (Панкова и др., 2014; Рухович и др., 2019).

Оценка чувствительности биологических показателей. Все показатели отражают состояние почвы при ремедиации нефтяного загрязнения. Однако между ремедиантами и откликом

биологических показателей есть существенная разница. Усредненные данные по дозам для каждого ремедианта представлены в таблице 3.

При внесении биочара в нефтезагрязненную бурую полупустынную почву представлен следующий ряд чувствительности (от наиболее чувствительного к наименее): *длина корней > всхожесть = активность каталазы > активность дегидрогеназ > длина побегов > общая численность бактерий*.

При внесении нитроаммофоса в нефтезагрязненную бурую полупустынную почву представлен следующий ряд чувствительности (от наиболее чувствительного к наименее): *общая численность бактерий = активность каталазы > всхожесть > длина побегов > длина корней*.

При внесении гумата натрия в нефтезагрязненную бурую полупустынную почву представлен следующий ряд чувствительности (от наиболее чувствительного к наименее): *активность каталазы > активность дегидрогеназ > длина корней > общая численность бактерий > длина побегов > всхожесть*.

При внесении «Байкал ЭМ-1» в нефтезагрязненную бурую полупустынную почву представлен следующий ряд чувствительности (от наиболее чувствительного к наименее): *длина корней > активность каталазы > активность дегидрогеназ > общая численность бактерий > длина побегов > всхожесть*.

Установлено, что при внесении биочара и «Байкал ЭМ-1» наибольшую чувствительность наблюдали по длине корней, а наименьшую – по общей численности бактерий, всхожести и длине побегов. При внесении нитроаммофоса и гумата натрия наибольшую чувствительность наблюдали по общей численности бактерий и активности каталазы, а наименьшую – по всхожести и длине побегов (корней).

Оценка информативности биологических показателей. Для оценки информативности рассчитывали коэффициенты корреляции между остаточным содержанием нефти и значением каждого биологического показателя (табл. 4). Наибольшую информативность проявляют биологические показатели с отрицательным корреляционным коэффициентом с остаточным содержанием нефти от $r = -0.60$ до $r = -1.00$.

Таблица 3. Оценка чувствительности биологических показателей при ремедиации бурой полупустынной почвы (данные усреднены по дозам).

Ремедиант	Общая численность бактерий	Активность каталазы	Активность дегидрогеназ	Длина корней	Длина побегов	Всхожесть редиса
Биочар	100	73	87	71	94	73
Нитроаммофос	7	7	24	363	255	84
Гумат натрия	88	58	78	86	128	137
«Байкал ЭМ-1»	99	67	75	63	127	199

Таблица 4. Корреляционные коэффициенты (r) между содержанием нефти и изменением биологических показателей бурой полупустынной почвы.

Ремедиант	Общая численность бактерий	Активность каталазы	Активность дегидрогеназ	Длина корней	Длина побегов	Всхожесть редиса
Биочар	-0.87**	0.15	-0.10	-0.58**	-0.58**	-0.08
Нитроаммофос	-0.56**	-0.63**	-0.84**	0.83*	0.82*	0.78*
Гумат натрия	-0.48	-0.60**	-0.48	-0.56**	-0.54**	-0.64*
«Байкал ЭМ-1»	-0.83**	0.49	-0.89**	0.02	0.30	0.26

Примечание к таблице 4. Достоверное отличие: * – $p < 0.01$, ** – $p < 0.001$.

Установлено, что внесение биочара в нефтезагрязненную почву вызывает повышение общей

численности бактерий на фоне снижения содержания нефти в почве ($r = -0.84$), увеличение длины побегов ($r = -0.58$) и корней ($r = -0.58$). Внесение нитроаммофоса стимулировало активность дегидрогеназ ($r = -0.84$), каталазы ($r = -0.63$) и общую численность бактерий ($r = -0.56$). Гумат натрия вызывал стимуляцию активности каталазы ($r = -0.60$), длины побегов ($r = -0.54$), корней ($r = -0.56$) и всхожести редиса ($r = -0.64$). «Байкал ЭМ-1» в нефтезагрязненной почве стимулировал общую численность бактерий ($r = -0.83$) и активность дегидрогеназ ($r = -0.89$).

По степени информативности биологические показатели при ремедиации бурой полупустынной почвы составляют ряд: общая численность бактерий > активность дегидрогеназ > активность каталазы > длина корней > длина побегов > всхожесть. Наиболее информативным показателем при ремедиации бурой полупустынной почвы является численность почвенных бактерий и активность дегидрогеназ. Полученные результаты согласуются с ранее проведенными исследованиями по оценке информативности биологических показателей после ремедиации нефтезагрязненных почв Юга России (Minnikova et al., 2022), а также при ремедиации нефтью, мазутом и бензином с помощью «Байкал ЭМ-1» (Русева и др., 2022).

Согласно оценке информативности биологических показателей и с учетом разложения нефти для биоремедиации нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы с сохранением ее экологического состояния, а значит, сельскохозяйственных и экологических функций, необходимо вносить гумат натрия Д0.5 и биочар Д0.5. Применение нитроаммофоса во всех дозах, несмотря на стимуляцию биохимических и микробиологических показателей, значительно ингибирует фитотоксические показатели, а применение «Байкал ЭМ-1» также ингибирует фитотоксические показатели и активность каталазы почвы.

Ранее в работе А.Н. Пархоменко (2018) по аридным почвам Астраханской области при нефтяном загрязнении было установлено, что наиболее применимы микробиологические показатели по сравнению с биохимическими. В нашем исследовании представлено, что микробиологические и ферментативные показатели почвы в равной степени чувствительны к ремедиации нефтяного загрязнения биочаром, нитроаммофосом гуматом натрия и «Байкал ЭМ-1».

Выводы

В результате исследования было установлено, что загрязнение бурой полупустынной почвы нефтью оказывает влияние не ее физические и биологические свойства. Внесение биочара приводит к разложению нефти и способствует стимуляции численности бактерий, росту побегов и корней редиса (*Raphanus sativus* L.). Гумат натрия вызывает стимуляцию активности каталазы ($r = -0.48$), длины побегов ($r = -0.54$) и корней ($r = -0.54$), а также всхожести редиса ($r = -0.64$). Нитроаммофос стимулирует численность бактерий ($r = -0.56$) и активность каталазы и дегидрогеназ ($r = -0.63$, $r = -0.84$), но угнетает длину побегов и корней редиса. Внесение «Байкал ЭМ-1» стимулирует численность почвенных бактерий ($r = -0.83$), активность дегидрогеназ ($r = -0.89$) и угнетает длину корней, побегов и всхожесть редиса. По степени информативности биологические показатели при ремедиации бурой полупустынной почвы составляют ряд: общая численность бактерий > активность дегидрогеназ > активность каталазы > длина корней > длина побегов > всхожесть. Для восстановления экологического состояния нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы после биоремедиации, а значит сохранения сельскохозяйственных и экологических функций необходимо вносить гумат натрия Д0.5 и биочар Д0.5. Результаты исследования целесообразно использовать при организации мероприятий по ремедиации нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Президента (МК-175.2022.5), при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») по созданию Молодежной лаборатории эковиотехнологий диагностики и охраны здоровья почв (№ СП-12-23-01), Министерства науки и высшего образования РФ, лаборатории «Здоровье почвы» Южного федерального университета (соглашение № 075-15-2022-1122), проекта Минобрнауки России «Лаборатория молодых ученых» в рамках Межрегионального научно-образовательного центра Юга России (№ ЛабНОЦ-21-01АБ, FENW-2021-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бананова В.А., Лазарева В.Г.* 2014. Тенденции изменения ботанического разнообразия под влиянием опустынивания в республике Калмыкия // Аридные экосистемы. Т. 20. № 2 (59). С. 87-96. [*Bananova V.A., Lazareva V.G.* 2014. Trends of Changes in the Botanical Diversity under the Influence of Desertification in the Republic of Kalmykia // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 2. P. 119-126.]
- Булуктаев А.А.* 2020. Сезонное изменение ферментативной активности почв заповедника «Черные Земли» // Полевые исследования. № 7. С. 134-143.
- Булуктаев А.А., Сангаджиева Л.Х.* 2015. Из опыта применения органических сорбционных материалов для рекультивации нефтезагрязненных почв // Научная мысль Кавказа. № 2 (82). С. 113-118.
- Булуктаев А.А., Сангаджиева Л.Х., Даваева Ц.Д.* 2017. Изменение химических свойств почв Калмыкии при нефтяном загрязнении в модельном эксперименте // Полевые исследования. № 4. С. 126-137.
- Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* 2008. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Эверест. 275 с.
- Градова Н.Б., Сустина Р.Н., Степаненко В.Г., Василькова Е.И.* 1971. Штамм дрожжей *candida guilliermondii* n-382 1971. № 19 [Электронный ресурс <https://findpatent.ru/patent/25/258222.html> (дата обращения 11.12.2022)].
- Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В.* 2019. Разработка региональных предельно допустимых концентраций нефти в почвах аридных экосистем Юга России // Экология и промышленность России. Т. 23. № 9. С. 66-70.
- Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А., Минникова Т.В., Казеев К.Ш., Нгуег Д.Х., Данг Х.К.* 2021. Оценка устойчивости аридных почв Юга европейской части России к загрязнению кадмием по биологическим показателям // Вестник Московского университета. Серия 5: География. № 1. С. 78-87.
- Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Биарсланов А.Б., Курбанисмаилова А.С.* 2022. Почвы аридных регионов Юга России в базовой классификации почв мира // Аридные экосистемы. Т. 28. № 1 (90). С. 42-52. [*Zalibekov Z.G., Mamaev S.A., Biarslanov A.B., Kurbanismailova A.S.* 2022. Soils of Arid Regions of Southern Russia in the Basic Classification of Soils of the World // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 1. P. 34-42.]
- Классификация и диагностика почв России. 2004 / Ред. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
- Колесников С.И., Дауд Р.М., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В.* 2019. Региональные нормативы содержания мазута в аридных почвах Юга России // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. № 3 (288). С. 25-29.
- Минникова Т.В., Колесников С.И., Денисова Т.В.* 2019. Влияние азотных и гуминовых удобрений на биохимическое состояние нефтезагрязненного чернозема // Юг России: Экология, развитие. Т. 14. № 2. С. 189-201.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Чемидов М.М.* 2020. Изменение растительности на мелиорированных солонцовых почвах Приергенинской равнины за 10 лет (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3 (84). С. 30-39. [*Novikova N.M., Volkova N.A., Ulanova S.S., Chemidov M.M.* 2020. Change in Vegetation on Meliorated Solonetcic Soils of the Peri-Yergenic Plain over 10 Years (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 194-202.]
- Павлова Н.Ц., Басангова Н.А., Болдырева Е.С.* 2015. Развитие нефтегазового комплекса Республики Калмыкия: состояние и перспективы // Новые технологии. № 4. С. 117-121.
- Панкова Е.И., Новикова А.Ф., Конюшкова М.В., Шадрина М.Б., Мухортов В.И.* 2014. Почвы в зоне контакта светло-каштановых и бурых аридных почв на юге европейской России // Аридные экосистемы. Т. 20. № 3 (60). С. 79-93. [*Pankova Ye.I., Novikova A.F., Konyushkova M.V., Shadrina M.B., Mukhortov V.I.* 2014. Soils at the boundary between the zones of light chestnut and brown arid soils in the south of European Russia // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 3. P. 194-207.]
- Пархоменко А.Н.* 2018. Эколого-биологическое состояние почв Астраханской области в условиях антропогенного воздействия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. Т. 8. № 1. С. 129-134.
- Перекрестов Н.В.* 2019. Почвенно-климатические агроландшафты Республики Калмыкия // Социально-экономические и экологические аспекты развития Прикаспийского региона: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Элиста, 28-30 мая 2019 г. Элиста: Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова. С. 214-218.
- Рухович Д.И., Панкова Е.И., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Иванов А.Л.* 2019. Количественный подход к районированию аридных территорий России с учётом климатических и почвенно-гранулометрических параметров // Доклады Академии наук. Т. 485. № 5. С. 621-624.
- Стратегия социально-экономического развития республики Калмыкия на период до 2030 года. 2019. 227 с.
- Ташинова Л.Н., Ташинова А.А.* 2010. Почвы аридных зон Калмыкии // Вестник Южного научного центра РАН. Т. 6. № 1. С. 52-61.
- Цомбуева Б.В.* 2013. Техногенное загрязнение почв в зоне влияния нефтедобывающего комплекса Республики

- Калмыкия // Современные проблемы науки и образования. № 6 [Электронный ресурс <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11770> (дата обращения 11.12.2022)].
- Цомбуева Б.В., Самтанова Д.Э., Даваева Ц.Д., Сангаджиева Л.Х. 2013. Оценка нефтяного загрязнения почв в зоне нефтедобывающего комплекса республики Калмыкия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 15. № 3-3. С. 1026-1029.
- Чачина С.Б., Чачина Е.П. 2018. Эффективность комплексного применения вермиккультуры и биопрепаратов "Байкал", "Восток", "Тамир" для очистки почв от мазута // Бюллетень науки и практики, Т. 4 (10). С. 133-139.
- Юфев В.Г., Ткаченко Н.А., Синельникова К.П. 2022. Спектральные характеристики опустыненных пастбищ Черных Земель // Аридные экосистемы. Т. 28. № 1 (90). С. 65-72. [Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Sinelnikova K.P. 2022. Spectral Characteristics of Desertified Black-Earth Pastures // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 1. P. 54-60.]
- Ash C., Priest F.G., Collins M.D. 1993. Molecular identification of rRNA group 3 bacilli (Ash, Farrow, Wallbanks and Collins) using a PCR probe test. Proposal for the creation of a new genus *Paenibacillus* // Antonie Van Leeuwenhoek. Vol. 64. P. 253-260.
- Daoud R.M., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Cuong D.H., Hoi N.D. 2020. Assessment of South Russia Arid Soils Resistance to Gasoline Contamination Using Biological Indicators // Biogeosystem Technique. No. 7 (2). P. 55-65.
- Farmer J.J. III, Asbury M.A., Hickman F.W., Brenner D.J. 1980. Enterobacteriaceae Research Group (USA). "Enterobacter sakazakii: a new species of 'Enterobacteriaceae' isolated from clinical specimens" // This is a systemic bacterium. Vol. 30 (3) P. 569-84.
- Felten A., Barreau C., Bizet C., Lagrange P.H., Philippon A. 1999. Lactobacillus species identification, H₂O₂ production, and antibiotic resistance and correlation with human clinical status // Journal of Clinical Microbiology. Vol. 37. No. 3. P. 729-733.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. 2019. Development of Regional Standards for Pollutants in the Soil Using Biological Parameters // Environmental Monitoring and Assessment. No. 191. P. 544.
- Kolesnikov S.I., Spivakova N.A., Vezdeneeva L.S., Kuznetsova Y.S., Kazeev K.S. 2013. Effect of Model Oil Pollution on Biological Properties of Soils of Dry Steppes and Semi-deserts of Southern Russia // Arid Ecosystems. Vol. 3. No. 2. P. 101-105. [Колесников С.И., Спивакова Н.А., Везденева Л.С., Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. 2013. Влияние модельного загрязнения нефтью на биологические свойства почв сухих степей и полупустынь юга России // Аридные экосистемы. Т. 19. № 2. С. 58-63.]
- Kurtzman C.P., Fell J.W., Boekhout T. 2011. The Yeasts: A Taxonomic Study, 5th edition. Vol. 1. P. 928-929.
- Menhart N., Thariath A., Viswanatha T. 1991. Characterization of the pyoverdines of *Azotobacter vinelandii* ATCC 12837 with regard to heterogeneity // Biology of Metals. Vol. 4 (4). P. 223-32.
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. 2019. Impact of Ameliorants on the Biological Condition of Oil-Contaminated Black Soil // Soil and Environment. No. 38 (2). P. 170-180.
- Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. 2022. Assessment of Ecological State of Soils in Southern Russia by Petroleum Hydrocarbons Pollution after Bioremediation // Environmental Processes. No. 9. P. 49.
- Ryan K.J., Ray C.G. 2003. Sherris Medical Microbiology. McGraw Hill Professional. 992 p.
- Sandven P., Nilsen K.W., Digranes A., Tjade T., Lassen J.F. 1997. *Candida norvegensis*: a fluconazole-resistant species // Antimicrobial Agents and Chemotherapy. Vol. 41. P. 1375-1376.
- Wirth F, Goldani L.Z. 2012. Epidemiology of *Rhodotorula*: an emerging pathogen"// Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases. 465717. [Электронный ресурс <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23091485/> (дата обращения 11.12.2022)].
- World Reference Base for Soil Resources. 2022. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS). 234 p.