

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МАЗУТА В ПОЧВАХ КРЫМА

А.А. Кузина¹, Т.В. Минникова², В.Г. Гайворонский³, С.Ю. Ревина⁴, С.И. Колесников⁵

^{1, 2, 4, 5} Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий имени Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования

³ Южный федеральный университет, Академия физической культуры и спорта, кафедра теоретических основ физического воспитания

¹ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: nyuta_1990@mail.ru

² Вед. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: loko261008@yandex.ru

³ Доц., канд. биол. наук; e-mail: vggayvoronskiy@sfedu.ru

⁴ Магистр; e-mail: soffy.soff@mail.ru

⁵ Зав. кафедрой, д-р с.-х. наук; e-mail: kolesnikov1970@list.ru

На территории Крымского полуострова расположены уникальные типы и подтипы почв. Возрастающая туристическая нагрузка на регион требует увеличения производительности всех отраслей, в том числе нефтеперерабатывающей. Все это увеличивает риски разлива и утечки нефти и нефтепродуктов при их транспортировках и перекачке. В сфере нормирования загрязнения почв нефтепродуктами (валового содержания) существует большой пробел, заключающийся в отсутствии предельно-допустимой концентрации в нормативной базе Российской Федерации. Для прогнозирования возможных негативных последствий загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами необходима разработка региональных экологически безопасных концентраций нефти и нефтепродуктов, при расчете которых учтены местные региональные эколого-геохимические особенности типов почв. Цель исследования – провести лабораторное моделирование экологически безопасных концентраций мазута в почвах Крыма. Загрязнение мазутом (1, 5 и 10% от массы почвы) моделировали в лабораторных условиях. В исследовании было изучено семь типов почв Крыма: чернозем остаточно-карбонатный, чернозем слитой солонцеватый, темно-каштановая солонцеватая, коричневая карбонатная, коричневая выщелоченная красноцветная, бурая лесная кислая почвы и чернозем неполноразвитый. По истечению 30 суток модельного эксперимента в почвенных образцах определяли наиболее информативные биологические показатели: биохимические (активность каталазы, дегидрогеназ), микробиологические (общая численность почвенных бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*) и фитотоксические (длина корней) показатели. Установлено, что загрязнение мазутом негативно сказалось на биологических свойствах исследуемых почв Крыма. Получен ряд устойчивости почв к загрязнению мазутом: чернозем остаточно-карбонатный $\geq$ чернозем слитой солонцеватый = темно-каштановая солонцеватая = коричневая выщелоченная красноцветная $\geq$ чернозем неполноразвитый $\geq$ коричневая карбонатная почва > бурая лесная кислая почва. Получены значения предельно допустимых уровней остаточного содержания мазута (ПДОС_м) в почвах Крыма: в черноземе остаточно-карбонатном составляет 0,33%, в темно-каштановой солонцеватой почве и черноземе слитом солонцеватом – 0,30%, в коричневой карбонатной почве – 0,28%, в коричневой выщелоченной красноцветной почве – 0,35%, в черноземе неполноразвитом – 0,33%, в бурой лесной кислой почве – 0,21%. Результаты исследования возможно использовать при биодиагностике экологического состояния и здоровья почв при загрязнении мазутом.

Ключевые слова: загрязнение, моделирование, фитотоксичность, ферментативная активность, микробиологические показатели

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.7

ВВЕДЕНИЕ

Мазут – это конечный продукт переработки нефти, который является самой тяжелой фракцией. Этот нефтепродукт так же, как и остальные жидкие продукты переработки нефти, оказывает определенное негативное воздействие на человека и окружающую среду, в частности на почву [García et al., 2019; Shah et al., 2003; Karkush, Abdul Kereem, 2018; Jayasinghe et al., 2022]. Компоненты нефти имеют

гидрофобный состав, и их внесение в почву приводит к изменению не только химических, но и физических свойств [Marin-Garcia et al., 2016; Gordon et al., 2018; Vodyanitskii et al., 2016; Булуктаев, 2017; Dindar et al., 2015; Ofori, 2021], что влечет за собой ухудшение аэрации, снижение иммобилизации элементов питания и реакции почвенной среды (pH) [Shukry et al., 2013; Коршунова и др., 2019]. Эти изменения ведут к нарушению биологического равно-

весия почвы, которое выражается в угнетении жизнедеятельности микроорганизмов [Li et al., 2022; Minnikova et al., 2022]. Таким образом, почва становится менее продуктивной [Salam et al., 2022].

В сфере нормирования загрязнения почв нефтепродуктами (валового содержания) существует большой пробел, заключающийся в отсутствии предельно допустимой концентрации в нормативной базе Российской Федерации [Околелова и др., 2015; Ковалева и др., 2022]. Для прогнозирования возможных негативных последствий разливов нефтепродуктов и проникновения их в окружающую среду необходима разработка региональных экологически безопасных концентраций, в которых будут учитываться местные эколого-геохимические особенности почв. В настоящее время при стандартизации и оценке состояния окружающей среды большое внимание уделяется экологическому подходу. Наиболее чувствительные и информативные биологические показатели выбираются для оценки экотоксичности нефтепродуктов и нарушения экологических функций почв [Гайворонский и др., 2023; Minnikova et al., 2019; Ковалева, Яковлев, 2018; Newelke et al., 2018; Колесников и др., 2010].

Крымский полуостров – развивающийся, перспективный туристический регион России. На территории Крымского полуострова расположены уникальные типы и подтипы почв Юга России: солонцовые, солончаковые, суглинистые почвы Присивашья, каштановые и черноземные почвы степной части полуострова Крым, горно-лесные и горно-луговые почвы предгорий и гор, шиферные, известковые и суглинистые почвы Южного берега Крыма [Сухачева, Ревина, 2020]. Кроме того, на территории полуострова можно встретить более двух тысяч видов различных растений. Несмотря на это, регион подвержен значительной антропогенной нагрузке [Демченко, Полякова, 2020; Государственный доклад..., 2023]. Начиная с 2020 г., благодаря завершению строительства дороги федерального значения «Таврида», значительно увеличился поток автотранспорта к рекреационным объектам, возросло строительство новых туристических объектов, автомобильных дорог и нефтепроводов [Коптилов, 2020; Калашников, 2021]. Утечки и проливы нефтепродуктов при аварийных ситуациях на нефтебазах могут привести к существенному загрязнению окружающей территории [Elum et al., 2016; Dhaka, Chattopadhyay, 2021; Andrews et al., 2021; Zhang et al., 2019]. При таких утечках возможно накопление нефтепродуктов в почвенном профиле, миграция и попадание в грунтовые воды рек и озер. Возрастающая туристическая нагрузка на регион требует повышения производительности всех отраслей, в том числе нефтеперерабатывающей. Все

это увеличивает риски разлива и утечки нефтепродуктов при транспортировках и перекачке [Bolade et al., 2021; Haider et al., 2021; Klemz et al., 2021].

Цель исследования – провести лабораторное моделирование экологически безопасных концентраций мазута в почвах Крыма. Для осуществления цели исследования были поставлены следующие задачи: 1) оценить экологическое состояние почв Крыма после загрязнения мазутом по биологическим показателям; 2) рассчитать интегральный показатель биологического состояния почв; 3) рассчитать и проанализировать предельно допустимое остаточное содержание мазута в почвах Крыма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования. Модельные эксперименты по загрязнению мазутом были проведены для почв горного и равнинного Крыма. На картосхеме цветом указаны разнообразные типы и подтипы почв Крыма (рис. 1). В данном исследовании анализировано загрязнение мазутом семи типов почв. Образцы почв были отобраны в октябре 2021 г. Для модельного эксперимента по химическому загрязнению было отобрано по 30 кг каждой почвы в типичном месте для каждого типа почв. Основные характеристики исследуемых почв были определены на кафедре экологии и природопользования и представлены в табл. 1. Содержание органического вещества в почве определяли по методу И.В. Тюрина, реакцию почвенной среды – потенциометрически, гранулометрический состав почвы по методу Н.А. Качинского [Практикум по почвоведению..., 1986]. Для модельных экспериментов использовали почву из верхнего слоя Апах – 0–15 см. Как видно из табл. 1, почвы различаются по своим свойствам [Вальков и др., 2008; Казеев, Колесников, 2015], а значит, можно предположить, что и по устойчивости к их загрязнению мазутом.

Мазут. Для моделирования загрязнения почв Крыма мазутом в предварительно увлажненную почву (с учетом объема мазута до 30%) вносили мазут в весовой концентрации 1% (небольшое загрязнение), 5% (среднее загрязнение) и 10% (высокий уровень загрязнения) от массы почвы. Такое загрязнение почвы мазутом часто встречается в районах добычи, транспортировки и переработки нефти даже после ликвидации загрязнения. В табл. 2 представлены основные физико-химические показатели мазута.

Модельный эксперимент. Вегетационные сосуды с почвой закладывали в трехкратной повторности. Инкубирование почвы проводили при температуре воздуха равной 20–22°C и 25%-й влажности почвы в течение 30 суток. Выбор такого периода инкубации как периода, при котором происходит снижение/ингибирование биологических

показателей, обусловлен нашими предыдущими исследованиями [Kolesnikov et al., 2019; Кузина и др., 2021]. На основе этих исследований были выбраны наиболее информативные показатели: активность каталазы, дегидрогеназ, общая численность почвенных бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*, длина корней редиса (табл. 3). На основании полученных данных биологических показателей по каждому варианту был рассчитан интегральный показатель биологического состояния почвы (ИПБС)

[Kolesnikov et al., 2019]. Расчет ИПБС проводили по формуле (1), значение каждого показателя в контроле принято за 100%:

$$\text{ИПБС} = (A_{\text{кат}} + A_{\text{дг}} + B + A_z + D_k) / N, \quad (1)$$

где $A_{\text{кат}}$ – активность каталазы; $A_{\text{дг}}$ – активность дегидрогеназ; B – общая численность почвенных бактерий; A_z – обилие бактерий рода *Azotobacter*, %; D_k – длина корней, мм; N – число показателей.

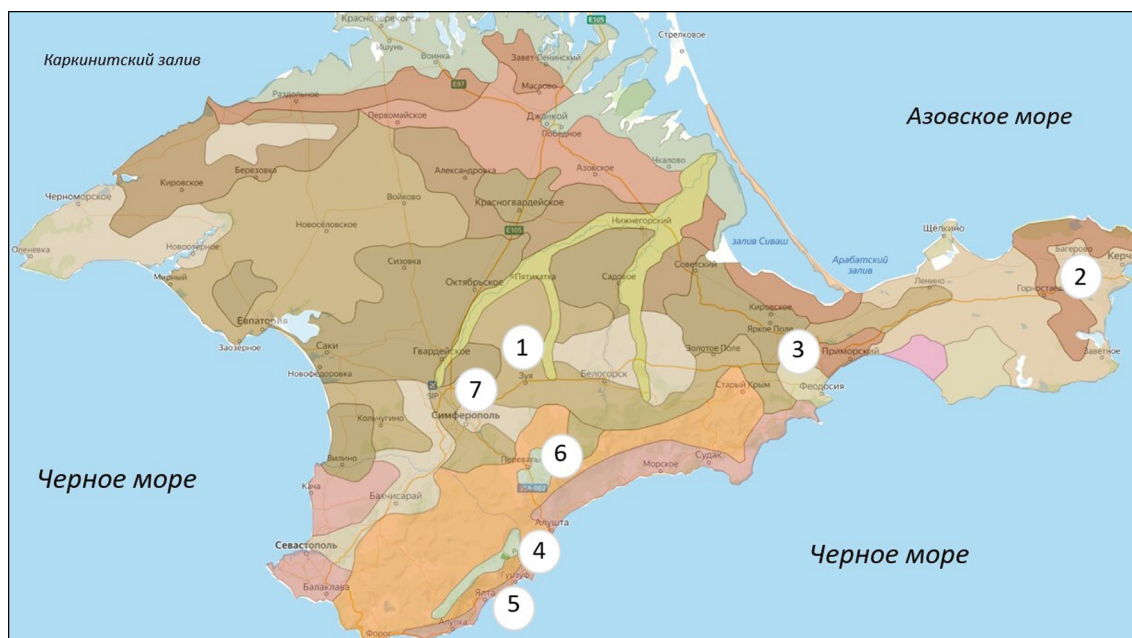


Рис. 1. Карта-схема с расположением точек отбора почв Крыма: 1 – чернозем остаточный-карбонатный; 2 – чернозем слитый солонцеватый; 3 – темно-каштановая солонцеватая; 4 – коричневая карбонатная; 5 – коричневая выщелоченная красноцветная; 6 – бурая лесная кислая; 7 – чернозем неполноразвитый

Fig. 1. Schematic map with the location of soil sampling points in Crimea: 1 – Leptic Chernozems Skeletic; 2 – Mollic Vertisols Eutric; 3 – Endosalic Kastanozems Sodic; 4 – Haplic Cambisols Eutric; 5 – Haplic Cambisols Eutric; 6 – Haplic Cambisols Eutric; 7 – Mollic Leptosols Eutric

Для оценки достоверности влияния загрязнения на исследуемые показатели использовали дисперсионный анализ. Для удобства интерпретации результатов дисперсионного анализа была вычислена наименьшая существенная разность (НСР). Для оценки тесноты связи между изменением ИПБС и биологическими показателями рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена (ненормальное распределение). Статистическая обработка результатов исследования проводилась с помощью программы Statistica 12.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая численность бактерий. В результате модельного загрязнения почв Крыма мазутом было установлено, что внесение 1% мазута достоверно

не снижает общую численность бактерий в черноземе неполноразвитом (рис. 2А). В коричневой карбонатной, коричневой выщелоченной красноцветной и темно-каштановой солонцеватой почвах отмечено снижение на 26, 27 и 28% соответственно. В бурой лесной кислой и черноземе остаточный-карбонатном – на 30% и 43% – в черноземе слитом солонцеватом. При добавлении 5% мазута зафиксировано уменьшение общей численности бактерий на 40% в черноземе неполноразвитом, на 46, 49, 50, 52 и 54% – в коричневой карбонатной, темно-каштановой солонцеватой, коричневой выщелоченной красноцветной, в черноземе остаточный-карбонатном и черноземе слитом солонцеватом соответственно. В бурой лесной кислой – на 61%. При внесении 10% мазута общая численность бактерий снизилась на 58% в черноземе неполноразвитом, в черноземе

Таблица 1
Основные характеристики почв Крыма

№ п/п	Название почв	Название почв по WRB [IUSS, 2022]	Место отбора почвы	Экосистема	pH	Гранулометрический состав	C _{орг} , %	Численность бактерий, млрд/г	Активность каталазы, мг О ₂ /г/мин	Активность дегидрогеназ, мг ТФФ/г/24 ч	Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> , % комочков обратанная
1	Чернозем оста- точно-карбонат- ный	Leptic Chernozems Skeletal	Белгородский район, с. Крым-роза	Пашня	7,8	Тяжело- суглинистый	3,1	5,4	8,9	19,3	100
2	Чернозем слитой солонцеватый	Mollic Vertisols Eutric	Ленинский район, с. Горностаевка	Пашня	7,9	Тяжело- суглинистый	3,3	4,6	9,0	19,1	100
3	Темно- каштановая солонцеватая	Endosalic Kastanozems Sodic	Ленинский район, с. Батальное	Пашня	7,5	Тяжело- суглинистый	3,7	3,7	7,0	13,0	79
4	Коричневая карбонатная	Haplic Cambisols Eutric	Городской округ г. Алушты, с. Кипарисное	Виноградник	7,8	Тяжело- суглинистый	1,7	3,5	6,9	10,9	49
5	Коричневая выщелоченная красноцветная	Haplic Cambisols Eutric	Район городского округа г. Ялты, заповедник «Мыс Мартыан»	Можжевельное редколесье	6,9	Глинистый	3,1	4,5	11,7	18,6	56
6	Бурая лесная кислая	Haplic Cambisols Eutric	Район Ангарского перевала	Буковый лес	5,3	Тяжело- суглинистый	1,4	2,7	5,4	10,2	22
7	Чернозем неполноразвитый	Mollic Leptosols Eutric	Симферопольский район, с. Трудовое	Пашня	7,9	Тяжело- суглинистый	2,6	4,5	7,7	13,3	100

слитом солонцеватом, темно-каштановой солонцеватой, коричневой карбонатной, черноземе остаточ-но-карбонатном – на 61, 63, 66, 67% соответствен-но. В бурой лесной кислой – на 74%.

При загрязнении 1% мазута в черноземе непол-норазвитом, коричневой карбонатной и коричневой выщелоченной красноцветной почвах не зафиксиро-вано достоверных изменений обилия бактерий рода *Azotobacter* (рис. 2Б). В черноземе остаточно-карбонатном, в черноземе слитом солонцеватом, в темно-каштановой солонцеватой почве и в бурой лесной кислой почвах отмечено снижение этого по-казателя на 13, 18, 24 и 31% соответственно. При внесении 5% мазута снижение обилия бактерий

рода *Azotobacter* отмечалось в коричневой выще-лоченной красноцветной почве на 15%, в черно-земе неполноразвитом и коричневой карбонатной, в черноземе слитом солонцеватом и темно-кашта-новой солонцеватой почвах – на 24, 26, 31 и 33% соответственно. В черноземе остаточно-карбонат-ном – на 40%. При загрязнении 10% мазута наблю-далось снижение обилия бактерий рода *Azotobacter* в коричневой выщелоченной красноцветной почве на 27%, в черноземах неполноразвитом, остаточ-но-карбонатном, черноземе слитом солонцеватом, темно-каштановой солонцеватой и коричневой кар-бонатной почвах на 35, 45, 46, 48 и 53% соответ-ственно. В бурой лесной кислой почве – на 81%.

Таблица 2

Физико-химические показатели мазута

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Плотность при 20°С, кг/м ³	923,4
2	Вязкость условная при 80°С, градусы	3,8
3	Температура застывания, °С	15
4	Массовая доля серы, %	1,71
5	Зольность, %	0,06

Таблица 3

Методы оценки биологической активности почвы

Наименование биологического показателя	Метод, единицы измерения
Активность каталазы	Волюметрическим методом по скорости разложения 3% раствора пере-киси водорода при контакте с почвой, мл О ₂ за 1 мин в 1 г почвы
Активность дегидрогеназ	Колориметрическим методом по преобразованию трифенилтетразолия хлористого в трифенилформазаны, в мг трифенилформазанов за 24 ч в 10 г почвы
Общая численность почвенных бактерий	Подсчет общей численности бактерий методом люминесцентной микро-скопии в падающем свете, в млрд/г почвы
Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i>	Методом подсчета комочков почвы обрастания бактериями рода <i>Azotobacter</i> на среде Эшби, %
Длина корней редиса	Измерение длины корней редиса по окончании 7 суток вегетационного эксперимента, мм

Ферментативная активность. Активность ка-талазы достоверно снизилась при добавлении 1% мазута в черноземе неполноразвитом на 12%, в ко-ричневой карбонатной – на 15%, в черноземе сли-том солонцеватом – на 17%, в темно-каштановой солонцеватой – на 20% и в бурой лесной кислой – на 35% (рис. 3А). При внесении 5% мазута зафик-сировано уменьшение активности каталазы на 25% в коричневой выщелоченной красноцветной почве, в темно-каштановой солонцеватой, коричневой кар-бонатной почвах и черноземе неполноразвитом со-

ответственно – на 34, 36, 38%. В черноземе слитом солонцеватом, в бурой лесной кислой и черноземе остаточно-карбонатном – на 46, 48 и 49% соответ-ственно. При загрязнении 10% мазута наблюдалось уменьшение активности каталазы на 51, 52, 53, 54% в коричневой выщелоченной красноцветной, бу-рой лесной кислой, черноземе неполноразвитом, коричневой карбонатной почвах соответственно. В темно-каштановой солонцеватой – на 67%, а в черноземе слитом солонцеватом и черноземе оста-точно-карбонатном – на 76 и 78% соответственно.

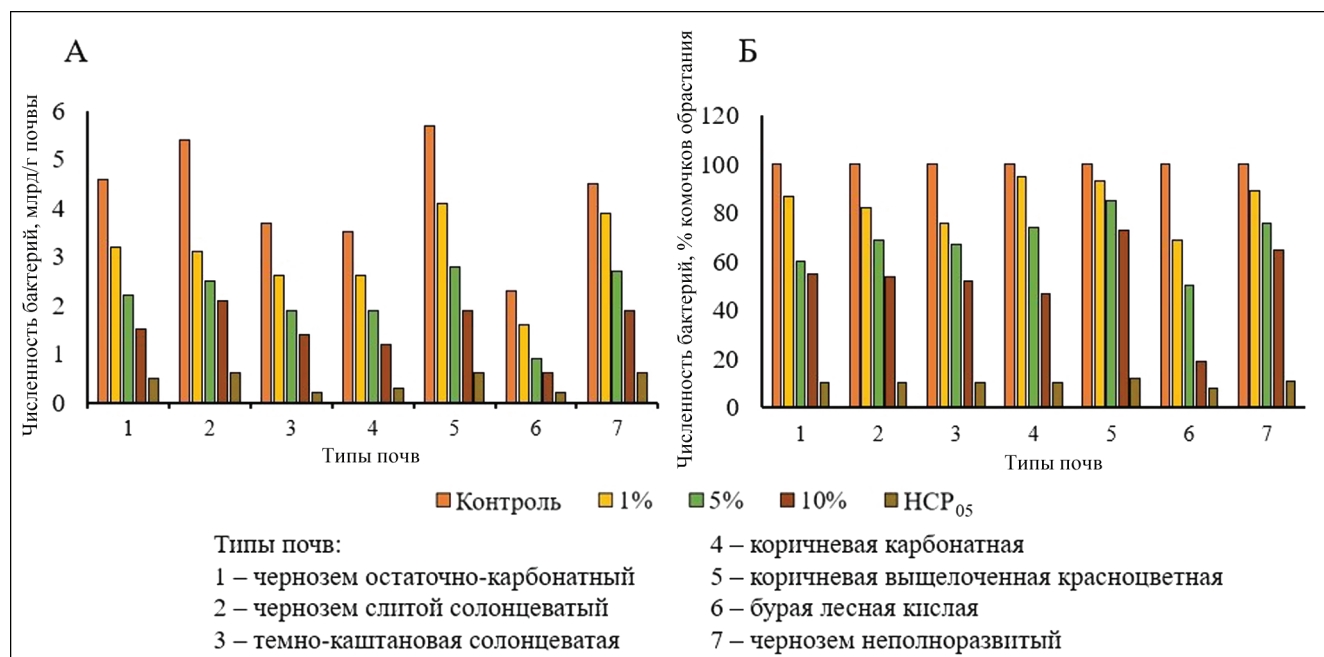


Рис. 2. Изменение микробиологических показателей в почвах Крыма после загрязнения мазутом: А – общая численность бактерий, млрд/г; Б – обилие бактерий рода *Azotobacter*, % комочков обрастания

Fig. 2 Changes of microbiological indicators in the soils of Crimea after fuel oil pollution: А – total number of bacteria, billion/g; Б – the abundance of bacteria of the *Azotobacter* genus, % of the lumps of furring

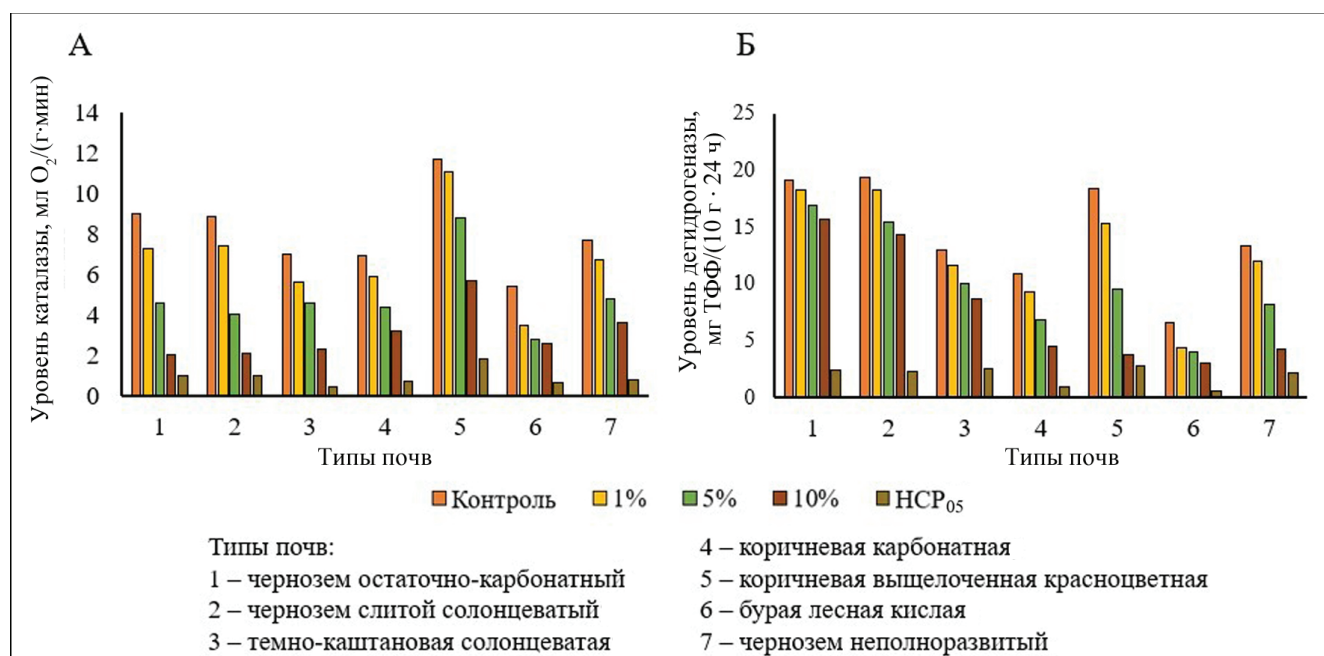


Рис. 3. Изменение ферментативной активности в почвах Крыма после загрязнения мазутом: А – каталазы, мл O₂/(г·мин); Б – дегидрогеназы, мг ТФФ/(10 г·24 ч)

Fig. 3. Change in enzymatic activity in the soils of Crimea after fuel oil pollution: А – of catalase, ml O₂/(g·min); Б – of dehydrogenases, mg TPF/(10 g·24 hours)

Активность дегидрогеназ достоверно не изменилась в черноземах остаточно-карбонатном, слитом солонцеватом, неполноразвитом и темно-каштановой солонцеватой почве при добавлении 1% мазута (см. рис. 3Б). В коричневой карбонатной и коричневой выщелоченной красноцветной почвах при

такой концентрации мазута активность дегидрогеназ снизилась на 14 и 17% соответственно. В бурой лесной кислой – на 33%. Загрязнение мазутом 5% достоверно снизило активность дегидрогеназ в черноземе слитом солонцеватом на 20%, в темно-каштановой солонцеватой почве – на 27%, в черно-

земе неполноразвитом – на 38%, в бурой лесной кислой – на 40%, в коричневой выщелоченной красноцветной – на 48% соответственно. При внесении 10% мазута зафиксировано снижение активности дегидрогеназ на 18% в черноземе остаточно-карбонатном, в черноземе слитом солонцеватом – на 26%, в темно-каштановой солонцеватой почве – на 33%, в бурой лесной кислой – на 53%, в черноземе неполноразвитом – на 67% и в коричневой выщелоченной красноцветной почве – на 79%.

Длина корней редиса. Длина корней редиса при внесении 1% мазута снизилась на 12, 19, 21 и 23% в коричневой выщелоченной красноцветной, черноземе остаточно-карбонатном, черноземе слитом солонцеватом и темно-каштановой солонцеватой почвах соответственно (табл. 4). В черноземе неполноразвитом отмечено уменьшение длины корней редиса на 31%, в бурой лесной кис-

лой на 36%, а в коричневой карбонатной на 44%. Загрязнение 5% мазута снизило длину корней редиса в черноземе слитом солонцеватом и остаточно-карбонатном на 25 и 28% соответственно. В темно-каштановой солонцеватой отмечалось снижение показателя на 35%, в коричневой выщелоченной красноцветной почве – на 43%, в бурой лесной кислой – на 49%. В коричневой карбонатной почве и черноземе неполноразвитом отмечено снижение длины корней редиса на 60 и 62% соответственно. При внесении 10% мазута длина корней редиса снизилась на 33% в черноземе остаточно-карбонатном, в черноземе слитом солонцеватом – на 53%, в темно-каштановой солонцеватой – на 63%, в бурой лесной кислой, коричневой карбонатной, коричневой выщелоченной красноцветной и черноземе неполноразвитом – на 71, 72, 74 и 76% соответственно.

Таблица 4

Изменение длины корней редиса в почвах Крыма после загрязнения мазутом, % от контроля

Тип почв	Контроль	Концентрация мазута, %			НСР ₀₅ *
		1	5	10	
Чернозем остаточно-карбонатный	100	81	72	67	10
Чернозем слитой солонцеватый	100	79	75	47	7
Темно-каштановая солонцеватая почва	100	77	65	37	10
Коричневая карбонатная	100	56	40	18	7
Коричневая выщелоченная красноцветная почва	100	88	57	24	10
Бурая лесная кислая почва	100	64	51	29	7
Чернозем неполноразвитый	100	69	38	26	8

Примечание. *НСР₀₅ – наименьшая существенная разность, величина, указывающая границу возможных случайных отклонений в эксперименте при 5%-м уровне значимости.

Интегральный показатель биологического состояния почв Крыма при загрязнении мазутом. На основе полученных показателей были рассчитаны ИПБС почв Крыма, которые отражают чувствительность биологических показателей почвы к внесению мазута (табл. 5). Был получен следующий ряд устойчивости почв к загрязнению мазутом: чернозем остаточно-карбонатный (66) ≥ чернозем слитой солонцеватый (63) = темно-каштановая солонцеватая почва (63) = коричневая выщелоченная красноцветная почва (63) ≥ чернозем неполноразвитый (62) ≥ коричневая карбонатная почва (58) > бурая лесная кислая почва (50). Для интерпретации полученного ряда был проведен корреляционный анализ между ИПБС почв и изменением биологических показателей. Установлено, что общая численность бактерий почв и обилие бактерий рода *Azotobacter* сильно коррелируют со значениями ИПБС (коэф-

фициент корреляции 0,89 и 0,85 соответственно). Чем выше показатели биологической активности (численность бактерий), тем, по-видимому, быстрее происходит разложение мазута, почва более устойчива к загрязнению. Также высокая корреляция отмечается между показателями $C_{орг}$ и рН (0,86 и 0,81 соответственно). От содержания $C_{орг}$ в почве зависят показатели биологической активности, поэтому наблюдается тесная корреляция между $C_{орг}$ и ИПБС почв. Что касается рН почв, то механизмов, объясняющих связь рН с устойчивостью к загрязнению мазутом в литературных данных нами не найдено. Поскольку все исследуемые почвы Крыма имеют один гранулометрический состав (исключение – коричневая выщелоченная красноцветная почва с глинистым гранулометрическим составом), то на различие в их устойчивости к загрязнению мазутом гранулометрический состав существенной роли не

оказывает. Таким образом, самым устойчивым типом почв Крыма к загрязнению мазутом является чернозем остаточно-карбонатный. Данная почва имеет высокую биологическую активность, способствующую более быстрому разложению мазута, показатель $pH = 7,8$ и $C_{орг} = 3,1$. Наименьшей устойчивостью обладает бурая лесная кислая почва. Это объясняется кислой реакцией среды ($pH = 5,3$) и небольшим содержанием органического вещества $C_{орг} = 1,4$, низ-

кой биологической активностью [Колесников и др., 2019а; Дауд и др., 2019]. Такая же тенденция по чувствительности чернозема остаточно-карбонатного и наименьшей чувствительности бурой лесной почвы была обнаружена ранее при анализе экотоксичности свинца, хрома, меди, никеля для почв Крыма [Колесников и др., 2019б]. Низкая устойчивость бурых лесных почв была также ранее установлена в [Duan et al., 2020; Dospatliev, Ivanova, 2018].

Таблица 5

Изменение интегрального показателя биологического состояния почв Крыма после загрязнения мазутом, % от контроля

Тип почв	Контроль	Концентрация мазута, %			Среднее значение
		1	5	10	
Чернозем остаточно-карбонатный	100	83	64	52	66
Чернозем слитой солонцеватый	100	79	63	48	63
Темно-каштановая солонцеватая	100	79	65	45	63
Коричневая карбонатная	100	79	59	37	58
Коричневая выщелоченная красноцветная	100	86	64	40	63
Бурая лесная кислая	100	67	50	34	50
Чернозем неполноразвитый	100	85	60	43	62

Проведенное исследование позволило определить предельно-допустимое остаточное содержание мазута (ПДОС_м) в почвах Крыма (табл. 6). На основе уравнений регрессии, отражающих зависимость ИПБС каждой исследованной почвы от содержания в ней мазута, были установлены концентрации мазута, при которых наблюдается сбой той или иной группы экологических функций, также степень ухудшения сельскохозяйственных функций. Классификация экосистемных функций почвы дана по Г.В. Добровольскому и Е.Д. Никитину (2006). Была использована установленная ранее [Kolesnikov et al., 2019] шкала: снижение ИПБС менее чем на 5% не приводит к нарушению экологических функций почвы, на 5–10% диагностирует нарушение информационных функций, на 10–25% – биохимических, физико-химических, химических и целостных, более чем на 25% – физических. В качестве ПДОС_м была выбрана та концентрация, при которой нарушаются экологические функции почвы. Соответственно, как видно из табл. 6, в черноземе остаточно-карбонатном ПДОС_м составляет 0,33%, в темно-каштановой солонцеватой и черноземе слитом солонцеватом – 0,30%, в коричневой карбонатной почве – 0,28%, в коричневой выщелоченной красноцветной почве – 0,35%, в черноземе неполноразвитом – 0,33%, в бурой лесной кислой почве – 0,21%. В работе М.В. Быковой (2019) проводится сравнение допустимых концентраций нефтепродук-

тов, в том числе со ссылкой на документ от 27 декабря 1993 г. «Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами»¹. В документе говорится, что допустимый уровень загрязнения варьирует от 0,1 до 0,2%. При повышении значения допустимого содержания нефти более 0,2% загрязнения уровень воздействия увеличивается. В нашем исследовании такому уровню загрязнения (0,1–0,2%) соответствует уровень нарушения почвой информационных функций, таких как передача сигнала о сезонных и других биологических процессах, регуляция численности, состава и структуры биоценоза [Добровольский, Никитин, 2006; Ashraf et al., 2014].

Экологически безопасные концентрации мазута для почв Крыма возможно применять для оценки вероятных антропогенных последствий при утечке мазута. Исследования почв этого региона необходимо продолжить, используя другие химические вещества, часто встречающиеся на этой территории (тяжелые металлы, металлоиды, неметаллы, антибиотики, пестициды, нефть, бензин, мазут, дизельное топливо, ароматические углеводороды). Акту-

¹ Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации (от 27 декабря 1993 г. № 04-25), Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству (от 27 декабря 1993 г. № 61-5678) «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами» [<https://docs.cntd.ru/document/9033369>].

ально исследовать различные концентрации этих веществ с целью определения пределов устойчивости почв. В дальнейшем перспективно изучать загрязнения почв с разными сроками экспозиции (от 10 до 365 дней), чтобы оценить процесс изменения биологических показателей в динамике.

ВЫВОДЫ

В результате лабораторного моделирования загрязнения мазутом основных почв Крыма установлено ухудшение биологических свойств почв при загрязнении. Негативное воздействие увеличивается при росте концентрации мазута в почве.

Был получен следующий ряд устойчивости почв Крыма к загрязнению мазутом: чернозем остаточно-карбонатный ≥ чернозем слитой солонцеватый = темно-каштановая солонцеватая почва = коричневая выщелоченная красноцветная почва ≥ чернозем неполноразвитый ≥ коричневая карбонатная почва > бурая лесная кислая почва. Наиболее устойчивой почвой к загрязнению мазутом является чернозем

остаточно-карбонатный, а наименее – бурая лесная кислая почва.

Проведенное исследование позволило определить предельно-допустимое остаточное содержание мазута (ПДОС_м) в почвах Крыма: в коричневой выщелоченной красноцветной почве составляет 0,35%, в черноземе остаточно-карбонатном и черноземе неполноразвитом – 0,33%, в темно-каштановой солонцеватой почве и черноземе слитом солонцеватом – 0,30%, в коричневой карбонатной почве – 0,28%, в бурой лесной кислой почве – 0,21%.

Использованные в работе показатели биологического состояния почв можно рекомендовать к широкому использованию в целях мониторинга, диагностики, оценки здоровья почв и нормирования загрязнения почв мазутом, а полученные ПДОС_м использовать при разработке региональных экологических нормативов содержания мазута в разных типах и подтипах почв Крыма с учетом их местных эколого-геохимических особенностей.

Таблица 6

Предельно-допустимое остаточное содержание мазута в почвах Крыма, %

Степень снижения интегрального показателя ¹	<5%	5–10%	10–25%	>25%
Нарушаемые экологические функции ²	–	Информационные	Химические, физико-химические, биохимические, целостные	Физические
Степень загрязнения почв	Не загрязненные	Слабозагрязненные	Среднезагрязненные	Сильнозагрязненные
Чернозем остаточно-карбонатный	<0,20	0,20–0,33	0,33 ³ –1,45	>1,45
Чернозем слитой солонцеватый	<0,19	0,19–0,30	0,30 –1,18	>1,18
Темно-каштановая солонцеватая почва	<0,19	0,19–0,30	0,30 –1,15	>1,15
Коричневая карбонатная почва	<0,19	0,19–0,28	0,28 –0,92	>0,92
Коричневая выщелоченная красноцветная почва	<0,24	0,24–0,35	0,35 –1,20	>1,20
Бурая лесная кислая почва	<0,14	0,14–0,21	0,21 –0,60	>0,60
Чернозем неполноразвитый	<0,22	0,22–0,33	0,33 –1,15	>1,15

Примечания. ¹ [Kolesnikov et al., 2019].
² [Добровольский, Никитин, 2006].
³ Жирным шрифтом выделены значения ПДОС_м.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») (№ СП-12-23-01), исследование выполнено в международной лаборатории «Здоровье почв» Южного федерального университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1122), проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по поддержке молодежной лаборатории в рамках межрегионального НОЦ Юга России (FENW-2024-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быкова М.В. Проблема нормирования при оценке уровня загрязнения почв нефтепродуктами // Вестник евразийской науки. 2019. № 11(6). С. 90.
- Булуктаев А.А. Фитотоксичность и ферментативная активность почв Калмыкии в условиях нефтяного загрязнения // Юг России: экология, развитие. 2017. № 12. С. 147–156. DOI: 10.18470/1992-1098-2017-4-147-156.
- Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д: Эверест, 2008. 276 с.
- Водяницкий Ю.Н., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Перспективные подходы к очистке почв и почвенно-грунтовых вод от углеводородов (обзор) // Почвоведение. 2016. № 6. С. 755–764. DOI: 10.7868/S0032180X16040158.
- Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Кузина А.А. и др. Изменение активности каталазы в почвах Крыма при загрязнении мазутом // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. №1 (217). С. 137–141. DOI: 10.18522/1026-2237-2023-1-137-141.
- Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе в 2022 году». Симферополь, 2023. 337 с.
- Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А. и др. Разработка региональных предельно допустимых концентраций нефти в почвах аридных экосистем Юга России // Экология и промышленность России. 2019. № 23. Вып. 9. С. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-9-66-71.
- Демченко Н.П., Полякова Н.Ю. Об антропогенных и экономических факторах экологического состояния Крыма // Экономика строительства и природопользования. 2020. № 2(75). С. 5–14. DOI: 10.37279/2519-4453-2020-2-5-14.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Наука, 2006. 362 с.
- Казеев К.Ш., Колесников С.И. Атлас почв Азово-Черноморского бассейна. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2015. 80 с.
- Калашиников А.С. Трасса А-291 «Таврида»: путь от идеи к реализации // Бюллетень государственной экспертизы. 2021. С. 69–72.
- Ковалева Е.И., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Реакция высших растений на уровень загрязнения почвы нефтью в вегетационном эксперименте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2022. № 3. С. 74–84.
- Ковалева Е.И., Яковлев А.С. Модель экологической регуляции нефтезагрязненных почв путем изменения некоторых биогеоценологических функций // Экология и промышленность России. 2018. № 11. С. 34–39.
- Колесников С.И., Азнаурян Д.К., Казеев К.Ш. и др. Биологические свойства почв юга России: устойчивость к нефтяному загрязнению // Экология. 2010. Т. 41. № 5. С. 357–364.
- Колесников С.И., Вернигорова Н.А., Кузина А.А. и др. Пределы устойчивости почв и экосистем Крыма к загрязнению тяжелыми металлами // Экология и промышленность России. 2019б. № 23. Вып. 10. С. 56–60. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-56-60.
- Колесников С.И., Дауд Р.М., Кузина А.А. и др. Региональные нормативы содержания мазута в засушливых почвах Юга России // Охрана окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2019а. №3(288). С. 25–29.
- Коптилов А. Трасса «Таврида» по-настоящему современна и красива // Дороги России. 2020. № 4(118). С. 6–23.
- Корицунова Т.Ю., Четвериков М.Д., Бакаева М.Д. и др. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяных загрязнений (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. № 55. Вып. 4. С. 338–349.
- Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В. и др. Экологически безопасные концентрации нефти в почвах Черноморского побережья Кавказ // Экология и промышленность России. 2021. № 25. Вып. 11. С. 61–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11-61-65.
- Околелова А.А., Желтобрюхов В.Ф., Тарасов А.П. и др. Особенности регулирования нефтепродуктов в почвенном покрове // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-2. С. 315–319.
- Практикум по почвоведению / И.С. Кауричев, Н.Н. Панов, М.В. Стратонович [и др.]; под ред. И.С. Кауричева. М.: Колос, 1986. 336 с.
- Сухачева Е.Ю., Ревина Я.С. Цифровая почвенная карта южного берега Крыма // Почвоведение. 2020. № 4. С. 389–397. DOI: 10.31857/S0032180X20040140.
- Andrews N., Bennett N.J., Le Billon P. et al. Oil, Fisheries and Coastal Communities: A Review of Impacts on the Environment, Livelihoods, Space, and Governance, *Energy Research & Social Science*, 2021, no. 75, 102009, DOI: 10.1016/j.erss.2021.102009.
- Ashraf M.A., Maah M.J., Yusoff I. Soil Contamination, Risk Assessment and Remediation, *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, Chapter 1, 2014, DOI: 10.5772/57287.
- Bolade O., Adeniyi K., Williams A. et al. Remediation and optimization of petroleum hydrocarbons degradation in contaminated water using alkaline activated persulphate, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, no. 9, p. 105801, DOI: 10.1016/j.jece.2021.105801.
- Dindar E., Sagban F.O.T., Baskaya H.S. Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2015, vol. 105, p. 268–275, DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.09.011.
- Dhaka A., Chattopadhyay P. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills, *Journal*

- of environmental management, 2021, vol. 288, 112428, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112428.
- Dospatliev L.K., Ivanova M. Correlation between Cambisols soil characteristics and lead content in wild edible mushrooms (*Cantharellus cibarius*, *Tricholoma equestre*, *Craterellus cornucopioides*), *Bulgarian Chemical Communications*, 2018, no. 50, p. 32–37.
- Duan C., Liu Y., Zhang H. et al. Cadmium Pollution Impact on the Bacterial Community of Haplic Cambisols in Northeast China and Inference of Resistant Genera, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, p. 1–15, DOI: 10.1007/s42729-020-00201-5.
- Elum Z.A., Mopipi K., Henri-Ukoha A. Oil exploitation and its socioeconomic effects on the Niger Delta region of Nigeria, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, p. 12880–12889, DOI: 10.1007/s11356-016-6864-1.
- García V.J., Márquez C.O., Cedeño A.R. et al. Assessing Bioremediation of Soils Polluted with Fuel Oil 6 by Means of Diffuse Reflectance Spectroscopy, *Resources*, 2019, no. 8(1), p. 36, DOI: 10.3390/resources8010036.
- Gordon G., Stavi I., Shavit U. et al. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region, *Geoderma*, 2018, vol. 312, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.
- Haider F., Liqun C., Coulter J. et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, no. 211, p. 111887, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.
- Hewelke E., Szatylowicz J., Hewelke P. et al. The impact of diesel oil pollution on the hydrophobicity and CO₂ efflux of forest soils, *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, no. 229, p. 51–61, DOI: 10.1007/s11270-018-3720-6.
- IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition published in 2022 by the International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.
- Jayasinghe G.Y., Perera T.A.N.T., Bandara W.B.M.A.C. et al. A Review of Soil Injection of Liquid Organic Wastes: Potentials and Challenges, *Environ. Process.*, 2022, vol. 9, p. 37, DOI: 10.1007/s40710-022-00587-7.
- Karkush M.O., Abdul Kareem M.S. Impacts of petroleum fuel oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils, *Indian Journal of Engineering*, 2018, vol. 15, p. 228–237.
- Klemz A.C., Damas M.S.P., Weschenfelder S.E. et al. Treatment of real oilfield produced water by liquid-liquid extraction and efficient phase separation in a mixer-settler based on phase inversion, *Chemical Engineering Journal*, 2020, DOI: 10.1016/j.cej. 2020.127926.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, no. 191, p. 544, DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3.
- Li Y., Li C., Xin Y. et al. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2022, no. 246, p. 114129, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114129.
- Marin-Garcia D.C., Adams R.H., Hernandez-Barajas R. Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2016, no. 13, p. 55–64, DOI: 10.1007/s13762-015-0838-6.
- Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. Assessment of ecological state of soils in southern Russia by petroleum hydrocarbons pollution after bioremediation, *Environmental Processes*, 2022, no. 9, p. 49, DOI: 10.1007/s40710-022-00604-9.
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Impact of ameliorants on the biological condition of oil-contaminated black soil, *Soil and Environment*, 2019, no. 38(2), p. 170–180, DOI: 10.25252/SE/19/101872.
- Ofori S.A., Cobbina S.J., Imoro A.Z. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollution and its Associated Human Health Risks in the Niger Delta Region of Nigeria: a Systematic Review, *Environ. Process.*, 2021, vol. 8, p. 455–482, DOI: 10.1007/s40710-021-00507-1.
- Salam M.M.A., Ruhui W., Sinkkonen A. et al. Effects of Contaminated Soil on the Survival and Growth Performance of European (*Populus tremula* L.) and Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) Clones Based on Stand Density, *Plants (Basel)*, 2022, vol. 28, 11(15), p. 1970, DOI: 10.3390/plants11151970.
- Shah S.J., Shroff A.V., Patel J.V. et al. Stabilization of fuel oil contaminated soil – A case study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, vol. 21, p. 415–427, DOI: 10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.
- Shukry W.M., Al-Hawas G.H.S., Al-Moaikal R.M.S. et al. Effect of petroleum crude oil on mineral nutrient elements, soil properties and bacterial biomass of the rhizosphere of jojoba, *British journal of environment and climate change*, 2013, vol. 3, iss. 1, p. 103.
- Zhang B., Matchinski E.J., Chen B. et al. Marine Oil Spills, Oil Pollution, Sources, and Effects, *World Seas: An Environmental Evaluation*, C. Sheppard (ed.), Elsevier, 2019, p. 391–406, DOI: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00024-3.

Поступила в редакцию 20.10.2023

После доработки 12.01.2024

Принята к публикации 24.04.2024

LABORATORY MODELING OF ENVIRONMENTALLY SAFE CONCENTRATIONS OF FUEL OIL IN THE SOILS OF CRIMEA

A.A. Kuzina¹, T.V. Minnikova², V.G. Gaivoronsky³, S.Yu. Revina⁴, S.I. Kolesnikov⁵

^{1, 2, 4, 5} Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology named after D.I. Ivanovsky,
Department of Ecology and Environmental Management

³ Southern Federal University, Academy of Physical Culture and Sports,
Department of Theoretical Foundations of Physical Training

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: nyuta_1990@mail.ru

² Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: loko261008@yandex.ru

³ Associate Professor, Ph.D. in Biology; e-mail: vggayvoronskiy@sfedu.ru

⁴ Master student; e-mail: soffyy.soffy@mail.ru

⁵ Head of the department, D.Sc. in Agriculture; e-mail: kolesnikov1970@list.ru

There are unique types and subtypes of soils within the territory of the Crimean Peninsula. The growing tourist pressure on the region requires the increasing productivity of all industries, including oil refining. All this increases the risk of spills and leaks of oil and petroleum products during their transportation and pumping. However there is a large gap in the field of regulation of soil pollution with petroleum products (gross content), i. e. the absence of maximum permissible concentrations in the regulatory framework of the Russian Federation. To predict possible negative consequences of environmental pollution with oil and oil products, it is necessary to develop regional environmentally safe concentrations of oil and oil products, with due consideration of the local ecological and geochemical characteristics of soil types. The purpose of the study is to find the environmentally safe content of fuel oil in the soils of Crimea. Fuel oil contamination (1, 5 and 10% of the soil mass) was simulated in laboratory conditions. The study examined 7 types of Crimean soils, namely residual carbonate chernozem, drained solonetzic chernozem, dark chestnut solonetzic soil, brown carbonate soil, brown leached red soil, brown forest acidic soil and underdeveloped chernozem. After 30 days of the model experiment, the most informative biological indicators were determined in soil samples, i.e. biochemical (activity of catalase and dehydrogenases), microbiological (total number of soil bacteria and *Azotobacter* sp. abundance) and phytotoxic (root length) indicators. It was established that fuel oil pollution had a negative impact on the biological properties of studied soils. The following series of soil resistance to fuel oil pollution has been obtained: residual-carbonate chernozem $\geq$ solonetzic drained chernozem = dark chestnut alkali = brown leached red-colored $\geq$ underdeveloped chernozem $\geq$ brown carbonate soil > brown forest acidic soil. The values of the maximum permissible levels of residual fuel oil content (MRLC) in the soils of Crimea were obtained: 0,33% in residual carbonate chernozem, 0,30% in dark chestnut solonetzic soil and solonetzic chernozem, 0,28% in brown carbonate soil, 0,35% in brown leached red soil, 0,33% in underdeveloped chernozem, 0,21% in brown forest acidic soil. The results of the study could be used in biodiagnostics of the ecological state and health of soils polluted with fuel oil.

Keywords: pollution, modeling, phytotoxicity, enzymatic activity, microbiological indicators

Acknowledgments. The study was carried out at the Soil Health international laboratory of the Southern Federal University and financially supported by the Program of Strategic Academic Leadership at the Southern Federal University (Priority-2030, no. CII-12-23-01), the RF Ministry of Science and Higher Education (Agreement no. 075-15-2022-1122) and the project of the RF Ministry of Science and Higher Education on the support of the youth laboratory through the interregional Scientific and Education Center of the South of Russia (FENW-2024-0001).

REFERENCES

- Andrews N., Bennett N.J., Le Billon P. et al. Oil, Fisheries and Coastal Communities: A Review of Impacts on the Environment, Livelihoods, Space, and Governance, *Energy Research & Social Science*, 2021, vol. 75, p. 102009, DOI: 10.1016/j.erss.2021.102009.
- Ashraf M.A., Maah M.J., Yusoff I. Soil Contamination, Risk Assessment and Remediation, *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, Edited by Maria C. Hernandez-Soriano, Chapter 1, IntechOpen, 2014, 920 p. DOI: 10.5772/57287.
- Bolade O., Adeniyi K., Williams A., Benson N. Remediation and optimization of petroleum hydrocarbons degradation in contaminated water using alkaline activated persulphate, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, p. 105801, DOI: 10.1016/j.jece.2021.105801.
- Buluktaev A.A. Fitotoksichnost i fermentativnaya aktivnost pochv Kalmykii v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya [Phytotoxicity and Enzymatic Activity of Kalmykian Soils under Oil Pollution], *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitiye*, 2017, no. 12, p. 147–156, DOI: 10.18470/1992-1098-2017-4-147-156. (In Russian)

- Bykova M.V. Problema normirovaniya pri otsenke urovnya zagryazneniya pochv nefteproduktami [The problem of rationing in assessing the level of soil pollution by oil products], *Vestnik Evrazijskoj nauki*, 2019, vol. 11(6), p. 90. (In Russian)
- Daud R.M., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A. et al. Razrabotka regionalnykh predelno dopustimyykh kontsentratsiy nefi v pochvakh aridnykh ekosistem Yuga Rossii [Development of regional maximum permissible concentrations of oil in the soils of arid ecosystems in the South of Russia], *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23(9), p. 66–71, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-9-66-71. (In Russian)
- Demchenko N.P., Polyakova N.Yu. Ob antropogennykh i ekonomicheskikh faktorakh ekologicheskogo sostoyaniya Kryma [On anthropogenic and economic factors of the ecological state of the Crimea], *Ekonomika stroitelstva i prirodopolzovaniya*, 2020, vol. 2(75), p. 5–14, DOI: 10.37279/2519-4453-2020-2-5-14. (In Russian)
- Dhaka A., Chattopadhyay P.A. Review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills, *Journal of environmental management*, 2021, vol. 288, 112428, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112428.
- Dindar E., Sagban F.O.T., Baskaya H.S. Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2015, vol. 105, p. 268–275, DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.09.011.
- Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv* [Soil ecology. The doctrine of the ecological functions of soils], Moscow, Nauka Publ., 2006, 362 p. (In Russian)
- Dospatliev L.K., Ivanova M. Correlation between Cambisols soil characteristics and lead content in wild edible mushrooms (*Cantharellus cibarius*, *Tricholoma equestre*, *Craterellus cornucopioides*). *Bulgarian Chemical Communications*, 2018, vol. 50, p. 32–37.
- Duan C., Liu Y., Zhang H. et al. Cadmium Pollution Impact on the Bacterial Community of Haplic Cambisols in Northeast China and Inference of Resistant Genera, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, p. 1–15, DOI: 10.1007/s42729-020-00201-5.
- Elum Z.A., Mopipi K., Henri-Ukoha A. Oil exploitation and its socioeconomic effects on the Niger Delta region of Nigeria, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, p. 12880–12889, DOI: 10.1007/s11356-016-6864-1.
- Gaivoronsky V.G., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh. Izmenenie aktivnosti katalazy v pochvakh Kryma pri zagryaznenii mazutom [Changes in the activity of catalase in the soils of the Crimea under contamination with fuel oil], *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenij, Severo-Kavkazskij region, Estestvennye nauki*, 2023, vol. 1(217), p. 137–141, DOI: 10.18522/1026-2237-2023-1-137-141. (In Russian)
- García V.J., Márquez C.O., Cedeño A.R. et al. Assessing Bioremediation of Soils Polluted with Fuel Oil 6 by Means of Diffuse Reflectance Spectroscopy, *Resources*, 2019, vol. 8(1), p. 36, DOI: 10.3390/resources8010036.
- Gordon G., Stavi I., Shavit U. et al. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region, *Geoderma*, 2018, vol. 312, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.
- Gosudarstvennyj doklad O sostoyanii sanitarno-epidemičeskogo blagopoluchiya naseleniya v Respublike Krym i gorode federalnogo znacheniya Sevastopole v 2020 g. [State report “On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Republic of Crimea and the city of Federal significance Sevastopol in 2022”], Simferopol, 2023, 337 p. (In Russian)
- Haider F., Liqun C., Coulter J. et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 211, p. 111887, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.
- Hewelke E., Szatylowicz J., Hewelke P. et al. The impact of diesel oil pollution on the hydrophobicity and CO₂ efflux of forest soils, *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, vol. 229, p. 51–61, DOI: 10.1007/s11270-018-3720-6.
- IUSS Working Group, *World Reference Base for Soil Resources*, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition published in 2022 by the International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.
- Jayasinghe G.Y., Perera T.A.N.T., Bandara W.B.M.A.C. et al. A Review of Soil Injection of Liquid Organic Wastes: Potentials and Challenges, *Environ. Process.*, 2022, vol. 9, p. 37, DOI: 10.1007/s40710-022-00587-7.
- Kalashnikov A.S. [Highway A-291 “Tavrida”: the path from idea to implementation], *Byulleten gosudarstvennoj ekspertizy* [Bulletin of state expert review], 2021, p. 69–72. (In Russian)
- Karkush M.O., Abdul Kareem M.S. Impacts of petroleum fuel oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils, *Indian Journal of Engineering*, 2018, vol. 15, p. 228–237.
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Atlas pochv Azovo-Chernomorskogo bassejna* [Atlas of soils of the Azov-Black Sea basin], Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 2015, p. 80. (In Russian)
- Klemz A.C., Damas M.S.P., Weschenfelder S.E. et al. Treatment of real oilfield produced water by liquid-liquid extraction and efficient phase separation in a mixer-settler based on phase inversion, *Chemical Engineering Journal*, 2020, DOI: 10.1016/j.cej. 2020.127926.
- Kolesnikov S.I., Aznaurian D.K., Kazeev K.Sh. et al. Biological Properties of South Russian Soils: Tolerance to Oil Pollution, *Russian Journal of Ecology*, 2010, vol. 41, no. 5, p. 398–404.
- Kolesnikov S.I., Daud R.M., Kuzina A.A. et al. Regionalnye normativy soderzhaniya mazuta v zasushlivykh pochvakh Rossii [Regional standards for the content of fuel oil in arid soils of the South of Russia], *Okhrana okruzhayushej sredy v neftegazovom komplekse*, 2019a, vol. 3(288), p. 25–29. (In Russian)
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, p. 544, DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3.
- Kolesnikov S.I., Vernigorova N.A., Kuzina A.A. et al. Predely ustojchivosti pochv i ekosistem Kryma k zagryazneniyu tyazhelymi metallami [Limits of resistance of soils and ecosystems of the Crimea to heavy metal pollution], *Ecology and Industry of Russia*, 2019b, vol. 23, no. 10, p. 56–60, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-56-60. (In Russian)
- Kopotilov A. Trassa “Tavrida” po-nastoyaschemu sovremenna i krasiva [The Tavrida track is truly modern and beautiful], *Dorogi Rossii*, 2020, vol. 4(118), p. 6–23. (In Russian)

- Korshunova T.Yu., Chetverikov M.D., Bakaeva M.D. et al. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review), *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 344–353.
- Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Shoba S.A. Reaktsiya visshikh rasteniy na uroven zagryazneniya pochvy neftyu v vegetatsionnom eksperimente [The reaction of higher plants to the oil contamination of soils in the pot experiment], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2022, no 3, p. 74–84. (In Russian)
- Kovaleva E.I., Yakovlev A.S. Model ekologicheskoy regulatsii neftezagryaznennykh pochv putem izmeneniya nekotorykh biogeotsenoticheskikh funktsiy [Model of ecological regulation of oil-contaminated soils by changing some biogeocenotic functions], *Ecology and industry of Russia*, 2018, vol. 11, p. 34–39. (In Russian)
- Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V. et al. Ekologicheski bezopasnye kontsentratsii nefti v pochvakh Chernomorskogo poberezhya Kavkaza [Ecologically safe concentrations of oil in the soils of the Black Sea coast of the Caucasus], *Ecology and industry of Russia*, 2021, vol. 25, iss. 11, p. 61–65, DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11-61-65. (In Russian)
- Li Y., Li C., Xin Y. et al. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2022, vol. 246, p. 114129, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114129.
- Marin-Garcia D.C., Adams R.H., Hernandez-Barajas R. Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 13, p. 55–64, DOI: 10.1007/s13762-015-0838-6.
- Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. Assessment of ecological state of soils in southern Russia by petroleum hydrocarbons pollution after bioremediation, *Environmental Processes*, 2022, vol. 9, p. 49, DOI: 10.1007/s40710-022-00604-9.
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Impact of ameliorants on the biological condition of oil-contaminated black soil, *Soil and Environment*, 2019, vol. 38(2), p. 170–180, DOI: 10.25252/SE/19/101872.
- Ofori S.A., Cobbina S.J., Imoro A.Z. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollution and its Associated Human Health Risks in the Niger Delta Region of Nigeria: a Systematic Review, *Environ. Process.*, 2021, vol. 8, p. 455–482, DOI: 10.1007/s40710-021-00507-1.
- Okolelova A.A., Zheltobryukhov V.F., Tarasov A.P. et al. Osobennosti regulirovaniya nefteproduktov v pochvennom pokrove [Features rationing of petroleum products in soil cover], *Fundamental Research*, 2015, vol. 12-2, p. 315–319. (In Russian)
- Praktikum po pochvovedeniyu* [Soil science practice]. S. Kaurichev, N.N. Panov, M.V. Stratonovich [et al.], edited by I.S. Kaurichev, Moscow, Kolos Publ., 1986, 336 p. (In Russian)
- Salam M.M.A., Ruhui W., Sinkkonen A. et al. Effects of Contaminated Soil on the Survival and Growth Performance of European (*Populus tremula* L.) and Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) Clones Based on Stand Density, *Plants (Basel)*, 2022, vol. 28, 11(15), p. 1970, DOI: 10.3390/plants11151970.
- Shah S.J., Shroff A.V., Patel J.V. et al. Stabilization of fuel oil contaminated soil – A case study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, vol. 21, p. 415–427, DOI: 10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.
- Shukry W.M., Al-Hawas G.H.S., Al-Moaikal R.M.S. et al. Effect of petroleum crude oil on mineral nutrient elements, soil properties and bacterial biomass of the rhizosphere of jojoba, *British journal of environment and climate change*, 2013, vol. 3, iss. 1, p. 103.
- Sukhacheva E.Yu., Revina Ya.S. Medium-scale soil map of the Crimea southern coast, *Eurasian Soil science*, 2020, no. 4, p. 397–404, DOI: 10.31857/S0032180X20040140.
- Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Pochvy Yuga Rossii* [Soils of the South of Russia], Rostov-on-Don, Everest Publishing House, 2008, p. 276. (In Russian)
- Vodyanitskii Y.N., Trofimov S.Y., Shoba S.A. Promising approaches to the purification of soils and groundwater from hydrocarbons (a review), *Eurasian Soil Sci.*, 2016, vol 49, no. 6, p. 705–713.
- Zhang B., Matchinski E.J., Chen B. et al. Marine Oil Spills, Oil Pollution, Sources, and Effects, C. Sheppard (ed.), *World Seas: An Environmental Evaluation*, Elsevier, 2019, p. 391–406, DOI: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00024-3.

Received 20.10.2023

Revised 12.01.2024

Accepted 24.04.2024