

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАТУРАЛЬНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИЯ

*А.А. Булуктаев¹, А.Б. Адьянова¹, Н.В. Джимбеев¹, Р.А. Мукабенова¹, С.С. Манджиева¹, Г.К. Васильева²

¹Калмыцкий научный центр Российской академии наук, Россия, Элиста

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, Россия, Пущино
e-mail: *buluktaev89@mail.ru

Цель исследования заключалась в оценке степени изменения качества трех типов почв Калмыкии, загрязненных разными дозами нефти, после их обработки путем удаления избытка нефти из почвы с помощью отходов овцеводства (обножка овец) с последующей биоремедиацией почвы с использованием разных фракций опилок лиственных пород деревьев. Установлено, что загрязнение почв Калмыкии нефтью в дозах 2,5; 5,0 и 10,0 % приводит к резкому нарушению их биологических свойств. Применение органических сорбентов для улучшения биоремедиации почв показало удовлетворительные результаты при уровне загрязнения почв 25 г/кг, при котором наблюдалось снижение остаточного содержания нефтепродуктов до 5-8 г/кг, т.е. до минимально допустимого уровня (<10 г/кг). При этом наблюдалось практически полное восстановление интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) почв. С другой стороны, обработка почв, загрязненных средней и высокой дозами нефти (50 и 100 г/кг), также дала положительные результаты как по ускорению разложения нефтепродуктов в почвах, так и по повышению их индекса ИПБС.

Ключевые слова: обножка, опилки, фитотоксичность, ферментативная активность.

Введение

Широкое использование нефти и нефтепродуктов привело к тому, что они стали приоритетными загрязнителями почвы и сопредельных сред. Поступление углеводородов нефти в почву происходит при добыче, транспортировке, переработке нефти и использовании нефтепродуктов из-за нарушения или несовершенства технологии добычи нефти, плохого ее качества, износа оборудования, различных аварийных ситуаций и т.д. На территории предприятий нефтехимии и нефтебаз также имеет место загрязнение почвенного слоя нефтепродуктами на значительную глубину, а в подпочвенных горизонтах образуются линзы нефтепродуктов, которые с грунтовыми водами могут мигрировать на большие расстояния. Следует также учитывать, что нефть и нефтепродукты, скопившиеся в грунтовых отложениях, могут оказывать негативное воздействие на прочностные характеристики грунтов [1]. Поэтому почвогрунты Калмыкии, которые сформировались в условиях нефтяного загрязнения, засушливого климата и засоленности почвообразующих пород, требуют всестороннего исследования с целью разработки и внедрения технологий ремедиации.

На сегодняшний день существует множество работ, посвященных различным способам и методам очистки почв от загрязнения нефтью и нефтепродуктами. Перспективными сорбентами для ликвидации аварийных разливов нефти являются природные органические и органоминеральные сорбенты, так как они безопасны для окружающей среды и легкодоступны, т.е. не требуют специальных процедур для их производства. К таким сорбентам, например, относятся отходы сельского хозяйства, которые получили большую популярность в последнее время [2-5].

Известно применение сорбентов, получаемых из растительного сырья на основе шелухи овса и риса, древесной щепы и опилок, плодовой оболочки подсолнечника, модифицированного торфа, высушенных зернопродуктов, лузги гречихи, камышовой сечки. В изобретении А.В. Александровой и соавторов разработан способ получения сорбента из растительного сырья на основе оболочки семян подсолнечника путем их экстракции при температуре 45-55 °С органическим растворителем [6]. В работе Д.О. Очировой и Е.А. Зеленской описано внесение в нефтезагрязненную почву сорбента, на основе рисовой шелухи, количество которого зависело от степени загрязнения почвы, также в обработанную почву вносили полуперепревший навоз [7]. Органический сорбент – торф, обладает хорошими сорбционными свойствами, кроме того, он обогащен активной углеводородно-окисляющей микрофлорой. Так в работе Н.А. Антроповой предложено использование сорбентов на основе верховых слаборазложившихся торфов Томской области для ликвидации нефтяных разливов [8].

Древесные опилки хорошо впитывают нефтепродукт на твердой поверхности, в качестве сорбента их можно использовать как дополнительный метод при аварийных разливах нефтепродуктов. А.В. Горбаевым рассмотрена возможность использования в качестве сорбента древесных опилок из сосны для очистки почв от нефтяных загрязнений. Автором установлено существенное снижение негативного воздействия на природную среду нефти [9].

М.Д. Назарько и др. разработан сорбент на основе плодовой оболочки семян подсолнечника, производимый из дешевого и легкодоступного сырья – крупнотоннажного отхода масложировой промышленности, нетоксичен, улучшающий структурные характеристики почвы, полностью разлагающийся микроорганизмами почвы [10].

В работах исследователей Пущинского научного центра показана технология сорбционно-биологической очистки почвы от органических загрязнителей, основанная на использовании активированного угля и других натуральных веществ, которые способствуют значительному расширению возможностей биоремедиации почв [11-13].

Одним из лучших природных органических сорбентов является шерсть (по своей нефтеемкости она сопоставима с модифицированным торфом и может впитать 8-10 кг нефти на 1 кг своей массы) при этом ее природная упругость позволяет отжать большую часть легких фракций нефти. Однако после нескольких таких отжимов шерсть превращается в битуминизированный войлок и становится непригодной для использования [14]. Еще одним легкодоступным органическим сорбентом являются отходы от производства льна, в настоящее время идут работы по разработке технологии получения из льна нефтяного сорбента [15].

К неорганическим сорбентам относятся глины различных видов, диатомитовые породы, песок, цеолиты, туфы, пемза и т.п. Именно глина и диатомиты составляют большую часть товара на рынке сорбентов в силу их низкой стоимости и возможности крупнотоннажного производства. Однако качество неорганических сорбентов совершенно неприемлемо с точки зрения экологии. Прежде всего, они имеют очень низкую емкость (70-150 % по нефти и совершенно не удерживают легкие фракции типа бензина, керосина, дизельного топлива). При ликвидации разливов нефти на воде неорганические сорбенты тонут вместе с нефтью, не решая проблемы очистки воды от загрязнений. Одним из способов очистки почв от нефтяных загрязнений является обработка нефтезагрязненных почв известью для закисленных почв, а сильнощелочных – гипсом [16]. В работе В. И. Быкова предложен способ очистки загрязненного грунта сорбентом глауконитом (глинистый минерал переменного состава, в котором катионы находятся в легко извлекаемой форме) и бактериальным препаратом [17].

В предыдущей работе нами было установлено положительное действие отходов от стрижки овец (обножки), глиногипса и минеральных удобрений на свойства нефтезагрязненных светло-каштановых почв Республики Калмыкия (солевой состав,

содержание биофильных элементов и фитотоксичность) [18]. Однако для более детального изучения метода очистки загрязненных почв органическими сорбентами и минеральными удобрениями необходимо изучить их действие на различные типы и подтипы загрязненных почв. Цель данного исследования заключалась в оценке изменения качества трех типов почв Калмыкии, загрязненных разными дозами нефти, после проведения мероприятий по их очистке путем удаления избытка нефти из почвы с помощью отходов овцеводства (обножка овец породы меринос после весенней стрижки) и последующей биоремедиации почв с использованием разных фракций опилок лиственных пород деревьев на фоне внесения минеральных удобрений, увлажнения и рыхления почвы.

Материалы и методы

Эксперимент проводили на образцах 3-х типов почв Калмыкии (бурая полупустынная, светло-каштановая и чернозем южный), основные характеристики которых приведены в таблице 1.

Эксперимент поставлен в отделе комплексного мониторинга и информационных технологий КалМНЦ РАН. В качестве сорбентов при проведении биоремедиации использовали обножку овец породы меринос, оставшейся после весенней стрижки, а также опилки лиственных пород деревьев размером от 2 до 12 мм. Перед экспериментом обножка была очищена, промыта и высушена. В качестве источника основных биофильных элементов использовали минеральные удобрения: аммиачную селитру, простой суперфосфат и сульфат калия.

Таблица 1 – Химические, физико-химические и биологические свойства исследуемых почв Калмыкии

Почва	Шифр	Гранулометрический состав по Качинскому	Содержание гумуса, %	pH _v	Общий N, %	P ₂ O ₅ K ₂ O		Активность каталазы, мл O ₂ /г
						мг/100 г		
Буряя полупустынная	БП	Супесчаная	1,0	8,4	0,11	1,74	25,3	2,36
Светло-каштановая	СК	Среднесуглинистая	1,5	8,7	0,15	3,58	36,1	7,13
Чернозем южный	ЧЮ	Тяжелосуглинистая	3,9	8,9	0,28	6,00	44,2	12,73

Эксперименты проводили параллельно со всеми 3 типами почв в соответствии со схемой, приведенной в таблице 2. При этом, все образцы почвы массой 5 кг каждый помещали в пластиковые сосуды на 15 л. Почву во всех образцах (кроме чистого контроля) загрязняли нефтью в концентрациях 25, 50 или 100 г/кг (на с.в.). Параллельно с опытными образцами с загрязненной почвой (Биорем) закладывали вариант с чистой почвой (ЧК), а также варианты с загрязненной контрольной почвой (К), в которую вносили аналогичные дозы нефти, но не вносили никакие добавки и почву не рыхлили, а только увлажняли по мере необходимости.

В обрабатываемые образцы почвы (Биорем) через 1 сутки после внесения нефти вносили обножку: по 100, 110 или 125 г на сосуд при уровнях загрязнения 25, 50 и 100 г/кг, соответственно. Дозу обножки рассчитывали в соответствии с известными данными о том, что 1 кг шерсти может впитать 10 кг нефти [14]. Метод установления массы обножки подробно описан в работе [19]. Затем почву тщательно перемешивали, добавляли в каждый сосуд по 500 мл воды и выдерживали при комнатной температуре в течение суток. Затем шерсть с впитавшейся нефтью механически удаляли из почвы, а ее доочистку от оставшихся нефтепродуктов проводили методом сорбционной биоремедиации. Для этого во все сосуды с загрязненной почвой вносили опилки в дозе 100 г/сосуд (2 %) и минеральные удобрения в

виде аммиачной селитры, суперфосфата и сульфата калия – по 0,3 г/кг каждого. Все почвенные образцы инкубировали при комнатной температуре в течение 1 месяца, при этом почву периодически рыхлили (2 раза в неделю) и увлажняли, не давая ей пересыхать. Для увлажнения использовали воду, пропущенную через систему обратного осмоса с минерализатором.

Таблица 2 – Схема закладки экспериментов и обработки образцов для каждого типа почв

Вариант	Шифр	Доза нефти, г/кг	Доза обножки, г/сосуд	Доза опилок, %	Суммарная доза минеральных удобрений, г/кг	Рыхление	Увлажнение
Чистый контроль	ЧК	-	-	-	-	-	+
Загрязненная контрольная почва	К	25	-	-	-	-	+
		50					
		100					
Загрязненная обработанная почва	Биорем	25	100	2.0	0.9	+	+
		50	110				
		100	125				

Все варианты лабораторных экспериментов закладывали в трех повторностях, а при проведении биотестирования также использовали образцы в трехкратной повторности.

Степень очистки почвы оценивали по снижению суммарного содержания нефтепродуктов и фитотоксичности почв, а также по изменению их ферментативной активности.

Фитотоксичность почв оценивали по изменению показателей прорастания семян (всхожесть) и интенсивности роста двухнедельных проростков (длина корней и зеленых проростков, суммарная фитомасса проростков) в соответствии с ГОСТ 33061-2014, 2015. В качестве тест-объекта использовали редис (*Raphanus sativus* L.) сорта «Рубин».

Для этого через 1 месяц после начала обработки все сосуды засеивали семенами (по 3 г/сосуд) и инкубировали в климатокамере при температуре 22-28 °С и освещенности 8 ч./сутки, поддерживая влажность почвы в пределах 60-70 % от предельной влагоемкости. Через 2 недели после посева проростки редиса вынимали, измеряли длину побегов, корней и сухой вес суммарной фитомассы.

Для определения всхожести семян редиса, перед посевом тест-растений почву в сосудах перемешивали и отбирали почвенные образцы, которые помещали в чашки Петри диаметром 10 см (по 100 г/сосуд). В каждую чашку высевали по 20 семян редиса и инкубировали в комнатных условиях, по мере необходимости почву увлажняли, не допуская пересыхания. Через 7 сут. подсчитывали число проросших семян.

Для проведения дальнейших анализов после удаления проростков редиса почву в сосудах тщательно перемешивали и отбирали усредненные образцы, в которых определяли содержание нефтепродуктов и ферментативную активность почв.

Содержание нефтепродуктов в почве определяли гравиметрическим методом путем экстракции нефтепродуктов из почв хлороформом и гексаном (ПНД Ф 16.1.41-04, 2004).

О **ферментативной активности почв** судили по активности каталазы, уреазы, инвертазы и фосфатазы. Ферментативную активность почв определяли в оптимальных температурных условиях, при естественной рН почвы, как описано в [20]. Активность каталазы, уреазы, инвертазы и фосфатазы определяли в соответствии с методами, описанными в [21]. Повторность проведения анализов трехкратная.

Для объединения биологических показателей почв использовали метод определения интегрального показателя биологического состояния почв (ИПБС), предложенный С.И. Колесниковым с соавт. [22], который позволяет оценить изменение совокупности

биологических показателей. Для этого значение каждого из показателей в чистом контроле принималось за 100 %, а остальные величины, полученные в разных вариантах опыта, рассчитывались в процентах по отношению к этой величине, после чего значения разных показателей суммировались. Величины ИПБС рассчитывались по следующим показателям: всхожести семян редиса, длине корней его проростков, активности каталазы, уреазы, инвертазы и фосфатазы.

Результаты и обсуждение

Результаты снижения концентрации нефтепродуктов в трех почвах, загрязненных нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг, очищенных путем извлечения на 1-м этапе с помощью обножки с последующей обработкой методом сорбционной биоремедиации на 2-м этапе в сравнении с необработанным контролем представлены на рисунке 1.

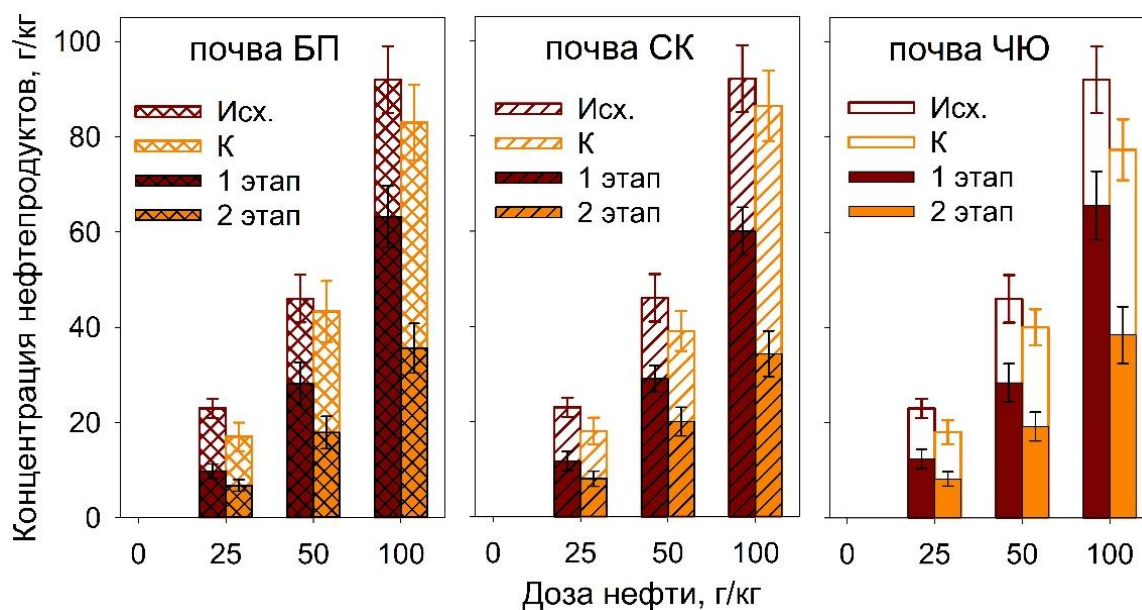


Рисунок 1 – Снижение содержания нефтепродуктов в 3-х типах почв Калмыкии (БП, СК и ЧЮ), загрязненных тремя дозами нефти (25, 50 и 100 г/кг), после ее частичного удаления с помощью обножки (1 этап) и через 1,5 месяца после начала обработки методом сорбционной биоремедиации (2 этап) в сравнении с контролем без обработки (К)

Обработка всех нефтезагрязненных почв Калмыкии на первом этапе очистки после извлечения обножки с впитавшейся нефтью обеспечила снижение суммарного содержания нефтепродуктов на 46-57, 37-39 и 29-35 %, соответственно, при слабом, среднем и высоком уровнях загрязнения. На 2-м этапе, через 1,5 месяца после начала сорбционной биоремедиации содержание нефтепродуктов в этих почвах дополнительно снизилось еще на 31-34, 31-36 и 42-44 % от исходного, соответственно. В результате, суммарное содержание нефтепродуктов снизилось, соответственно, на 64-70, 57-61 и 58-63 % от исходного и достигло уровня, соответственно, 6,8-8,2, 27,9-20,0 и 34,2-38,4 г/кг. За тот же период снижение концентрации УВН в необрабатываемых контрольных почвах снизилось, соответственно, на 25-27, 6-13 и 5-12 %.

Результаты сравнения фитотоксичности почв, измеренной по всхожести семян и показателям роста 2-х-недельных проростков редиса через 1 месяц после начала обработки, приведены на рисунке 2.

Для более гумусированных почв ЧЮ и СК разница между разными способами определения фитотоксичности была статистически недостоверной, тогда как для слабо гумусированной БП почвы наиболее чувствительным оказался показатель фитотоксичности,

оцененный по суммарной фитомассе проростков редиса. Исходная фитотоксичность 3-х типов почв, загрязненных нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг, колебалась в пределах 32-50, 57-64 и 73-85 %, соответственно. Причем наибольшую фитотоксичность проявляла слабогумусированная, супесчаная бурая полупустынная почва, а наименьшую – высоко гумусированный, тяжелосуглинистый чернозем южный.

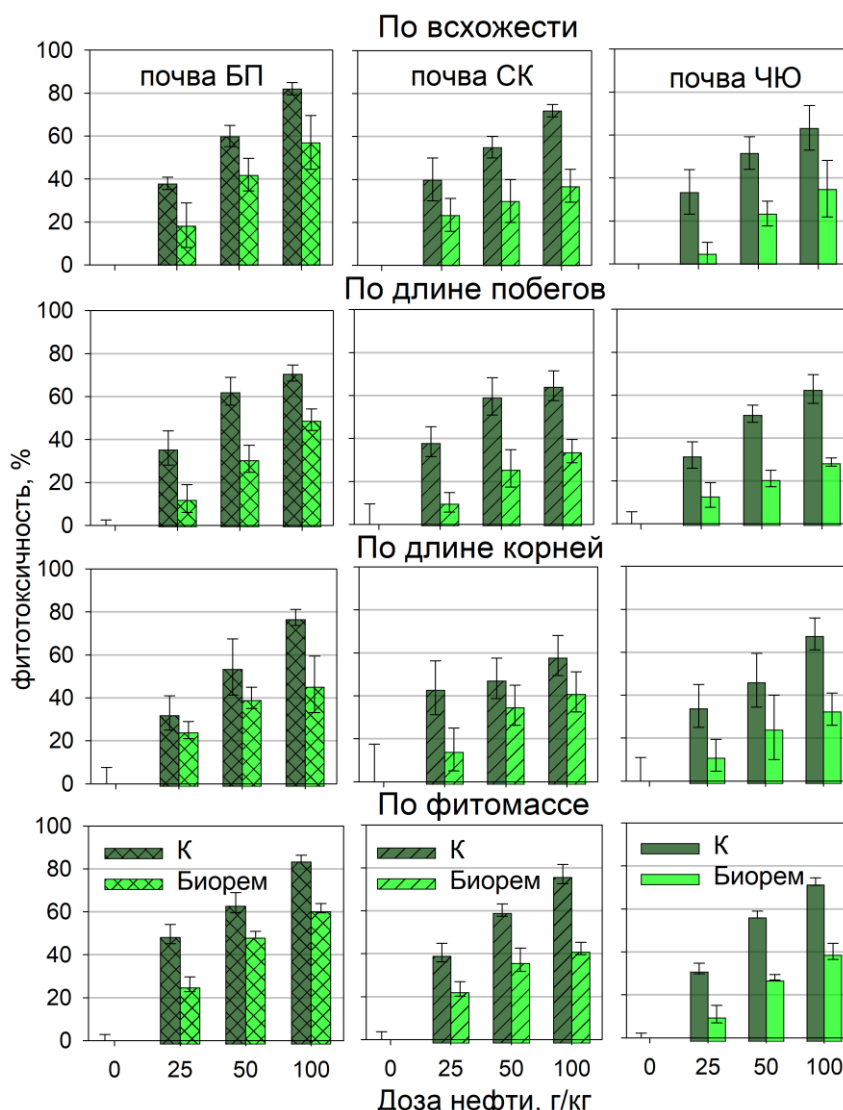


Рисунок 2 – Влияние обработки 3-х типов почв Калмыкии (БП, СК и ЧЮ), загрязненных нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг, на их фитотоксичность, измеренной по показателям всхожести, длине побегов, корней и суммарной фитомассе 2-х-недельных проростков редиса (*Raphanus sativus* L.), посеянного через 1 месяц после начала обработки (Биорем), по сравнению с контрольной необрабатываемой почвой (К)

В то же время, после обработки почвы путем извлечения нефти с помощью обножки с последующей ее обработкой сорбционной биоремедиацией в течение 1 месяца фитотоксичность всех типов почв по этому показателю достоверно снизилась до 11-26, 28-49 и 40-62 %, соответственно. При этом, фитотоксичность наименее загрязненной нефтью почвы (25 г/кг) снизилась практически до нетоксичного уровня (особенно в черноземной почве), тогда как фитотоксичность необрабатываемых почв оставалась еще высокой: 34-44, 52-60 и 63-82 %, соответственно.

В работе [23] показано действие отходов пивоварения на фитотоксичность чернозема оподзоленного, загрязненного сырой нефтью. Доказано, что загрязнение сырой нефтью, в

массовом соотношении 10 л/м^2 , повышает фитотоксичность чернозема оподзоленного среднесуглинистого: так длина корней проростков кресс-салата существенно снижается при действии нефтяного загрязнения. При добавлении пивной дробины в нефтезагрязненный чернозем оподзоленный фитотоксичность почв, как правило, увеличивается, тогда как при внесении отработанного кизельгура этот показатель снижается, что свидетельствует о возможности использования отработанного кизельгура в качестве добавки при биорекультивации нефтезагрязненных почв.

Использование органических сорбентов для ремедиации нефтезагрязненных почв было продемонстрировано и в других работах. Например, в исследованиях, проведенных на луговых почвах Татарстана [24], а также на почвах Пермского края [25], установлено, что технически рекультивированные почвы нефтепромыслов, как правило, характеризуются повышенной остаточной фитотоксичностью, что приводит к угнетению роста растений. При этом всхожесть и развитие семян яровой пшеницы, гороха и кресс-салата проявляется уже при остаточной дозе нефтепродуктов в интервале 50-187 мг/кг.

В работе [26] для повышения эффективности биорекультивации нефтезагрязненных почв Кольского Севера, загрязненных мазутом, предложено использовать обезвоженный избыточный активный ил (биоценоз колоний бактерий и простейших организмов), осадочные пивные дрожжи и хитозан – продукт конверсии отходов переработки краба камчатского. Эти сорбенты снизили фитотоксичность нефтезагрязненных почв по отношению ко всем исследованным растениям: овсу, пшенице, кресс-салату и редису.

Другим диагностическим показателем степени загрязнения может служить **ферментативная активность почв**, результаты определения которых до и после обработки почв показаны на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует, что загрязнение трех типов почв Калмыкии нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг привело к заметному снижению их ферментативной активности. По степени снижения ферментативной активности нефтезагрязненных почв ферменты располагались в ряду каталаза > фосфатаза > уреазы > инвертаза. С увеличением степени загрязнения почв в ряду 25, 50 и 100 г/кг активность каталазы снижалась на 15-38, 36-54 и 47-79 %, соответственно, а фосфатазы – на 19-25, 33-40 и 50-58 %, соответственно. В меньшей степени снижалась активность уреазы (на 11-20, 24-27 и 31-50 %, соответственно), тогда как достоверное снижение активности инвертазы (на 3-18 %) наблюдалось лишь при максимальном уровне загрязнения почв.

Обработка всех типов нефтезагрязненных почв Калмыкии способствовала активации почвенных ферментов. Наиболее заметное положительное влияние на активность всех ферментов оказала обработка слабогумусированной почвы БП. По степени активации ферментов в результате обработки почвы БП по сравнению с необработанными почвами ферменты располагались в следующем порядке: фосфатаза > инвертаза > каталаза > уреазы. В этой же почве после ее обработки активность данных ферментов превышала эти величины в необрабатываемых почвах, соответственно, на 42-92, 47-72, 38-50 и 31-34 % в зависимости от степени исходного загрязнения. В средне гумусированной почве СК эти же показатели варьировали в пределах 32-40, 7-11, 25-38 и 20-26 %, соответственно, т.е. наблюдался несколько иной порядок повышения ферментативной активности после ее обработки. Биоремедиация загрязненной почвы ЧЮ привела к повышению активности этих ферментов в наименьшей степени: на 25-29, 4-8, 23-24 и 11-20 % по сравнению с необработанными контролями с тем же уровнем загрязнения.

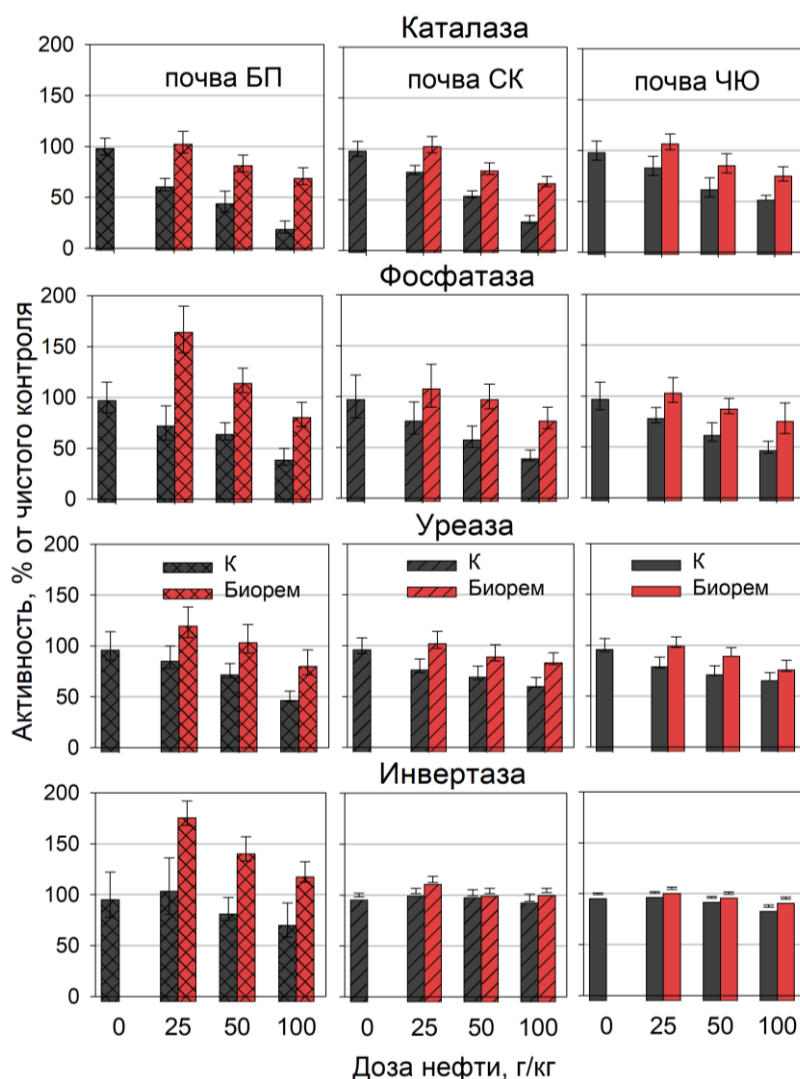


Рисунок 3 – Ферментативная активность 3-х типов почв Калмыкии (БП, СК и ЧЮ), загрязненных тремя дозами нефти (25, 50 и 100 г/кг), определенная до через 1,5 месяца после начала обработки (Биорем) в сравнении и необрабатываемым контролем (К)

В исследованиях [27], проведенных с серой лесной почвой, загрязненной нефтью в дозе 70 г/кг, продемонстрировано ускорение процесса биоремедиации в присутствии различных натуральных сорбентов (включая торф верховой в дозах 0,5 и 2 %), который сопровождался резким снижением фитотоксичности почвы уже в первые месяцы. Установлено, что основной механизм положительного действия торфа и ряда других сорбентов основан на снижении фито- и биотоксичности загрязненной почвы вследствие преимущественно обратимой сорбции поллютантов. Кроме того, в присутствии сорбентов снижалась гидрофобность нефтезагрязненных почв и повышались их предельная полевая влагоемкость и пористость. Все эти факторы обеспечивали более благоприятные условия для активации и повышения численности микроорганизмов-нефтедеструкторов, а, следовательно, ускоряли разложение углеводов нефти. При этом не происходило существенного накопления в почве наиболее токсичной фракции нефти в виде полициклических ароматических углеводов (ПАУ), включая бенз(а)пирен, а накопление ПАУ в фитомассе растений было значительно ниже, чем в контроле без сорбентов.

В работе [28] продемонстрирована прямая зависимость снижения активности каталазы и инвертазы от дозы нефти в лугово-аллювиальной почве, тогда как активность уреазы повышалась в присутствии низких доз нефтепродуктов и ингибировалась при

повышенном загрязнении. Ремедиация почв путем внесения углеводород-окисляющих микроорганизмов на фоне оптимальных доз минеральных удобрений способствовала нормализации ферментного пула почв, при этом стимулировалась активность всех этих ферментов.

На основании полученных результатов были проведены расчеты величин интегрального показателя биологического состояния для всех почвенных образцов. Результаты этих расчетов представлены на рисунке 4. Через 1,5 месяца обработки ИПБС всех типов почв, загрязненных нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг, снизился, соответственно, на 23-28, 38-46 и 51-66 %, по сравнению с чистой почвой. Обработка загрязненных почв с помощью отходов овцеводства в виде обножки с последующей доочисткой методом сорбционной биоремедиации в течение 1,5 месяца обеспечила значительное повышение ИПБС по сравнению с необрабатываемым контролем. При сравнительно невысоком уровне загрязнения нефтью почв СК и ЧЮ (25 г/кг) величины их ИПБС восстановились до уровня чистого контроля, а в почве БП показатель ИПБС даже достоверно превысил исходный уровень в чистом контроле – на 12 ± 4 %. После обработки всех типов почв, загрязненных нефтью в дозе 50 и 100 г/кг, этот показатель существенно повысился, но через 1,5 месяца он все еще оставался ниже, чем в чистом контроле: на 14-19 % и 26-32 %, соответственно.

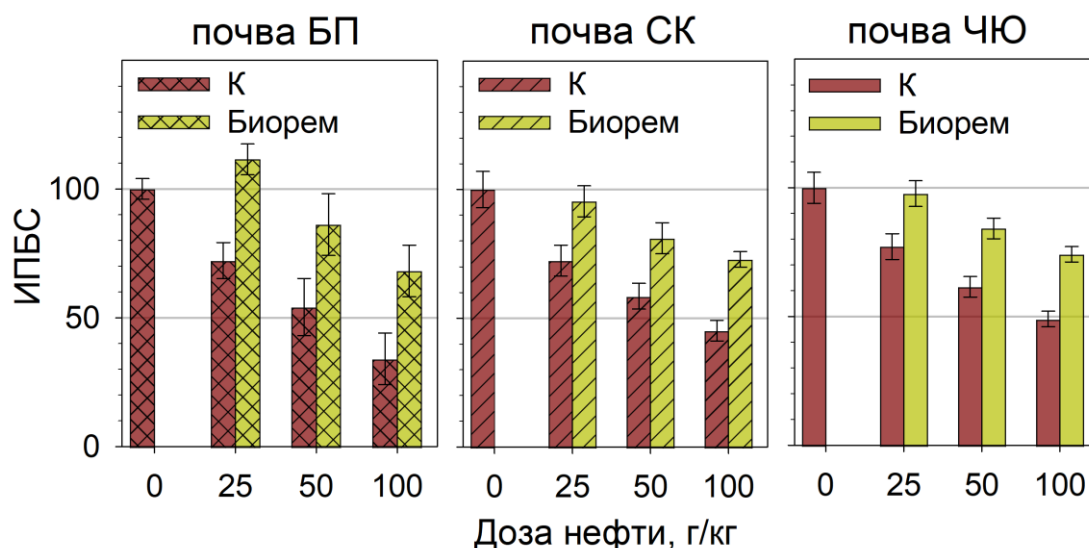


Рисунок 4 – Интегральный показатель биологического состояния почв Калмыкии (БП, СК и ЧЮ), загрязненных тремя дозами нефти (25, 50 и 100 г/кг), через 1,5 месяца после начала обработки (Биорем) в сравнении с контрольной необработанной почвой (К)

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что при нефтяном загрязнении почв Калмыкии нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг происходит существенное снижение интегрального показателя их биологического состояния. По степени повышения устойчивости к нефтяному загрязнению эти почвы располагаются в следующем ряду: бурые полупустынные < светло-каштановые < чернозем южный, что коррелирует с повышением показателей плодородия этих почв, а именно с повышением уровня гумусированности почв и снижением содержания легких фракций гранулометрического состава. При этом величины ИПБС загрязненных почв пропорционально снижаются по мере возрастания дозы вносимой нефти.

Обработка почвы путем удаления избытка нефти с помощью отходов овцеводства с последующей доочисткой методом сорбционной биоремедиации на фоне внесения древесных опилок существенно ускорила разложение нефтепродуктов в почвах, а также привела к резкому улучшению биологического состояния нефтезагрязненных почв. При всех исследуемых концентрациях загрязнителя значения ИПБС обработанных почв более чем в

полтора раза превышают показатели ИПБС необрабатываемых почв. В то же время в данных условиях проведения опыта оптимального снижения уровня загрязнения и повышения ИПБС до исходного уровня, близкого к чистому контролю, удалось достичь только в наименее загрязненных почвах при дозе нефти 25 г/кг, тогда как в более высоко загрязненных почвах через 1,5 месяца обработки пока не была достигнута требуемая степень снижения концентрации нефтепродуктов и повышение биологического состояния почв до исходного уровня.

Выводы

Проведена оценка эффективности биоремедиации трех основных почв Калмыкии (бурая полупустынная, светло каштановая и чернозем южный), загрязненных нефтью в дозах 25, 50 и 100 г/кг. Предложен способ восстановления нефтезагрязненных почв путем удаления избытка нефти с помощью обножки (отходы овцеводства) с последующей обработкой почвы методом сорбционной биоремедиации, которая основана на активации аборигенных микроорганизмов-деструкторов за счет снижения токсичности почвы и поддержания оптимального аэро-гидротермического режима (внесение древесных опилок, периодическое перемешивание и увлажнение) и оптимизации уровня биофильных элементов путем внесения комплексных минеральных удобрений.

На данном этапе предложенный метод показал удовлетворительные результаты при уровне загрязнения почв 25 г/кг, при котором наблюдалось снижение остаточного содержания нефтепродуктов до 5-8 г/кг, т.е. до минимально допустимого уровня (<10 г/кг). При этом наблюдалось практически полное восстановление интегрального показателя биологического состояния почв.

С другой стороны, обработка почв, загрязненных средней и высокой дозами нефти (50 и 100 г/кг), также дала положительные результаты как по ускорению разложения нефтепродуктов в почвах, так и по повышению их индекса ИПБС. При этом, однако, через 1,5 месяца после начала обработки средне и максимально загрязненных почв остаточные концентрации нефтепродуктов еще оставались достаточно высокими: в интервалах 15-19 и 32-38 г/кг, соответственно, а ИПБС почв колебался в пределах 68-74 и 81-86 %. Полученные результаты указывают на перспективность данного метода, который требует, однако, некоторой доработки для установления условий очистки почв при более широком уровне загрязнения.

Благодарности

Исследование проведено в рамках государственной субсидии – проект «Ассиметрично развивающиеся территории перед традиционными и новыми вызовами: исследование динамики социально-экономических процессов и изменчивости экологической ситуации» (№ госрегистрации: 122022700133-9) (2022–2026 гг.).

Список литературы

1. Ступин Д.Ю. Загрязнение почв и новейшие технологии их восстановления. СПб.: Изд-во Лань, 2009, 432 с.
2. Блинов Р.А. Об очистке водных объектов и почв от нефтепродуктов с помощью природных сорбентов // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: сб. науч. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Курск, 21 ноября 2019 г.). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 32-34.
3. Бузырева Н.В., Ташлыкова А.Н., Васина М.В. Природные сорбенты для очистки водных объектов и почвы от нефтепродуктов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 17 мая 2018 г.). Омск: Омский государственный технический университет, 2018. С. 348-351.

4. Цомбуева Б.В. Применение природных материалов в качестве сорбентов для очистки почв от нефтяного загрязнения // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. С. 1800.

5. Robichaud K., Lebeau M., Martineau S., Amyot M. Bioremediation of engine-oil contaminated soil using local residual organic matter. *PeerJ*. 2019. vol. 7. pp. e7389.

6. Александрова А.В., Корнена Е.П., Ксандопуло С.Ю., Лобанов В.Г., Щербаков В.Г. Патент № 2255803 С1 Российская Федерация, МПК В01J 20/24. Способ получения пищевого сорбента из растительного сырья: № 2003138128/15: заявл. 30.12.2003: опубл. 10.07.2005; заявитель Кубанский государственный технологический университет.

7. Очирова Д.О., Зеленская Е.А. Экологический мониторинг на нефтезагрязненных почвах и способы использования рисовой шелухи в качестве нефтесорбента // *Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования: материалы I Междунар. науч.-практ. Интернет-конференции, посвящ. 25-летию ФГБНУ «Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия», Солёное Займище, 29 февраля 2016 года. Солёное Займище: Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия, 2016. С. 703-711.*

8. Антропова Н.А. Сорбенты для ликвидации нефтяных разливов на основе верхних слаботорфяных торфов Томской области // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 1-1(32). С. 77-79.

9. Горбаев А.В. Применение древесных опилок для очистки нефтезагрязненных почв в Иркутской области // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2023. № 4(313). С. 20-25. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-4(313)-20-25.

10. Назарько М.Д., Романова К.Н., Ксандопуло С.Ю., Щербаков В.Г., Александрова А.В. Сорбент для очистки почв от нефтяных загрязнений // *Фундаментальные исследования*. 2006. № 11. С. 96-97.

11. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Бочарникова Е.А., Семенюк Н.Н., Яценко В.С., Слюсаревский А.В., Барышникова Е.А. Нефть и нефтепродукты как загрязнители почв. Технология комбинированной физико-биологической очистки загрязненных почв // *Российский химический журнал*. 2013. № 57 (1). С. 79-104.

12. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Кондрашина В.С., Зиннатшина Л.В., Слюсаревский А.В., Сушкова С.Н. Метод сорбционно-биологической очистки почв от органических загрязнителей // *Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века: сб. материалов Всеросс. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Романа Викторовича Ковалева (4-8 декабря 2017 г., г. Новосибирск) / отв. ред. А.И. Сысо. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2017. С. 22-27.*

13. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Яценко В.С., Ахметов Л.А. Сорбционная биоремедиация химически загрязненных почв в разных климатических условиях // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: сб. статей по материалам междунар. науч.-практ. конф., Севастополь, 20-23 сентября 2021 года. Севастополь, 2021. С. 112-117.*

14. Степанова Е.В., Чаплина Т.О. Исследование сорбирующей способности различных материалов с целью применения для ликвидаций аварийных разливов нефти // *Мониторинг. Наука и технологии*. 2017. № 1. С. 62-68.

15. Хасаншина Э.М. Очистка природных и сточных вод от нефтепродуктов и ионов тяжелых металлов отходами льнопереработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 17 с.

16. Онегова Т.С., Волочков Н.С., Киреева Н.А. Патент № 2279472 С2 Российская Федерация, МПК С12N 1/26, В09С 1/10. Способ очистки почвы от нефтяных загрязнений: № 2004119511/13: заявл. 25.06.2004: опубл. 10.07.2006; заявитель Открытое акционерное общество «Акционерная нефтяная компания «Башнефть».

17. Быков В.И. Патент № 2410170 С2 Российская Федерация, МПК В09С 1/10, С12N 1/26. способ очистки загрязненного грунта: № 2008152546/10: заявл. 29.12.2008: опубл. 27.01.2011.
18. Булуктаев А.А. Патент № 2656373 С2 Российская Федерация, МПК В09С 1/00. Способ рекультивации почв, подвергнутых загрязнению нефтью и нефтепродуктами: № 2015113875: заявл. 14.04.2015: опубл. 05.06.2018; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калмыцкий государственный университет».
19. Цомбуева Б.В., Адыянова А.Б. Патент № 2713346 С1 Российская Федерация, МПК В09С 1/00. Способ детоксикации почвы с применением природных сорбентов: № 2019113246: заявл. 29.04.2019: опубл. 04.02.2020; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова».
20. Галстян А.Ш. Определение активности ферментов почв: (Метод. указания). Ереван: [Б. и.], 1978. 55 с.
21. Ștefănic G., Tomescu E., Jarnea S. Total phosphatase capacity // Symposium on methods in soil biology, Romanian National Society of Soil Science Bucharest. 1965. vol. 37 (5). pp. 145-149.
22. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Биоэкологические принципы мониторинга и нормирования загрязнения. Ростов-на-Дону: Центры валеологии вузов России, 2001. 64 с.
23. Руденко Е.Ю. Оценка влияния отходов пивоварения на фитотоксичность нефтезагрязненной черноземной почвы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2012. № 1. С. 88-90.
24. Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатъев Ю.А., Кузнецова Т.В. Динамика роста высших растений на рекультивированных нефтезагрязненных аллювиальных луговых почвах разного гранулометрического состава // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 1 (21). С. 60-65.
25. Еремченко О.З., Сапцын Р.В., Ложкина Е.А., Тыршу Е.В. Оценка эффективности рекультивации нефтезагрязненных почв // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2022. № 1. С. 64-71.
26. Васильева Ж.В., Горбовская Т.Д., Павлов А. Рекультивация нефтезагрязненных почв с использованием органических отходов в условиях Кольского Севера // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2019. № 22 (1). С. 72-82.
27. Vasilyeva G., Mikhedova E., Zinnatshina L., Strijakova E., Akhmetov L., Sushkova S., Ortega-Calvo J.J. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // Science of the Total Environment. 2022. vol. 850. pp. 157952.
28. Сулейманов Р.Р., Абдрахманов Т.А., Жаббаров З.А., Турсунов Л.Т. Ферментативная активность и агрохимические свойства лугово-аллювиальной почвы в условиях нефтяного загрязнения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. № 10 (2). С. 292-296.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 10.07.2023
Принята к публикации 12.12.2023

USE OF NATURAL ORGANIC SORBENTS TO INCREASE THE EFFECTIVENESS OF BIOREMEDIATION OF OIL-POLLUTATED SOILS OF THE REPUBLIC OF KALMYKIA***A. Buluktaev¹, A. Adyanova¹, N. Jimbeev¹, R. Mukabenova¹, S. Mandzhieva¹, G. Vasilyeva²**¹Kalmyk scientific center of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Elista²Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Pushchino

e-mail: *buluktaev89@mail.ru

The purpose of the study was to assess the degree of change in the quality of three types of soils in Kalmykia, contaminated with different doses of oil after their treatment by removing excess oil from the soil using sheep waste (sheep feces) followed by bioremediation of the soil using different fractions of sawdust from deciduous trees. It was established that soil contamination of Kalmykia with oil in doses of 2.5; 5.0 and 10.0% leads to a sharp violation of their biological properties. The use of organic sorbents to improve soil bioremediation showed satisfactory results at a soil contamination level of 25 g/kg, at which there was a decrease in the residual content of petroleum products to 5-8 g/kg, i.e. to the minimum acceptable level (<10 g/kg). At the same time, an almost complete restoration of the integral indicator of the biological state of soils (IIBS) was observed. On the other hand, treatment of soils contaminated with medium and high doses of oil (50 and 100 g/kg) also gave positive results both in accelerating the decomposition of petroleum products in soils and in increasing their IIBS index.

Key words: waste from sheep shearing, sawdust, phytotoxicity, enzymatic activity.

References

1. Stupin D.Yu. Zagryaznenie pochv i noveishie tekhnologii ikh vosstanovleniya. SPb.: Izd-vo Lan', 2009, 432 c.
2. Blinov R.A. Ob ochistke vodnykh ob'ektov i pochv ot nefteproduktov s pomoshch'yu prirodnykh sorbentov. Innovatsionnye metody proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii zdaniy i sooruzhenii: sb. nauch. tr. Vseross. nauch.-prakt. konf. (g. Kursk, 21 noyabrya 2019 g.). Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2019. S. 32-34.
3. Buzyreva N.V., Tashlykova A.N., Vasina M.V. Prirodnye sorbenty dlya ochistki vodnykh ob'ektov i pochvy ot nefteproduktov. Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Omsk, 17 maya 2018 g.). Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018. S. 348-351.
4. Tsombueva B.V. Primenenie prirodnykh materialov v kachestve sorbentov dlya ochistki pochv ot neftyanogo zagryazneniya. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. N 6. S. 1800.
5. Robichaud K., Lebeau M., Martineau S., Amyot M. Bioremediation of engine-oil contaminated soil using local residual organic matter. PeerJ. 2019. vol. 7. pp. e7389.
6. Aleksandrova A.V., Kornena E.P., Ksandopulo S.Yu., Lobanov V.G., Shcherbakov V.G. Patent № 2255803 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B01J 20/24. Sposob polucheniya pishchevogo sorbenta iz rastitel'nogo syr'ya: N 2003138128/15: zayavl. 30.12.2003: opubl. 10.07.2005; zayavitel' Kubanskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet.
7. Ochirova D.O., Zelenskaya E.A. Ekologicheskii monitoring na neftezagryaznennykh pochvakh i sposoby ispol'zovaniya risovoi shelukhi v kachestve neftesorbenta. Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie prirodnoi sredy i nauchno-prakticheskie aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy I Mezhdunar. nauch.-prakt. Internet-konferentsii, posvyashch. 25-letiyu FGBNU "Prikaspiiskii nauchno-issledovatel'skii institut aridnogo zemledeliya", Solenoe Zaimishche, 29 fevralya 2016 goda. Solenoe Zaimishche: Prikaspiiskii nauchno-issledovatel'skii institut aridnogo zemledeliya, 2016. S. 703-711.

8. Antropova N.A. Sorbenty dlya likvidatsii neftyanykh razlivov na osnove verkhovykh slaborazlozhivshikhnya torfov Tomskoi oblasti. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2015. N 1-1(32). S. 77-79.
9. Gorbaev A.V. Primenenie drevesnykh opilok dlya ochistki neftezagryaznennykh pochv v Irkutskoi oblasti. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*. 2023. N 4(313). S. 20-25. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-4(313)-20-25.
10. Nazar'ko M.D., Romanova K.N., Ksandopulo S.Yu., Shcherbakov V.G., Aleksandrova A.V. Sorbent dlya ochistki pochv ot neftyanykh zagryaznenii. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2006. N 11. S. 96-97.
11. Vasil'eva G.K., Strizhakova E.R., Bocharnikova E.A., Semenyuk N.N., Yatsenko V.S., Slyusarevskii A.V., Baryshnikova E.A. Neft' i nefteprodukty kak zagryazniteli pochv. *Tekhnologiya kombinirovannoi fiziko-biologicheskoi ochistki zagryaznennykh pochv*. Rossiiskii khimicheskii zhurnal. 2013. N 57 (1). S. 79-104.
12. Vasil'eva G.K., Strizhakova E.R., Kondrashina V.S., Zinnatshina L.V., Slyusarevskii A.V., Sushkova S.N. Metod sorbtsionno-biologicheskoi ochistki pochv ot organicheskikh zagryaznitelei. *Pochvennye resursy Sibiri: vyzovy XXI veka: sb. materialov Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 110-letiyu vydayushchegosya organizatora nauki i pervogo direktora IPA SO RAN Romana Viktorovicha Kovaleva (4-8 dekabrya 2017 g., g. Novosibirsk)*. Otv. red. A.I. Syso. Tomsk: Izdatel'skii Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. S. 22-27.
13. Vasil'eva G.K., Strizhakova E.R., Yatsenko V.S., Akhmetov L.A. Sorbtsionnaya bioremediatsiya khimicheskii zagryaznennykh pochv v raznykh klimaticheskikh usloviyakh. *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost': sb. statei po materialam mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sevastopol', 20-23 sentyabrya 2021 goda*. Sevastopol', 2021. S. 112-117.
14. Stepanova E.V., Chaplina T.O. Issledovanie sorbiruyushchei sposobnosti razlichnykh materialov s tsel'yu primeneniya dlya likvidatsii avariinykh razlivov nefti. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2017. N 1. S. 62-68.
15. Khasanshina E.M. Ochistka prirodnykh i stochnykh vod ot nefteproduktov i ionov tyazhelykh metallov otkhodami l'noopererabotki: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Kazan', 2012. 17 s.
16. Onegova T.S., Volochkov N.S., Kireeva N.A. Patent № 2279472 C2 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C12N 1/26, B09C 1/10. Sposob ochistki pochvy ot neftyanykh zagryaznenii: N 2004119511/13: zayavl. 25.06.2004: opubl. 10.07.2006; zayavitel' Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Aktsionernaya neftyanaya kompaniya "Bashneft".
17. Bykov V.I. Patent № 2410170 C2 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B09C 1/10, C12N 1/26. sposob ochistki zagryaznennogo grunta: N 2008152546/10: zayavl. 29.12.2008: opubl. 27.01.2011.
18. Buluktaev A.A. Patent № 2656373 C2 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B09C 1/00. Sposob rekul'tivatsii pochv, podvergnutykh zagryazneniyu neft'yu i nefteproduktami: N 2015113875: zayavl. 14.04.2015: opubl. 05.06.2018; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Kalmytskii gosudarstvennyi universitet".
19. Tsombueva B.V., Ad'yanova A.B. Patent № 2713346 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B09C 1/00. Sposob detoksikatsii pochvy s primeneniem prirodnykh sorbentov: N 2019113246: zayavl. 29.04.2019: opubl. 04.02.2020; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Kalmytskii gosudarstvennyi universitet imeni B.B. Gorodovikova".
20. Galstyan A.Sh. Opredelenie aktivnosti fermentov pochv: (Metod. ukazaniya). Erevan: [B. i.], 1978. 55 s.

21. Ştefanic G., Tomescu E., Jarnea S. Total phosphatasic capacity. Symposium on methods in soil biology, Romanian National Society of Soil Science Bucharest. 1965. vol. 37 (5). pp. 145-149.
22. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Bioekologicheskie printsipy monitoringa i normirovaniya zagryazneniya. Rostov-na-Donu: Tsentry valeologii vuzov Rossii, 2001. 64 s.
23. Rudenko E.Yu. Otsenka vliyaniya otkhodov pivovareniya na fitotoksichnost' neftezagryaznennoi chernozemnoi pochvy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki. 2012. N 1. S. 88-90.
24. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zainulgabidinov E.R., Ignat'ev Yu.A., Kuznetsova T.V. Dinamika rosta vysshikh rastenii na rekul'tivirovannykh neftezagryaznennykh allyuvial'nykh lugovykh pochvakh raznogo granulometricheskogo sostava. Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii. 2020. N 1 (21). S. 60-65.
25. Eremchenko O.Z., Saptsyn R.V., Lozhkina E.A., Tyrshu E.V. Otsenka effektivnosti rekul'tivatsii neftezagryaznennykh pochv. Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya. 2022. N 1. S. 64-71.
26. Vasil'eva Zh.V., Gorbovskaya T.D., Pavlov A. Rekul'tivatsiya neftezagryaznennykh pochv s ispol'zovaniem organicheskikh otkhodov v usloviyakh Kol'skogo Severa. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. N 22 (1). S. 72-82.
27. Vasilyeva G., Mikhedova E., Zinnatshina L., Strijakova E., Akhmetov L., Sushkova S., Ortega-Calvo J.J. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. Science of the Total Environment. 2022. vol. 850. pp. 157952.
28. Suleimanov R.R., Abdrakhmanov T.A., Zhabbarov Z.A., Tursunov L.T. Fermentativnaya aktivnost' i agrokhimicheskie svoistva lugovo-allyuvial'noi pochvy v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. 2008. N 10 (2). S. 292-296.

Сведения об авторах:

Алексей Александрович Булуктаев

К.б.н., и.о. научного сотрудника отдела комплексного мониторинга и информационных технологий, Калмыцкий научный центр Российской академии наук

ORCID 0000-0002-2329-465X

Aleksey Buluktaev

Candidate of Biological Sciences, Researcher of the Department of Integrated Monitoring and Information Technologies, Kalmyk scientific center of the Russian Academy of Sciences

Алтана Бадмаевна Адьянова

Старший лаборант отдела комплексного мониторинга и информационных технологий, Калмыцкий научный центр Российской академии наук

ORCID 0000-0002-9671-562X

Altana Adianova

Senior Assistant of the Department of Integrated Monitoring and Information Technologies, Kalmyk scientific center of the Russian Academy of Sciences

Никита Владимирович Джимбеев

И.о. младшего научного сотрудника отдела комплексного мониторинга и информационных технологий, Калмыцкий научный центр Российской академии наук

ORCID 0000-0001-8633-0016

Nikita Dzhimbeev

Junior Researcher of the Department of Integrated Monitoring and Information Technologies, Kalmyk scientific center of the Russian Academy of Sciences

Раиса Александровна Мукабенова

И.о. младшего научного сотрудника отдела комплексного мониторинга и информационных технологий, Калмыцкий научный центр Российской академии наук

ORCID 0000-0003-4056-927X

Raisa Mukabenova

Junior Researcher of the Department of Integrated Monitoring and Information Technologies, Kalmyk scientific center of the Russian Academy of Sciences

Саглар Сергеевна Манджиева

К.б.н., старший научный сотрудник отдела комплексного мониторинга и информационных технологий, Калмыцкий научный центр Российской академии наук

ORCID 0000-0001-6000-2209

Saglara Mandzhieva

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Department of Integrated Monitoring and Information Technologies, Kalmyk scientific center of the Russian Academy of Sciences

Галина Кирилловна Васильева

К.б.н., ведущий научный сотрудник отдела эволюции и экологии почв, лаборатории физико-химии почв, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук

ORCID 0000-0002-9766-6452

Galina Vasilyeva

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Department of Soil Evolution and Ecology, Laboratory of Physical Chemistry of Soils, Institute of Physical, Chemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences

Для цитирования: Булуктаев А.А., Адьянова А.Б., Джимбеев Н.В., Мукабенова Р.А., Манджиева С.С., Васильева Г.К. Использование натуральных органических сорбентов для повышения эффективности биоремедиации нефтезагрязненных почв Республики Калмыкия // Вопросы степеведения. 2023. № 4. С. 146-161. DOI: 10.24412/2712-8628-2023-4-146-161