

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ
НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

© 2025 г. А.А. Булуктаев, А.Б. Адьянова, Р.А. Мукабенова, С.С. Манджиева

Калмыцкий научный центр РАН

Россия, 358000, г. Элиста, ул. им. И.И. Илишкина, д. 8. E-mail: buluktaev89@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2024. После доработки 16.05.2025. Принята к публикации 01.07.2025.

Значительные масштабы углеводородов и сопутствующих загрязнителей, поступающих в окружающую среду при освоении нефтегазовых ресурсов, приводят к тому, что данный вид загрязнения становится приоритетным для многих районов нефтедобычи. На территории Республики Калмыкия особенно сильное воздействие нефтяного загрязнения испытывает почвенный покров. Цель исследования – определить изменения биологических свойств бурой полупустынной, светло-каштановой почв и чернозема южного в зависимости от природы загрязняющего вещества и его концентрации в почве. В качестве объектов исследования выбраны зональные почвы Калмыкии. Лабораторно-аналитические исследования, а также отбор проб выполнены с использованием общепринятых в биологии и почвоведении методов. В качестве нефтепродуктов использовали товарную и сырую нефть, а также мазут, керосин и бензин. В результате исследований установлено, что наиболее информативными почвенными ферментами к загрязнению нефтепродуктами являются каталаза и уреазы, активность которых значительно снижается и зависит от концентрации загрязнителя. Активность фосфатазы при загрязнении нефтепродуктами также снижается, но не столь значительно; активность инвертазы стимулируется низкими концентрациями нефтепродуктов и ингибируется высокими. Все почвы, загрязненные нефтепродуктами, проявляют высокую фитотоксичность по отношению к тест-растениям, но исключением является бурая полупустынная почва, в которой при загрязнении низкими концентрациями мазута и керосина происходит увеличение длины побега и корней.

Ключевые слова: фитотоксичность, ферментативная активность, загрязнение нефтепродуктами, почвы, аридные территории.

DOI: 10.24412/1993-3916-2025-3-153-163

EDN: VVDCQH

Широкое использование нефти и нефтепродуктов привело к тому, что они стали приоритетными загрязнителями окружающей среды, в особенности почвы. Поступление углеводородов нефти в почву происходит при добыче, транспортировке, переработке нефти и использовании нефтепродуктов при нарушениях или несовершенстве технологии их добычи, плохого качества, износа оборудования, различных аварийных ситуаций. 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 (Ansari et al., 2018; Miralles et al., 2012). Следует также учитывать, что нефть и нефтепродукты, скопившиеся в грунтовых отложениях, могут оказывать негативное воздействие на прочностные характеристики грунтов (Gordon et al., 2018; Kim et al., 2015). Поэтому почвогрунты аридных территорий, которые сформировались в условиях нефтяного загрязнения, засушливого климата и засоленности почвообразующих пород, требуют всестороннего исследования с целью разработки и внедрения технологий ремедиации.

Республика Калмыкия является небольшим, но самым аридным регионом на крайнем юго-востоке европейской части Российской Федерации (Лазарева и др., 2012), который входит в состав Южного Федерального округа. Доминирующая часть ее территории располагается в зоне степей, полупустынь и пустынь, общей протяженностью 458 км с севера на юг и 423 км с запада на восток (Намысова и др., 2013; Сангаджиев и др., 2014). От соседних субъектов Российской Федерации,

а также других регионов Калмыкия резко отличается не только комплексом природно-хозяйственных характеристик, но и более континентальным климатом (летом – до +45°C, зимой – до –20°C), отсутствием постоянных и крупных водотоков, минимальным количеством годовых осадков (250–300 мм).

Государственным балансом запасов полезных ископаемых (нефть) на 01.01.2023 в республике учтены 30 месторождений (18 нефтяных, 7 газонефтяных, 5 нефтегазоконденсатных), 25 месторождений горючих газов (11 газовых, 2 газоконденсатных, 7 газонефтяных, 5 нефтегазоконденсатных). На территории Калмыкии, где уровень добычи нефти сократился с 167.5 тыс. т в 2016 году до 58.7 тыс. т в 2022 году, а добыча газа составила 46.2 млн. м³, почвенный покров продолжает испытывать воздействие нефтегазового комплекса. Для сравнения, в соседних регионах уровень добычи остается значительно выше: Волгоградская область – более 2.5 млн. т нефти, Ставропольский край – около 1 млн. т, Чеченская Республика – более 2 млн. т, Республика Дагестан – около 200 тыс. т (Волгоградская ..., 2023; Ставропольский ..., 2023; Чеченская ..., 2023; Республика Дагестан ..., 2023; Республика Калмыкия ..., 2023).

В работах, проведенных ранее, мы уже показали негативное влияние нефти на биологические свойства почв Республики Калмыкия (Vuluktaev, 2017, 2020). Однако для более полного раскрытия данной темы необходимо изучить влияние не только нефти, но и других нефтепродуктов. Исходя из вышесказанного, цель настоящего исследования заключается в выявлении закономерностей влияния нефти и нефтепродуктов на активность почвенных ферментов и фитотоксичность нефтезагрязненных почв аридных территорий.

Материалы и методы

Эксперимент проводили на образцах 3 типов и подтипов почв юга России: бурая полупустынная, светло-каштановая и чернозем южный. Их основные агрохимические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химические, физико-химические и биологические свойства исследованных почв.

Почва	Гранулометрический состав	Содержание гумуса, %	рН водн.	Общий N, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	Активность каталазы, мл O ₂ /г
					мг/100 г		
Бурая полупустынная	Супесчаная	1.0	8.4	0.11	1.74	25.3	2.36
Светло-каштановая	Среднесуглинистая	1.5	8.7	0.15	3.58	36.1	7.13
Чернозем южный	Тяжелосуглинистая	3.9	8.9	0.28	6.00	44.2	12.73

Эксперимент поставлен в лаборатории экологических исследований Калмыцкого научного центра РАН. Образцы бурой полупустынной, светло-каштановой почв или чернозема южного массой 5 кг помещали в сосуды из поливинилхлорида размером 50×15×10 см. Почву загрязняли нефтью или нефтепродуктами для создания исходной концентрации нефти 2.5, 5 и 10% от массы почвы. Для этого использовали товарную нефть с Состинского месторождения, сырую нефть с Тенгутинского месторождения, а также мазут, керосин и бензин. Загрязненную почву тщательно перемешивали и увлажняли водой до 60% от полной влагоемкости и высевали семена редиса (*Raphanus sativus* L.) по 3 г на сосуд. На протяжении всего эксперимента поддерживали оптимальную температуру, влажность и освещенность. Контролем служили незагрязненные образцы почв, на которых также высевали семена редиса. Через 2 недели после загрязнения определяли ферментативную активность почв, фитотоксичность почв по всхожести, длине побегов, длине корней и общей фитомассе тест-растений. Все варианты лабораторных экспериментов закладывали в 3 повторностях, а при проведении биотестирования также использовали образцы в 3-кратной повторности.

О ферментативной активности почв судили по активности каталазы, дегидрогеназ, уреазы, инвертазы и фосфатазы. Ферментативную активность почв определяли в оптимальных температурных условиях при естественной рН почвы, согласно рекомендации А.Ш. Галстяна (1978).

Повторность проведения анализов – 3-кратная. Активность каталазы, дегидрогеназ и уреазы измеряли по методикам Галстяна, фосфатазы – по методу Штефаника, Ярни, Томеску (1965), активность инвертазы – по методу А.Ш. Галстяна в модификации Ф.Х. Хазиева (1978).

Фитотоксичность почв определяли по изменению показателей прорастания семян (всхожесть) и интенсивности начального роста 2-недельных проростков (длина корней и зеленых проростков, масса проростков, общая фитомасса) в соответствии с ГОСТ 33061-2014 (2015). В качестве тест-объекта использовали редис (*Raphanus sativus* L.) сорта «Рубин».

Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа ANOVA и критерия Стьюдента при $p < 0.05$, а также рассчитывали наименьшую существенную разность ($НСР_{05}$). Для оформления диаграмм использовали программу SigmaPlot. Для объединения биологических показателей была использована методика определения ИПБС (интегральный показатель биологического состояния почв), предложенная С.И. Колесниковым с соавторами (2001).

Результаты и обсуждение

Результаты исследования фитотоксичности бурой полупустынной почвы при загрязнении различными нефтепродуктами демонстрируют выраженную дозозависимую реакцию. При загрязнении товарной нефтью уже при минимальной концентрации 2.5% наблюдается снижение всхожести на 48% от контроля, при увеличении дозы до 5 и 10% этот показатель уменьшается на 60 и 82% соответственно. Длина побегов сокращается на 39% при 2.5% концентрации, достигая максимального снижения на 71% при 10% загрязнении. Аналогичная динамика отмечается для длины корней (снижение на 23-78%) и общей фитомассы (на 49-85%), причем различия между вариантами статистически значимы.

Наиболее выраженный токсический эффект зафиксирован при загрязнении нефтью с пластовой водой. При концентрации 2.5% всхожесть снижается на 63%, длина побегов – на 52%, корней – на 60%, фитомасса – на 61%. При 5% концентрации фитотоксичность усиливается: всхожесть падает на 89%, а при 10% загрязнении наблюдается полная гибель растений. Статистическая достоверность различий подтверждается значениями $НСР_{05}$ (5-10; рис. 1).

Интересный парадокс наблюдается при мазутном загрязнении: низкая концентрация 2.5% вызывает стимуляцию роста побегов на 8% и корней на 13% относительно контроля, хотя всхожесть при этом снижается на 46%. Однако при увеличении концентрации мазута до 5 и 10% проявляется характерный токсический эффект: длина побегов уменьшается на 33 и 55% соответственно, корней – на 29 и 58%, фитомасса – на 51 и 80%.

Загрязнение керосином приводит к менее выраженному, но статистически значимому снижению показателей. При минимальной концентрации 2.5% всхожесть уменьшается на 38%, при этом длина побегов практически не изменяется. Максимальная концентрация керосина 10% вызывает снижение всхожести на 62%, длины побегов – на 34%, корней – на 40%, фитомассы – на 67%.

Аналогичное воздействие оказывает бензин: при 2.5% концентрации всхожесть снижается на 40%, длина побегов – на 29%, корней – на 30%, фитомасса – на 39%. Увеличение дозы бензина до 10% усиливает токсический эффект: всхожесть падает на 64%, длина побегов – на 42%, корней – на 48%, фитомасса – на 63%. Статистическая значимость всех отмеченных изменений подтверждается значениями $НСР_{05}$ (8-10), что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Результаты исследования фитотоксичности светло-каштановой почвы также демонстрируют выраженную зависимость степени угнетения растений от типа и концентрации нефтепродуктов. При загрязнении товарной нефтью отмечается прогрессирующее снижение всех исследуемых параметров: минимальная концентрация 2.5% вызывает уменьшение всхожести на 40% от контроля, длины побегов – на 37%, корней – на 43%, фитомассы – на 40%. При увеличении концентрации до 10% токсический эффект усиливается: всхожесть падает на 71%, длина побегов – на 65%, корней – на 59%, фитомасса – на 77%; все различия статистически достоверны ($НСР_{05}$ 8-9).

Наиболее выраженное угнетение показателей наблюдается при загрязнении нефтью с пластовой водой. Уже при 2.5% концентрации всхожесть снижается на 57%, длина побегов – на 48%, корней – на 50%, фитомасса – на 72%. При 5% концентрации токсичность резко возрастает: фитомасса уменьшается на 93%, а при 10% загрязнении происходит полная гибель растений. Статистическая

значимость этих изменений подтверждается низкими значениями HC_{P05} (4-13), что свидетельствует о высокой достоверности результатов.

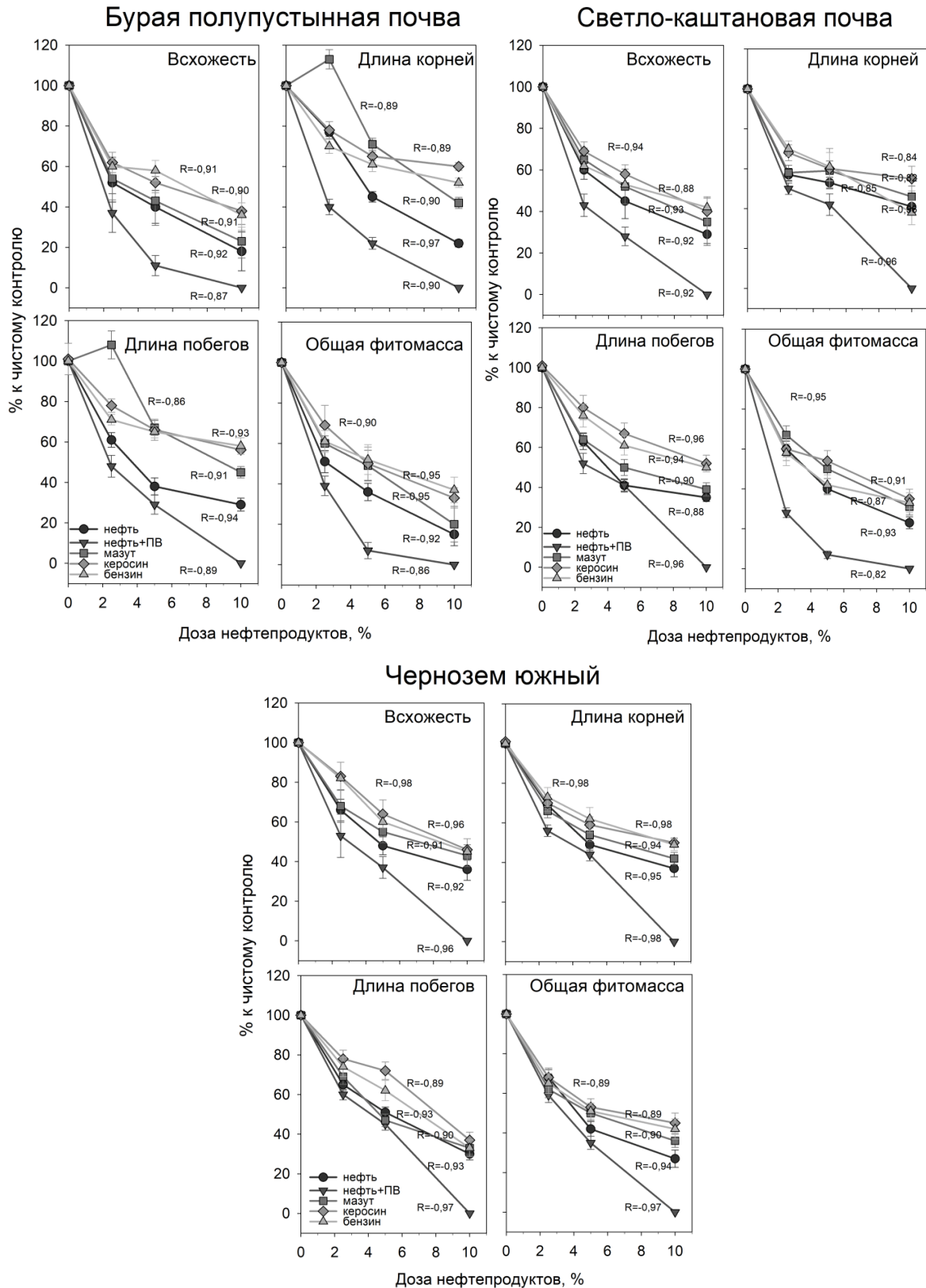


Рис. 1. Влияние загрязнения нефтью и нефтепродуктами почв аридных территорий на показатели роста редиса обыкновенного (*Raphanus sativus* L.)

При загрязнении мазутом выявлена неоднозначная реакция растений. Концентрация 2.5% вызывает умеренное снижение показателей: всхожести – на 35%, длины побегов – на 36%, корней – на 42%, но при этом фитомасса уменьшается всего на 33%. Однако при повышении концентрации до 10% токсический эффект становится более выраженным: всхожесть падает на 65%, длина побегов – на 61%, корней – на 54%, фитомасса – на 69%.

Керосин оказывает менее выраженное, но статистически значимое воздействие. При минимальной концентрации 2.5% всхожесть снижается на 31%, длина побегов – на 20%, корней – на 32%, фитомасса – на 40%. Максимальная концентрация 10% приводит к уменьшению всхожести на 60%, длины побегов – на 48%, корней – на 45%, фитомассы – на 65%.

Аналогичное воздействие оказывает бензин: при 2.5% концентрации отмечается снижение всхожести на 38%, длины побегов – на 24%, корней – на 30%, фитомассы – на 42%. При 10% загрязнении эти показатели уменьшаются, соответственно, на 58, 50, 62 и 67%. Во всех случаях различия между вариантами статистически достоверны (НСР₀₅ 8-12), что подтверждает надежность полученных данных. Сравнительный анализ показывает, что светло-каштановая почва проявляет промежуточную устойчивость к нефтяному загрязнению между бурой полупустынной почвой и черноземом южным.

Результаты исследования фитотоксичности чернозема южного выявили его повышенную устойчивость к нефтяному загрязнению по сравнению с другими типами почв, хотя и в нем наблюдается выраженная дозозависимая реакция. При загрязнении товарной нефтью минимальная концентрация 2.5% вызывает умеренное снижение показателей: всхожесть уменьшается на 34% от контроля, длина побегов – на 31%, корней – на 35%, фитомасса – на 32%. При максимальной концентрации 10% токсический эффект усиливается: всхожесть падает на 64%, длина побегов – на 63%, корней – на 70%, фитомасса – на 73% (НСР₀₅ 8-9).

Наибольшую токсичность для чернозема также демонстрирует нефть с пластовой водой. Уже при 2.5% концентрации всхожесть снижается на 47%, длина побегов – на 44%, фитомасса – на 41%, при этом длина корней уменьшается менее значительно – на 34%. При 5% загрязнении фитотоксичность резко возрастает: фитомасса сокращается на 65%, а при 10% концентрации, как и в других типах почв, наблюдается полная гибель растений.

Мазутное загрязнение вызывает менее выраженное, но статистически значимое угнетение растений. При 2.5% концентрации всхожесть снижается на 32%, длина побегов – на 34%, корней – на 31%, фитомасса – на 38%. При увеличении концентрации до 10% показатели уменьшаются: всхожесть – на 57%, длина побегов – на 58%, корней – на 65%, фитомасса – на 64%.

Керосин в низких концентрациях 2.5% оказывает минимальное воздействие: всхожесть даже превышает контроль на 17%, длина побегов снижается на 30%, корней – на 22%, фитомасса – на 32%. Однако при 10% концентрации отмечается существенное угнетение: всхожесть падает на 54%, длина побегов – на 50%, корней – на 63%, фитомасса – на 55%.

Аналогичная динамика наблюдается при загрязнении бензином: 2.5% концентрация вызывает снижение всхожести на 18%, длины побегов – на 27%, корней – на 26%, фитомассы – на 35%. При максимальной концентрации 10% эти показатели уменьшаются, соответственно, на 55, 51, 67 и 58%. Все описанные изменения статистически достоверны (НСР₀₅ 8-11), что подтверждает надежность полученных результатов. Чернозем южный демонстрирует наибольшую устойчивость к нефтяному загрязнению среди исследованных почв, особенно при воздействии керосина и бензина в низких концентрациях.

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей. Так, работы С.И. Колесникова с соавторами (2001, 2010, 2012, 2013; Minnikova et al., 2023) подтверждают зависимость степени фитотоксичности от типа почвы и вида загрязнителя. Исследования А.А. Околеловой с соавторами (2014) в Волгоградской области показали сходные закономерности угнетения роста растений на загрязненных почвах. А.Н. Бондаренко (2013) в исследованиях на различных почвах Астраханской области также отмечал значительное снижение всхожести и морфометрических показателей тест-растений при нефтяном загрязнении.

Активность каталазы. Исследование ферментативной активности выявило значительное угнетение каталазы во всех типах почв под воздействием нефтепродуктов, причем степень ингибирования существенно зависела как от типа почвы, так и от вида загрязнителя. В бурой

полупустынной почве, изначально имевшей наименьшую активность каталазы (2.4 ± 0.2 мл O_2 /г/мин), загрязнение товарной нефтью вызывало прогрессирующее снижение активности фермента: на 38% при 2.5% концентрации, 54% при 5%, 79% при максимальной 10%. Особенно выраженный ингибирующий эффект наблюдался при загрязнении нефтью с пластовой водой: уже при 2.5% концентрации активность каталазы снижалась на 58%, достигая 96% угнетения при 10% загрязнении. Мазут оказывал несколько менее выраженное воздействие (снижение на 29-75% в зависимости от концентрации), тогда как керосин и бензин демонстрировали наименьшую токсичность по отношению к каталазе, хотя и вызывали статистически значимое снижение активности на 20-54% (керосин) и 17-38% (бензин).

В светло-каштановой почве с исходно более высокой активностью каталазы (7.2 ± 0.3 мл O_2 /г/мин) также наблюдалось дозозависимое снижение активности фермента под воздействием нефтепродуктов. Товарная нефть вызывала уменьшение активности на 21-69%, причем нефть с пластовой водой вновь демонстрировала максимальный ингибирующий эффект (43-83% снижения). Мазут приводил к умеренному угнетению каталазы (21-61%), тогда как керосин и бензин оказывали наименьшее воздействие (17-51 и 14-50%). Важно отметить, что во всех вариантах опыта различия были статистически достоверны ($НСР_{05}$ 0.18-0.59), подтверждая надежность полученных результатов.

Чернозем южный, обладающий наибольшей исходной активностью каталазы (12.7 ± 0.7 мл O_2 /г/мин), проявил и наибольшую устойчивость к нефтяному загрязнению. Тем не менее, даже в его случае наблюдалось значительное снижение активности фермента: на 15-46% при загрязнении товарной нефтью, на 37-72% при воздействии нефти с пластовой водой. Мазут вызывал умеренное угнетение каталазы (20-53%), тогда как керосин и бензин оказывали минимальное воздействие (16-44 и 17-44%). Статистическая значимость всех наблюдаемых изменений подтверждалась значениями $НСР_{05}$ (0.80-1.48; рис. 2).

Сравнительный анализ выявил четкую закономерность: во всех типах почв наибольшее угнетение каталазы вызывала нефть с пластовой водой, затем следовали товарная нефть и мазут, тогда как керосин и бензин оказывали наименьшее воздействие. При этом абсолютная степень ингибирования каталазы зависела от типа почвы: наиболее выраженные изменения наблюдались в бурой полупустынной почве, менее значительные – в светло-каштановой, наименьшие – в черноземе южном. Эти различия могут быть связаны с особенностями гранулометрического состава и содержанием органического вещества в почвах, что влияет как на активность ферментов, так и на поведение нефтепродуктов в почвенной среде.

Активность уреазы. Исследование активности уреазы выявило значительные различия в реакции ферментной системы разных типов почв на нефтяное загрязнение. В бурой полупустынной почве с исходной активностью уреазы 0.99 ± 0.13 мг NH_3 /г/24 ч наблюдалось выраженное дозозависимое снижение активности под воздействием всех видов нефтепродуктов. Наибольшее угнетение отмечалось при загрязнении нефтью с пластовой водой: уже при 2.5% концентрации активность снижалась на 18%, достигая 60% ингибирования при максимальной 10% концентрации. Товарная нефть вызывала снижение активности на 11-49%, мазут – на 9-39%, тогда как керосин и бензин демонстрировали наиболее мягкое воздействие с уменьшением активности всего на 6-32 и 4-30% соответственно. Статистическая значимость изменений подтверждалась низкими значениями $НСР_{05}$ (0.03-0.10; рис. 2).

Светло-каштановая почва с исходно более высокой активностью уреазы (8.6 ± 0.4 мг NH_3 /г/24 ч) показала сходную, но менее выраженную динамику изменений. Нефть с пластовой водой вызывала снижение активности на 30-50%, товарная нефть – на 20-36%, мазут – на 17-29%. Керосин и бензин вновь оказывали наименьшее воздействие (14-23 и 10-21%). Особенностью этой почвы стало менее резкое падение активности уреазы при высоких концентрациях загрязнителей по сравнению с бурой полупустынной почвой, что может быть связано с лучшей буферной способностью и более высоким содержанием органического вещества.

Чернозем южный, обладающий максимальной исходной активностью уреазы (25.3 ± 0.2 мг NH_3 /г/24 ч), продемонстрировал наибольшую устойчивость ферментной системы к нефтяному загрязнению. Даже при максимальных концентрациях нефти с пластовой водой активность уреазы снижалась лишь на 35%, тогда как товарная нефть вызывала уменьшение активности на 17-31%. Мазут, керосин и бензин оказывали еще более мягкое воздействие

с уменьшением активности на 15-29, 13-25 и 11-23% соответственно. Примечательно, что во всех вариантах опыта с черноземом значения $НСР_{05}$ (2.96-4.02) были существенно выше, чем для других типов почв, что отражает большую стабильность ферментной системы этой почвы (рис. 2).

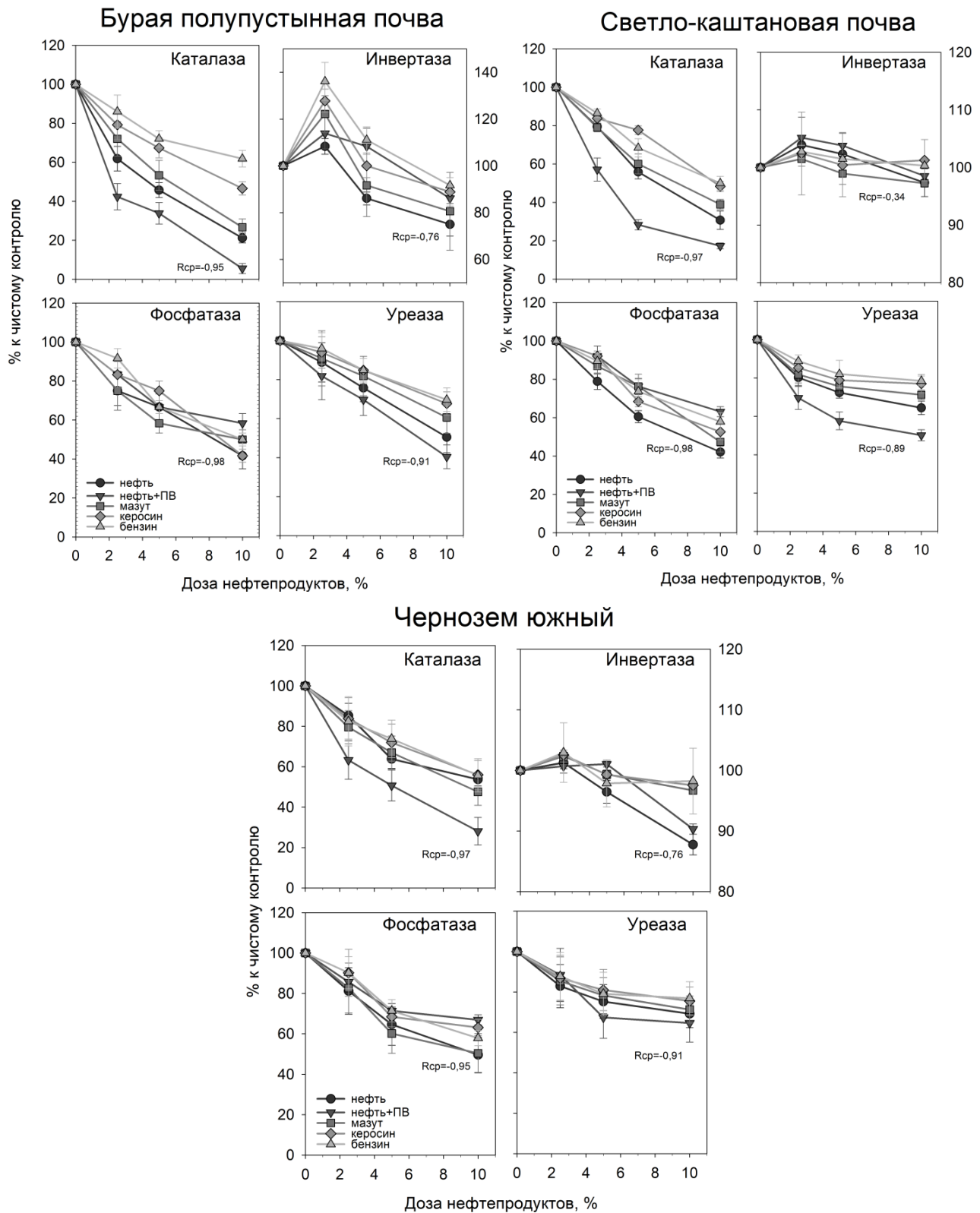


Рис. 2. Влияние загрязнения нефтью и нефтепродуктами на показатели ферментативной активности почв аридных территорий.

Общей закономерностью для всех типов почв стало сохранение иерархии токсического воздействия нефтепродуктов: нефть с пластовой водой > товарная нефть > мазут > керосин \approx бензин. При этом абсолютная степень угнетения уреазы существенно зависела от типа почвы, уменьшаясь в ряду: бурая полупустынная > светло-каштановая > чернозем южный. Эти различия коррелируют с основными агрохимическими показателями почв: содержанием гумуса, гранулометрическим составом и общей биологической активностью.

Активность инвертазы. Анализ активности инвертазы выявил сложную нелинейную реакцию фермента на нефтяное загрязнение, существенно отличающуюся от наблюдаемой для каталазы и уреазы. В бурой полупустынной почве с исходной активностью инвертазы 0.36 ± 0.02 мг глюкозы/г/24 ч отмечался парадоксальный эффект стимуляции при низких концентрациях загрязнителей (2.5-5%): активность увеличивалась на 8-36% для нефти с пластовой водой, 22% – для мазута, 28% – для керосина, 36% – для бензина. Лишь при 10% концентрации наблюдалось слабое ингибирование (6-25% снижения). Этот эффект может быть связан с временной активацией микробного сообщества в ответ на поступление легкодоступных углеродных субстратов.

В светло-каштановой почве (исходная активность 9.46 ± 0.08 мг глюкозы/г/24 ч) также отмечалась слабая стимуляция инвертазной активности (4-5%) при низких концентрациях нефтепродуктов (2.5%), сменяющаяся незначительным угнетением (3-9%) при 10% загрязнении. Наиболее стабильные показатели наблюдались при воздействии керосина и бензина, где даже при максимальных концентрациях активность снижалась всего на 1-3%, что статистически незначимо ($НСР_{05}$ 0.10-0.18).

Чернозем южный с его высокой исходной активностью инвертазы (38.96 ± 0.05 мг глюкозы/г/24 ч) продемонстрировал наиболее выраженный эффект стимуляции: при 2.5% концентрации загрязнителей активность увеличивалась на 1-3%, достигая максимума для бензина (+3%). При этом даже при 10% концентрации нефти с пластовой водой снижение активности не превышало 10%, а для других нефтепродуктов варьировало в пределах 2-7%. Уникальной особенностью чернозема стало практически полное отсутствие выраженного ингибирующего эффекта во всех вариантах опыта (рис. 2).

Общей закономерностью для всех типов почв стало отсутствие выраженного дозозависимого угнетения инвертазы в отличие от других ферментов, способность низких концентраций нефтепродуктов стимулировать активность фермента, значительно меньшая чувствительность инвертазы к нефтяному загрязнению по сравнению с каталазой и уреазой.

Активность фосфатазы. Исследование фосфатазной активности выявило выраженную чувствительность этого фермента к нефтяному загрязнению во всех типах почв, однако степень угнетения существенно варьировала в зависимости от типа почвы и характера загрязнителя. В бурой полупустынной почве (исходная активность 0.12 ± 0.01 мг P_2O_5 /г/ч) наблюдалось резкое дозозависимое снижение активности: при загрязнении товарной нефтью – на 25-58%, нефтью с пластовой водой – на 17-42%, мазутом – на 25-50%, керосином – на 17-58%, бензином – на 8-50%. Наибольшее угнетение отмечалось при максимальных концентрациях (10%) всех видов загрязнителей, причем наиболее токсичное воздействие оказывала товарная нефть.

Светло-каштановая почва (исходная активность 0.38 ± 0.02 мг P_2O_5 /г/ч) показала несколько иную картину: здесь фосфатаза оказалась более устойчивой, особенно к воздействию керосина и бензина. При 10% загрязнении активность снижалась на 32-58% для нефти и нефти с пластовой водой, на 53% – для мазута, но всего на 37-42% для керосина и бензина. Характерно, что даже при минимальных концентрациях (2.5%) наблюдалось статистически значимое снижение активности на 8-21%.

Чернозем южный с его высокой исходной активностью фосфатазы (1.33 ± 0.01 мг P_2O_5 /г/ч) продемонстрировал наибольшую устойчивость ферментной системы. Максимальное снижение активности при 10% загрязнении составило 50% для товарной нефти, 33% – для нефти с пластовой водой, 50% – для мазута, 37% – для керосина, 42% – для бензина. Примечательно, что в черноземе, в отличие от других почв, фосфатазная активность при низких концентрациях керосина и бензина (2.5%) практически не изменялась, снижение составило всего 2-10% (рис. 2).

Общей закономерностью для всех почв стало выраженное дозозависимое угнетение фосфатазной активности, сохранение иерархии токсичности загрязнителей «нефть > нефть с пластовой водой >

мазут > керосин \approx бензин», уменьшение степени ингибирования в ряду «бурая полупустынная > светло-каштановая > чернозем южный».

В результате исследования установлена универсальная иерархия токсичности нефтепродуктов для всех изучаемых ферментных систем: нефть с пластовой водой оказывает наиболее выраженное угнетающее действие, за ней следуют товарная нефть и мазут, тогда как керосин и бензин демонстрируют существенно меньшую токсичность. Эта закономерность проявляется независимо от типа почвы, хотя абсолютная степень воздействия варьирует в зависимости от почвенных характеристик. Наибольшая чувствительность к загрязнению наблюдается у каталазы и уреазы, которые реагируют выраженным дозозависимым снижением активности, в то время как инвертаза демонстрирует парадоксальную устойчивость и даже способность к активации при низких концентрациях загрязнителей, что связано, вероятно, с ее ключевой ролью в углеводном обмене и адаптационными механизмами почвенной микробиоты. Фосфатаза занимает промежуточное положение, проявляя умеренную чувствительность к нефтяному загрязнению.

Снижение интегрального показателя биологического состояния почв, как правило, находится в прямой зависимости от концентрации загрязняющих веществ в почве. По мнению С.И. Колесникова и соавторов (2001), наиболее информативными являются биологические показатели, прежде всего – показатели ферментативной активности. Они и должны лежать в основе ИПБС.

Интегральный показатель биологического состояния бурой полупустынной, светло-каштановой почв и чернозема при моделировании загрязнения их нефтью и нефтепродуктами в условиях лабораторного эксперимента был рассчитан по следующим биологическим показателям: всхожесть, длина корней, активность каталазы, активность уреазы и активность фосфатазы.

В результате настоящего исследования установлено, что максимальное снижение ИПБС бурых полупустынных почв зарегистрировано при загрязнении сырой нефтью. При максимальной дозе загрязняющего вещества ИПБС сокращается до 21% по сравнению с контролем. Нефтяное загрязнение бурой полупустынной почвы приводит к снижению исследуемого биологического показателя до 31% от контроля, загрязнение мазутом – до 40%. Загрязнение почв керосином и бензином вызывает схожее изменение значения ИПБС: интегральный показатель снижается до 53% при максимальной дозе керосина и до 51% при 10% концентрации бензина в почве. Даже низкие концентрации нефти и нефтепродуктов приводят к существенному снижению ИПБС бурых полупустынных почв. Так, исследуемый показатель снижается более чем на 10%, а это говорит о том, что данные загрязнители вызывают значительные изменения биологических свойств (рис. 3).

Аналогичная тенденция к снижению ИПБС установлена в светло-каштановой почве. Ее загрязнение максимальной дозой сырой нефти приводит к снижению значения ИПБС до 26%. Высокие концентрации товарной нефти приводят к снижению ИПБС до 41%. Загрязнение почв мазутом оказывает токсическое воздействие, значение интегрального показателя снижается до 47%. Керосин и бензин оказывают схожее негативное воздействие на светло-каштановые почвы, снижая значения ИПБС в среднем до 53% (рис. 3).

В изменении ИПБС чернозема южного при загрязнении нефтью и нефтепродуктами также прослеживается схожая тенденция. Наиболее существенные изменения интегрального показателя биологических свойств данных почв вызывает также сырая нефть – интегральный показатель снижается от 71 до 32%.

Нефтяное загрязнение приводит к снижению исследуемого показателя до 48%. Практически схожее негативное воздействие на изменение биологических показателей чернозема южного оказывает и мазутное загрязнение, при котором ИПБС снижается до 49%. Керосин и бензин оказывают практически идентичное воздействие на изменение биологического показателя чернозема южного, снижая его до 55% (рис. 3).

На основе ИПБС построен ряд по влиянию нефтепродуктов на изменение биологических свойств изученных почв:

- в бурой полупустынной почве: сырая нефть (21%) > товарная нефть (31%) > мазут (40%) > керосин (50%) = бензин (52%);
- в светло-каштановой почве: сырая нефть (26%) > товарная нефть (41%) > мазут (47%) > бензин (53%) = керосин (54%);

• в черноземе южном: сырая нефть (32%) > товарная нефть (48%) = мазут (49%) > бензин (54%) = керосин (55%).

На основе этих данных построен обобщенный ряд *сырая нефть* > *товарная нефть* > *мазут* > *бензин* = *керосин*. Цифры в скобках показывают степень снижения ИПБС после загрязнения и являются усредненными по всем дозам загрязнения (2.5, 5.0 и 10.0%). Чем выше значение в скобках, тем менее токсичное влияние оказывается на почвы.

Также на основе изменения ИПБС построен ряд устойчивости почв Калмыкии к загрязнению нефтью и нефтепродуктами: *чернозем южный* (72.4%) > *светло-каштановая почва* (66.0%) > *бурая полупустынная почва* (62.7%). Цифры в скобках показывают степень снижения ИПБС от чистого контроля при усреднении типа загрязнения (товарная нефть, сырая нефть, мазут, керосин и бензин). Чем выше значение в скобках, тем более устойчивы почвы к загрязнению.

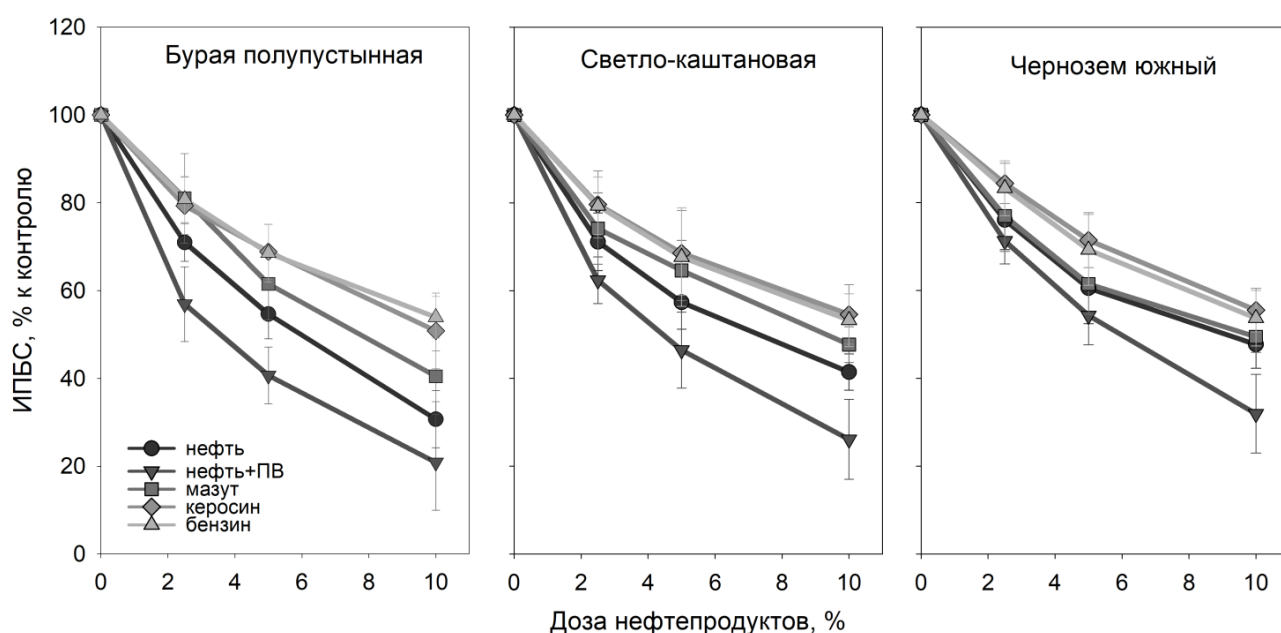


Рис. 3. Снижение ИПБС бурой полупустынной, светло-каштановой почв и чернозема южного при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

Выводы

Выявлены закономерности влияния нефти и нефтепродуктов на биологические свойства почв Республики Калмыкия. Показано, что все почвы, загрязненные нефтью и нефтепродуктами, как правило, проявляют высокую фитотоксичность по отношению к тест-растениям, а также в присутствии этих загрязнителей наблюдается ингибирование активности почвенных ферментов: каталазы, дегидрогеназы, уреазы и фосфатазы. Во всех трех почвах по степени влияния на изменение биологических свойств почв нефтепродукты располагаются в следующей последовательности: сырая нефть > товарная нефть > мазут > бензин = керосин. По устойчивости к загрязнению нефтью и нефтепродуктами почвы Калмыкии образуют следующий ряд: чернозем южный > светло-каштановая почва > бурая полупустынная почва.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондаренко А.Н. 2013. Геоэкологическая характеристика нижневолжского региона // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. № 3 (31). С. 198-202.

Волгоградская область в цифрах. 2023. Волгоград: Волгоградстат. 384 с.

- Галстян А.Ш. 1978. Определение активности ферментов почв: методические указания. Ереван. 55 с.
- ГОСТ 33061-2014. 2015. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения: тест на всхожесть семян и развитие проростков [Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/1200115879> (дата обращения 03.04.2025)].
- Колесников С.И., Гайворонский В.Г., Ротина Е.Н., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. 2010. Оценка устойчивости почв Юга России к загрязнению мазутом по биологическим показателям (в условиях модельного эксперимента) // Почвоведение. № 8. С. 995-1000.
- Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. 2001. Биоэкологические принципы мониторинга и нормирования загрязнения почв. Ростов-на-Дону: Центры валеологии вузов России. 64 с.
- Колесников С.И., Татлок Р.К., Тлехас З.Р. 2012. Влияние загрязнения нефтью, мазутом, бензином и дизельным топливом на биологические свойства дерново-карбонатных почв Западного Кавказа // Новые технологии. № 2. С. 97-101.
- Лазарева В.Г., Очирова П.Д., Сератирова В.В., Болдырева Д.А. 2012. Сохранение природного разнообразия Республики Калмыкия // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 14. № 1 (4). С. 1039-1042.
- Намысова А.Н., Сангаджиев М.М., Стаселько Е.Н., Куркудинова Н.А. 2013. Негативные последствия активизации геологических процессов // Вестник Прикаспия. № 2. С. 29-35.
- Околелова А.А., Мерзлякова А.С., Герман Н.В. 2014. Фитотоксичность нефтезагрязненных почв // Естественно-гуманитарные исследования. № 1 (3). С. 26-31.
- Республика Дагестан в цифрах. 2023. Махачкала: Дагестанстат. 468 с.
- Республика Калмыкия: Статистический ежегодник. 2023. Элиста: Астраханьстат. 164 с.
- Сангаджиев М.М., Хохлова Л.И., Сератирова В.В., Онкаев В.А. 2014. Край миражей: очаги опустынивания в Яшкульском районе Республики Калмыкия // Глобальный научный потенциал. № 6 (39). С. 118-120.
- Ставропольский край в цифрах. 2023. Ставрополь: Северо-Кавказстат. 88 с.
- Чеченская республика в цифрах. 2023. Грозный: Чеченстат. 156 с.
- Ansari N., Hassanshahian M., Ravan H. 2018. Study the Microbial Communities Changes in Desert and Farmland Soil after Crude Oil Pollution // International Journal of Environmental Research. Vol. 12. No. 3. P. 391-398.
- Buluktaev A.A. 2017. Phytotoxicity and Enzymatic Activity in Soils of Kalmykia under the Influence of Oil Pollution // South of Russia: Ecology, Development. Vol. 12. No. 4. P. 147-156.
- Buluktaev A.A. 2020. Study of Soil Enzymatic Activity of Oil Fields in the Republic of Kalmykia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 579. No. 012003.
- Gordon G., Stavi I., Shavit U., Rosenzweig R. 2018. Oil Spill Effects on Soil Hydrophobicity and Related Properties in a Hyper-Arid Region // Geoderma. Vol. 312. P. 114-120.
- Kim S.-J., Choi D.H., Sim D.S., Oh Y.-S. 2005. Evaluation of Bioremediation Effectiveness on Crude Oil-Contaminated Sand // Chemosphere. Vol. 59 (6). P. 845-852.
- Kolesnikov S.I., Spivakova N.A., Vezdeneeva L.S., Kuznetsova Yu.S., Kazeev K.Sh. 2013. Effect of Model Oil Pollution on Biological Properties of Soils of Dry Steppes and Semi-Deserts of Southern Russia // Arid Ecosystems. Vol. 3. No. 2. P. 101-105. [Колесников С.И., Спивакова Н.А., Возденеев Л.С., Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. 2013. Влияние модельного загрязнения нефтью на биологические свойства почв сухих степей и полупустынь юга России // Аридные экосистемы. Т. 19. № 2 (55). С. 58-63.]
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Revina S.V. 2023. Enzymatic Assessment of the State of Oil-Contaminated Soils in the South of Russia after Bioremediation // Toxics. Vol. 11. No. 4. P. 355.
- Miralles I., Domingo F., Cantón Y., Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Gil-Sotres F. 2012. Hydrolase Enzyme Activities in a Successional Gradient of Biological Soil Crusts in Arid and Semi-Arid Zones // Soil Biology and Biochemistry. Vol. 53. P. 124-132.
- Ştefanic G., Tomescu E., Jarnea S. 1965. Total Phosphatase Capacity // Symposium on Methods in Soil Biology. Bucharest: Romanian National Society of Soil Science. P. 145-149.