

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи



РЫБАЛКИНА ЕКАТЕРИНА ИГОРЕВНА

**ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОЕМОВ
БАССЕЙНА ДОНА НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ЮГА
РОССИИ**

1.5.15 Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования
Академии биологии и медицины имени Д.И. Ивановского
Южного федерального университета

Научный руководитель: **Казеев Камиль Шагидуллович,**
доктор географических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет», Академия
биологии и медицины им. Д.И. Ивановского,
директор

Официальные оппоненты: **Фаизова Вера Ивановна,**
доктор сельскохозяйственных наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ставропольский государственный аграрный
университет», Институт аграрной генетики и
селекции, лаборатория почвенной микробиологии
НПЦ Агробиотехнологий, заведующая;

Булышева Наталья Ивановна,
кандидат биологических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Федеральный исследовательский
центр Южный научный центр Российской академии
наук», Отдел океанологии и географии, лаборатория
гидробиологии, ведущий научный сотрудник.

Защита диссертации состоится **24 сентября 2026 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.14 по биологическим наукам на базе Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1356834/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО, учёной степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 804, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.14 Тимошенко А.Н., а также в формате .pdf на e-mail: atimoshenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимошенко Алёна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы – дноуглубительные работы на водных территориях России ежегодно образуют значительные объемы извлекаемых донных отложений (ДО). В бассейне Нижнего Дона и на Азово-Донском морском канале они носят постоянный характер и проводятся для поддержания судоходных глубин (Хованский и др., 2018). В настоящее время утилизация ДО требует финансовых затрат на транспортировку и захоронение извлечённого материала. Согласно Приказу Росприроднадзора № 242 от 22.05.2017 (ред. от 20.12.2024), ДО при извлечении и размещении на суше рассматриваются как отходы IV–V классов опасности, что влечёт требования лицензирования, учёта и платы за негативное воздействие, тогда как размещение в подводных отвалах в соответствии с Водным кодексом РФ не относится к отходам производства и потребления. Данная правовая коллизия создаёт нормативную неопределённость в системе обращения.

Между тем зарубежные исследования доказывают высокий агроэкологический потенциал незагрязнённых ДО. Их применение на различных типах почв обеспечивает прирост растительной биомассы (вплоть до двукратного увеличения), сопоставимый с действием стандартных доз минеральных удобрений, что обусловлено высоким содержанием азота и калия в осадках. При этом вовлечение ДО в повторный оборот позволяет снизить затраты аграриев на минеральное питание растений в среднем до 29 % (Kiani et al., 2021; Braga et al., 2024). Согласно оценкам Panagos et al. (2024), ежегодный экономический ущерб только от заиления водохранилищ в ЕС составляет 5–8 млрд евро. В России подобные исследования проводились исключительно на озёрных сапропелях (Дмитриев и др., 2024; Румянцев и др., 2024), тогда как речные донные отложения изучены слабее.

Значительный вклад в изучение донных отложений (ДО) бассейна Дона и Азовского моря внесен школой Ю. А. Федорова (2007–2021), установившей закономерности газового режима, миграции ртути, тяжелых металлов и трансформации органического вещества в системе «вода – донные отложения». Исследования углеродного баланса региона развиваются на карбоновом полигоне «Цимлянское водохранилище» (Усова и др., 2026). В литературе выделяют два направления изучения ДО: мониторинговое, оценивающее их как индикатор загрязнения водных экосистем (Линник и др., 2000; Закруткин и др., 2020; Konstantinova et al., 2024), и сельскохозяйственное, сфокусированное на озерных осадках и сапропелях (Kazberuk et al., 2021; Gmitrowicz-Iwan et al., 2023). Для ДО Нижнего Дона комплексных исследований, сочетающих токсикологический и агрохимический анализ с оценкой долгосрочного влияния

на биологические свойства зональных почв Юга России, не проводилось. Имеющиеся региональные работы оценивают лишь загрязнение самих ДО или краткосрочные эффекты для отдельных почв (Павленко и др., 2017; Барабашин и др., 2019). Отсутствует единый подход к оценке эффективности и безопасности одних и тех же ДО на контрастных почвах в стандартизованных условиях.

Отдельной проблемой остаётся нормативная неурегулированность: в Российской Федерации отсутствует законодательно закреплённая система нормативов качества ДО для их сельскохозяйственного применения, а существующие подходы — сравнение с ПДК для почв, расчёт суммарного показателя загрязнения Z_c , использование международных стандартов качества осадков — носят разрозненный характер (Ушакова и др., 2024). В ЕС донные отложения до сих пор не включены в перечень разрешённых компонентных материалов для удобрений (Регламент ЕС 2019/1009), несмотря на доказанный агрономический потенциал (Renella, 2021).

Особого внимания заслуживает ремедиационный аспект применения донных отложений. ДО бассейна Нижнего Дона характеризуются высоким содержанием органического вещества (до 7 %), карбонатов (CaO до 27 %), глинистых минералов и аморфных оксидов железа (Павленко и др., 2017; Хованский и др., 2018; Konstantinova et al., 2024). Это создает теоретические предпосылки для одновременной иммобилизации тяжелых металлов и стимуляции биodeградации нефтепродуктов (Peng et al., 2018). Систематических экспериментальных проверок этой способности на контрастных почвах (чернозем и серопески), загрязненных Cr , Pb и нефтью, ранее не проводилось. Поэтому исследование влияния ДО бассейна Дона на экологическое состояние почв Юга России актуально в научном отношении — для выявления закономерностей трансформации биологических свойств контрастных почв, и в практическом — как основа регламентов безопасного использования ДО в качестве вторичного материального ресурса.

Цель работы — изучение влияния внесения донных отложений водоемов бассейна Дона на экологическое состояние почв Юга России.

Основные задачи исследования:

1. Оценить влияние ДО на экологическое состояние чернозема обыкновенного, бурой лесной, светло-каштановой, каштановой, песков, серопесков.
2. Обосновать оптимальные и пороговые дозы внесения ДО и рекомендации по их применению с учётом свойств почв.
3. Определить наиболее чувствительные и наиболее информативные показатели биологического состояния почв при внесении донных отложений.

4. Провести сравнительную оценку эффективности применения донных отложений для стимуляции биологических показателей и мелиорации в разных зональных почвах Юга России: черноземе обыкновенном, бурой лесной, светло-каштановой, каштановой, песках, серопесках.

5. Оценить ремедиационный потенциал донных отложений для восстановления биологической активности чернозёма обыкновенного и серопесков, загрязнённых хромом, свинцом и нефтью, выявить зависимость ремедиационного эффекта от типа загрязнителя и буферных свойств исходной почвы.

Основные защищаемые положения:

1. Исследуемые донные отложения бассейна Нижнего Дона характеризуются допустимым уровнем содержания тяжёлых металлов и ПАУ и могут применяться в качестве органоминерального удобрения при контроле содержания потенциально опасных веществ.

2. Оптимальные дозы внесения донных отложений составляют от 50 до 200 т/га для большинства исследованных почв (чернозём, серопески, светло-каштановая, каштановая). Исключением являются пески, где эффективной является доза 500 т/га, и бурая лесная почва, для которой уже при 100 т/га зафиксировано угнетение роста растений, что требует дальнейшего изучения более низких доз. Пороговые дозы, превышение которых приводит к нарушению экологических функций почв, существенно различаются для разных типов почв.

3. Среди биологических показателей наиболее информативным показателем оценки воздействия ДО на почву является активность дегидрогеназ. Активность инвертазы служит чувствительным индикатором нарушений биологической активности, а наиболее чувствительным показателем фитотоксического эффекта является длина корней тест-культуры.

4. Донные отложения обладают ремедиационным потенциалом и способствуют частичному восстановлению биологической активности почв, загрязнённых тяжёлыми металлами и нефтью. Наиболее выраженный восстановительный эффект проявляется в серопесках, характеризующихся низкой буферностью и высокой чувствительностью к загрязнению.

Научная новизна и теоретическая значимость – впервые для донных отложений водоёмов бассейна Нижнего Дона выполнена комплексная оценка их влияния на биологическое состояние широкого спектра зональных почв Юга России в лабораторных и полевых экспериментах. Обоснованы оптимальные и пороговые дозы внесения ДО для различных типов почв и выявлены лимитирующие факторы применения (засоление, дисбаланс ферментативной активности, почвоспецифическая чувствительность). Показано, что активность

дегидрогеназ является устойчивым маркером дозозависимого эффекта и сохраняется в последствии, а инвертаза как чувствительный индикатор нарушения углеводного обмена почвенных микроорганизмов (в том числе при засолении/высоких дозах), тесно связанный с ростом растений. Впервые для контрастных почв (чернозём и серопески) экспериментально оценён ремедиационный потенциал ДО при загрязнении Cr, Pb и нефтью.

Практическая значимость – результаты исследования могут быть задействованы для оценки воздействия на окружающую среду текущей и намечаемой деятельности по очистке и дноуглублению водоемов.

Полученные эффективные дозы по применению ила в качестве удобрения могут быть использованы в высокопродуктивном экологичном сельском хозяйстве, в том числе сорбционные особенности ила могут применяться при рекультивации почв, загрязненных ПАУ, ТМ и нефтепродуктами.

Личный вклад автора – в диссертации представлены результаты исследований, проведенных в 2022–2026 гг. Название, цель, задачи, объекты и методы исследования подобраны и проанализированы автором совместно с научным руководителем. Полевые эксперименты проведены автором лично, совместно с научным руководителем. Лабораторные модельные эксперименты, а также аналитические исследования были проведены автором лично. Анализ и описание результатов исследования, написание выводов и защищаемых положений выполнено автором лично при участии научного руководителя.

Соответствие паспорту специальности – диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.15 Экология (биологические науки) в части пункта 10: «Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы. Биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экоотоксикология). Разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг. Разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу».

Апробация диссертации – основные положения и результаты исследования представлены на международных и всероссийских конгрессах, конференциях и школах, в том числе на: Международной научной конференции к 95-летию Ботанического сада ЮФУ (Ростов-на-Дону, 2022); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Ростов-на-Дону, 2022–2025); III Международной молодежной научной школе «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (Геленджик, 2024); II Международной научной конференции «Проблемы и перспективы устойчивого развития почвенного покрова горных и равнинных

территорий» (Геленджик, 2024); Ежегодной конференции «Неделя науки ЮФУ» (Ростов-на-Дону, 2024); IX Международной научно-практической конференции к 55-летию ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии (Курск, 2025); IV Международной научной конференции «Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве» (Ростов-на-Дону, 2026); Всероссийской научной конференции «Наука Юга России: достижения и перспективы» (Ростов-на-Дону, 2026).

Публикации – по теме диссертационного исследования опубликовано 24 научные работы, из которых 4 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 1 монография и 1 база данных.

Структура и объем работы – диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и списка литературы. Работа представлена на 196 страницах, содержит 33 рисунка и 25 таблиц. Список литературы включает 205 источников, в том числе 90 на иностранных языках.

Конкурсная поддержка работы – исследование выполнено при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета «Приоритет 2030» (СП-12-22-10, СП-12-23-01) и Президентом Российской Федерации (НШ-2511.2020.11, МК-175.2022.5).

Благодарности – автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность своему научному руководителю, д.г.н., профессору Казееву К. Ш. за всестороннюю помощь и поддержку, мудрое научное руководство и ценные советы на всех этапах выполнения данной диссертационной работы; д.с.-х.н., профессору Колесникову С. И. за создание благоприятных условий для проведения исследований на базе кафедры; ведущему научному сотруднику, к.б.н. Солдатову В. П. за неоценимую помощь в полевых исследованиях; д.г.н., директору ЮНЦ РАН Бердникову С. В. за предоставление образцов донных отложений; старшему преподавателю Шерстневу А. К. за помощь в определении содержания тяжелых металлов; д.б.н., профессору Сушковой С. Н. и научному сотруднику Дудниковой Т. С. за помощь в определении содержания полициклических ароматических углеводородов; а также всем сотрудникам кафедры экологии и природопользования Южного федерального университета за поддержку, доброжелательную атмосферу и содействие в выполнении исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ВТОРИЧНЫЙ РЕСУРС ДЛЯ АГРОЭКОСИСТЕМ

В главе обобщены современные представления о донных отложениях как об объекте экологического мониторинга и вторичном ресурсе для агроэкосистем, включая их генезис, экологические функции, классификации, химический состав и загрязнение, методы оценки качества, мировой и отечественный опыт использования в сельском хозяйстве, ремедиационный потенциал, а также особенности бассейна Дона и почв Юга России.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках диссертационной работы были проведены комплексные полевые и лабораторные исследования экологического состояния почв Юга России при внесении донных отложений. Объектами послужили почвы Юга России и песчаный субстрат (далее — пески) (табл. 1). Источниками донных отложений служили водные объекты бассейна Нижнего Дона: реки Дон и Аксай, Цимлянское водохранилище, Таганрогский залив и гирло Свиное, а также сапропель (ООО ТПК «Камский сапропель»). Отбор проб ДО выполняли в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 и РД 52.24.609-2013 с использованием дночерпателя Петерсена, проточного гидрологического зонда и ручного пробоотбора. В почвенных экспериментах использовали только ДО р. Аксай, р. Дон и сапропель; остальные пробы привлекались для оценки регионального фоновых состава и уровня загрязнения.

Для изучения влияния ДО на биологическую активность, фитотоксичность и агрохимические свойства почв была поставлена серия из шести модельных и полевых опытов. Опыт № 1 (каштановая почва + сапропель, дозы 100–500 т/га, экспозиция 5 месяцев, 9-кратная повторность) служил для отработки методов и подбора чувствительных биологических индикаторов. В опыте № 2 (чернозём и серопески + ДО р. Дон, дозы 50–1000 т/га и 100 % ил, 1 месяц, 6-кратная повторность) определяли оптимальные дозы и оценивали реакцию контрастных почв.

Таблица 1 – Физико-химическая и биологическая характеристика исследованных почв и субстратов Юга России

Объект исследования	Наименование по WRB, 2015	Экосистема	Место отбора	Координаты	pH	Содержание гумуса, %	Гранулометрический состав	Активность дегидрогеназы	Активность инвертазы	Содержание азота (%) (валовое)	Содержание фосфора (мг/кг) (подвижное)	Содержание калия (мг/кг) (подвижное)
Чернозем	Chernozem	пашня	Ботанический сад ЮФУ, Ростовская область	47°14'13" с.ш. 39°39'12" в.д.	7,9	3,5	тяжелосуглинистый	39,8	2,24	0,23-0,45	10-40	300-500
Серопески (Псаммозем гумусовый)	Arenosols (Anthric)	пашня	станция Верхнекундрюченская, Усть-Донецкий р-н, Ростовская область	47.778577, 40.846692	7,5	3,5	супесчаный	33,2	10,5	0,02-0,05	30-60	50-70
Серопески (Псаммозем гумусовый)	Arenosols	залежь	Каменск-Шахтинский, Каменский р-н Ростовская область	48.244008, 40.161574	7,5	1,68	супесчаный	66,4	6,17	0,02-0,05	30-60	-
Песчаный субстрат (пески)	Arenosols	пастбище	станция Нижнекундрюченская, Усть-Донецкий р-н, Ростовская область	47.748396, 40.947241	7,5	0,034	песчаный	17,6	9,75	0,02-0,05	30-60	-
Светло-каштановая почва	Calcisols	пастбище	с.Дивное, Ремонтненский район, Ростовская область	46.486658, 43.459173	7,5	1,35	среднесуглинистый	30,3	5,46	0,1-0,13	8-25	300-500
Каштановая почва	Kastanozem	пастбище	Орловский р-н, Ростовская область	46.714848, 42.334743	7,8	0,13	тяжелосуглинистый	7,06	44,9	0,12-0,15	8-25	250-500
Бурозем кислый (бурая лесная почва)	Cambisols	буково-грабовый лес	пос.Никель, Республика Адыгея	44.177272, 40.155951	5,4	5,94	суглинистый	13,9	4,27		190	-

На основе результатов опыта № 2 был заложен полевой микроделяночный опыт № 3 (чернозём + ДО р. Аксай, дозы 50, 100 и 200 т/га, трёхкратная повторность) с озимой пшеницей сорта Бумба-ЭС, в котором в ключевые фазы вегетации отслеживали биометрические показатели, дыхание почвы и ферментативную активность.

В опыте № 4 (светло-каштановая, бурая лесная почвы, серопески, пески + ДО реки Аксай в дозах 100 и 500 т/га, экспозиция 1 и 6 месяцев, 6-кратная повторность) выявляли особенности отклика почв и песчаного субстрата. Для оценки последствий на том же участке в 2025 году проведён опыт № 5 с горохом сорта Аксайский усатый 55. В опыте № 6 (чернозём и серопески) моделировали загрязнение хромом (1000 мг/кг), свинцом (1500 мг/кг) и нефтью (5 %) для изучения ремедиационного потенциала ДО реки Аксай в дозе 100 т/га (1 месяц, 6-кратная повторность). Комплекс показателей включал физико-химические (гумус по Тюрину, pH водной вытяжки, валовой состав на «Спектроскан МАКС-GVM», влажность, температура), биологические (эмиссия CO₂, активность дегидрогеназ, инвертазы по Хазиеву, каталазы по Галстяну, фосфатазы и уреазы) параметры и фитотоксичность (всхожесть, длина корней и проростков, биомасса) тест-культур: озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L., сорта Бумба-ЭС и Алексеич), гороха посевного (*Pisum sativum* L., сорт Аксайский усатый 55) и ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L., сорт Ратник). Определения выполняли по ГОСТ Р ИСО 18763-2019 и апробированным методикам. Статистическую обработку проводили в Microsoft Excel 2019 и R 4.3.2 с расчётом средних значений, ошибок и 95%-х доверительных интервалов. Группы сравнивали с помощью дисперсионного анализа (критерий Тьюки) либо критериев Краскела–Уоллиса и Данна. Корреляционный анализ выполняли по Пирсону или Спирмену, величину эффекта оценивали коэффициентом d Коэна.

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОЕМОВ БАССЕЙНА ДОНА

В главе 3 представлены результаты изучения состава, содержания загрязняющих веществ и фитотоксичности ДО водных объектов бассейна Нижнего Дона (рек Дон и Аксай, Цимлянского водохранилища, Таганрогского залива и гирла Свиное) для оценки их пригодности в качестве органоминеральных удобрений и мелиорантов. Валовой состав ДО, определенный рентгенофлуоресцентной спектрометрией, преимущественно силикатно-карбонатный: SiO₂ варьирует от 31 до 86%, CaO — от 1,4 до 26,5%, Al₂O₃ — от 1,2 до 13,3%, Fe₂O₃ — от 0,6 до 6,8%. Содержание C_{орг} составляет 0,05–4,3%, что относит большинство проб к минеральным или органоминеральным

образованиям. Реакция среды — от слабокислой до слабощелочной (рН 6,8–8,3). Наиболее карбонатными являются отложения Цимлянского водохранилища (ст. 1: СаО — 26,5%, SiO₂ — 31,2%), тогда как в русле Дона и на ст. 6 водохранилища преобладают песчаные фации (SiO₂ до 86,4%). В Таганрогском заливе отложения неоднородны: наряду с глинистыми илами (Al₂O₃ до 13,3%) встречаются кварцевые пески (SiO₂ до 84,6%) и ракушечники (СаО до 13,2%). В гирле Свином доминируют песчано-алевритовые фракции (SiO₂ — 52–71%, СаО — 3,9–12,9%). Такая вариабельность обусловлена особенностями гидродинамического режима, удаленностью от береговых источников поступления вещества и накоплением ракушечника (табл. 2–4).

Таблица 2 – Валовой состав ДО исследованных водных объектов, %

Водный объект / Станция	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
Цимлянское вдхр. (ст. 1–9) диапазон	31,2–86,4	1,2–11,9	0,6–5,1	1,4–26,5	0,4–1,8	0,05–0,53
в среднем по вдхр.	58,3	7,2	3,4	12,7	1,3	0,28
р. Аксай	61,4	9,3	3,2	7,3	1,6	0,23
р. Дон	74,4	4,6	1,5	4,5	1,0	0,13

Таблица 3 – Валовой состав ДО Таганрогского залива по типам осадков, %

Тип донных отложений	Примеры станций	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
Кварцевые пески	ст. 0 км, 180	84,6	0,1–0,8	0,5–4,5	0,1–0,8	0,0–0,2	0,0
Карбонатные ракушечники	ст. 142	43,8	11,8	5,4	13,2	2,0	0,2
Глинистые илы и алевриты	ст. 1–21 (выб.)	48,9–73,5	4,0–13,3	1,2–6,8	1,3–8,3	0,9–2,3	0,2–0,3
в среднем по заливу (все 22 ст.)	—	58,6	9,5	4,2	4,5	1,7	0,2

Таблица 4 – Валовой состав ДО гирла Свиное, %

Станции	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
ст. 1–7 (диапазон)	52,2–71,4	5,8–9,5	1,9–3,7	3,9–12,9	1,2–1,7	0,13–0,28
в среднем по гирлу	61,2	8,3	3,1	7,5	1,6	0,22

Концентрации тяжелых металлов (ТМ) в ДО рек Дон, Аксай и Цимлянского водохранилища не превышают почвенных нормативов, кроме локального четырехкратного превышения ПДК по Zn (409 мг/кг) и повышенного содержания Mn (1,5–1,8 ПДК). Величина Zс (1,4–6,6) соответствует допустимой категории загрязнения (Zс < 16). В Таганрогском заливе выявлено систематическое превышение ПДК по Cr и Pb, локально — по Cu и Zn; в гирле Свином — по Cr и Zn. Распределение металлов указывает на их аккумуляцию на участках с низкими скоростями течения и вблизи промышленных источников (табл. 5).

Таблица 5 – Содержание тяжелых металлов в ДО исследованных объектов, мг/кг

Водный объект / Станции	Mn	Zn	Cr	Cu	Pb
Цимлянское вдхр. (ст. 1–9)	172,6–2653,1	25,0–409,9*	4,5–112,1	1,0–44,9	0,0–26,3
р. Аксай	744,2	99,5	93,5	27,0	—
р. Дон	449,2	51,3	29,3	10,5	12,6
Таганрогский залив:					
глинистые илы (ст. 1–21)	280,4–865,3	36,2–105,1	47,8–189,4	8,8–59,0	25,2–65,4
кварцевые пески (ст. 22)	113,4	16,9	9,1	—	51,6
гирло Свиное (ст. 1–7)	401,2–998,3	52,8–123,5	52,1–200,1	13,9–31,1	14,4–29,6
ПДК / ОДК для почв	1500	100	90	33	32

Примечание. Локальный максимум в ст. 5 составляет 409,9 мг/кг.

Анализ ПАУ показал высокую долю низкомолекулярных соединений (фенантрен, флуорен, бифенил). Содержание флуорена и фенантрена превышало пороговый уровень ISQG в 1,8–6 раз, но не достигало уровня вероятного эффекта PEL. Концентрация бенз(а)пирена — в пределах нормы (до 2 ПДК в р. Аксай). Сумма 9 приоритетных ПАУ ниже PEL. Молекулярный состав свидетельствует о преимущественно техногенном происхождении ПАУ, связанном с судоходством и промышленными выбросами (табл. 6).

Таблица 6 – Содержание приоритетных ПАУ и бенз(а)пирена в ДО, нг/г

Водный объект / Станции	Бифенил	Флуорен	Фенантрен	Бенз(а)пирен	Сумма ПАУ	Доля ПДК по бенз(а)пирену*
Цимлянское вдхр. (ст. 2–8)	63–445	257–315	466–516	2–21	953,4–1522,9	0,1–1,0
р. Аксай	417	339	530	43	1816,3	2,2
р. Дон	232	274	455	16	1116,0	0,8
Норматив ISQG / ПДК	—	21,2	86,7	20,0 (ПДК)	—	1,0

Примечание. Расчет долей ПДК бенз(а)пирена проведен относительно почвенного норматива (20 нг/г).

Фитотоксичность ДО оценивали по длине корней и проростков озимой пшеницы на чистом субстрате (100% ДО). Все пробы достоверно ингибировали рост корней на 9–76%. Однако в модельных опытах при смешивании ДО с почвой в дозах 50–600 т/га угнетения растений не наблюдалось, а в ряде вариантов отмечен стимулирующий эффект. Следовательно, выявленная фитотоксичность не препятствует использованию ДО в рекомендуемых дозах. Сравнение с ГОСТ Р 54000-2010 показало соответствие проб нормативу по содержанию Fe, Ca и K. Часть образцов имеет пониженные уровни валового фосфора ($P_2O_5 < 0,2\%$) и органического вещества, что снижает их удобрительную ценность; по Zn и Mn отдельные пробы относятся ко II классу пригодности. Агрономический потенциал ДО обеспечивают органическое вещество (до 4,3%), валовые формы фосфора (до 0,53% P_2O_5) и калия (до 1,8% K_2O), способные снизить потребность в фосфорно-калийных удобрениях. Таким образом, изученные ДО бассейна Нижнего Дона

представляют собой преимущественно органоминеральные карбонатные илы. Уровень загрязнения ТМ и ПАУ относится к допустимой категории; фитотоксичность проявляется только при прямом контакте. Наиболее перспективны отложения с высоким содержанием органики и фосфора из участков с минимальной антропогенной нагрузкой. Для ДО Таганрогского залива и гирла Свиного необходим обязательный контроль Сг и Рb.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ, ПЕСКОВ

В главе 4 представлены результаты комплексной оценки влияния ДО рек Дон и Аксай, а также сапропеля на биологическую активность, фитотоксичность и агрохимические свойства почв и песчаного субстрата в серии лабораторных и полевых экспериментов. Основными индикаторами служили активность дегидрогеназы и инвертазы, эмиссия CO₂, содержание органического и активного углерода, а также биометрические показатели тест-культур (озимая пшеница, горох, яровой ячмень).

Каштановая почва (сапропель) – внесение сапропеля в дозах 100–500 т/га повышало активность дегидрогеназы на 10–11 % и фосфатазы на 28–35 %, но угнетало инвертазу (на 23 %) и уреазу (на 35 %) при максимальной дозе. Дыхание почвы при высоких дозах устойчиво снижалось. Фитомасса ячменя при 500 т/га увеличивалась на 89 %, однако через 3 месяца эффект ослабевал. Интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) для всех доз составил 110–111 % от контроля. Оптимальной признана доза 100 т/га (рис. 1).

Чернозём обыкновенный – в лабораторном опыте с ДО р. Дон (50–1000 т/га) и полевом опыте с ДО р. Аксай (50–200 т/га) установлен выраженный дозозависимый эффект. Активность дегидрогеназы устойчиво повышалась во всех вариантах: на 35–60 % в лаборатории и на 31–73 % в поле, причём положительное последствие (опыт с горохом через 2 года) сохранялось на уровне 23–35 % ($p < 0,01$). Дыхание почвы в лабораторных условиях в первые 7–10 дней возрастало в 2–3,5 раза, в полевых – достигало максимума в фазы кущения и трубкования пшеницы. Доза 100 т/га обеспечивала наиболее сбалансированную стимуляцию: длина колоса увеличивалась на 21,6 %, количество зёрен – на 23 %, урожайность озимой пшеницы – на 21,9 %. Высокие дозы (>500 т/га) вызывали фитотоксичность и стресс. Инвертаза отличалась нелинейным откликом. Активность дегидрогеназы признана наиболее стабильным и чувствительным индикатором (рис 2-3).

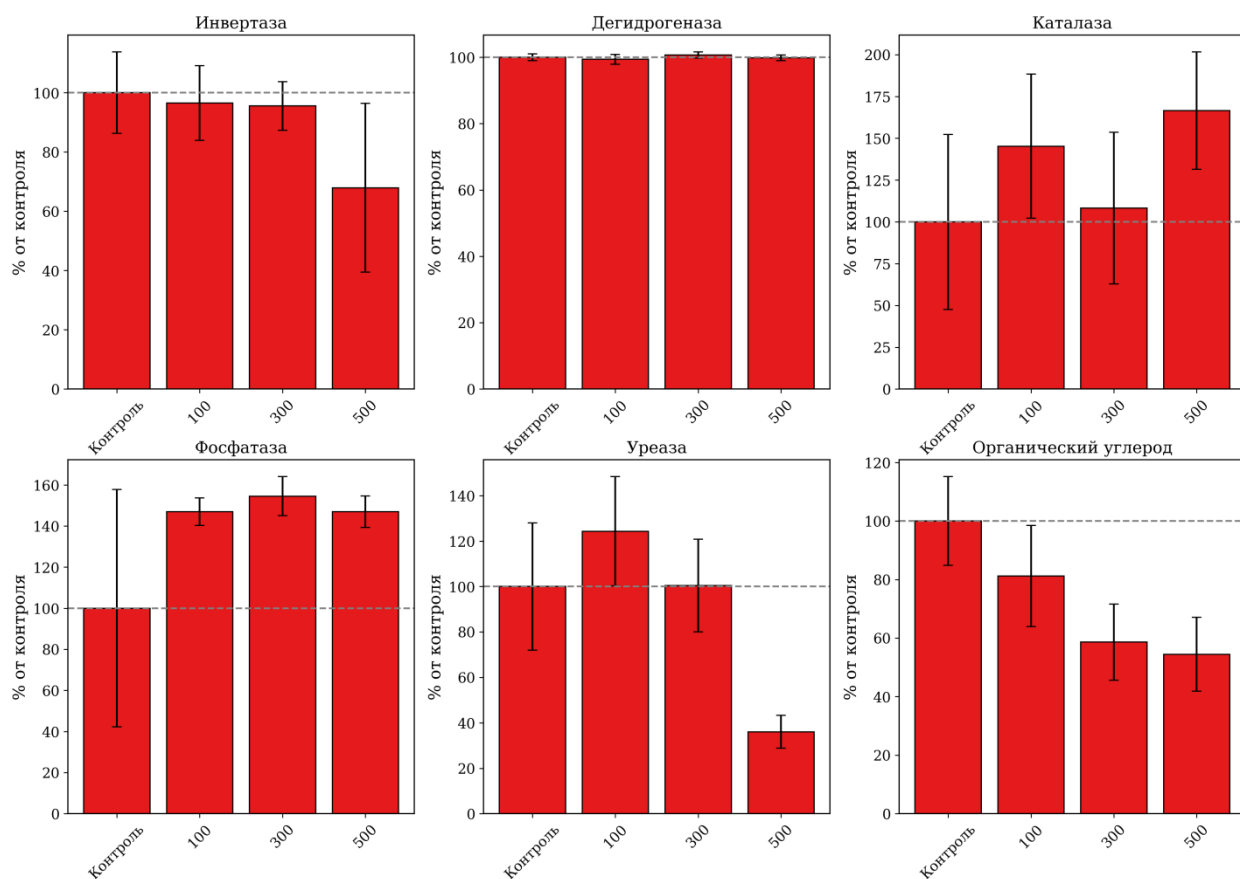


Рисунок 1 – Ферментативная активность каштановой почвы и содержание органического углерода при внесении различных доз сапропеля.; по оси абсцисс – доза сапропеля, т/га

Чернозём (лабораторный опыт)

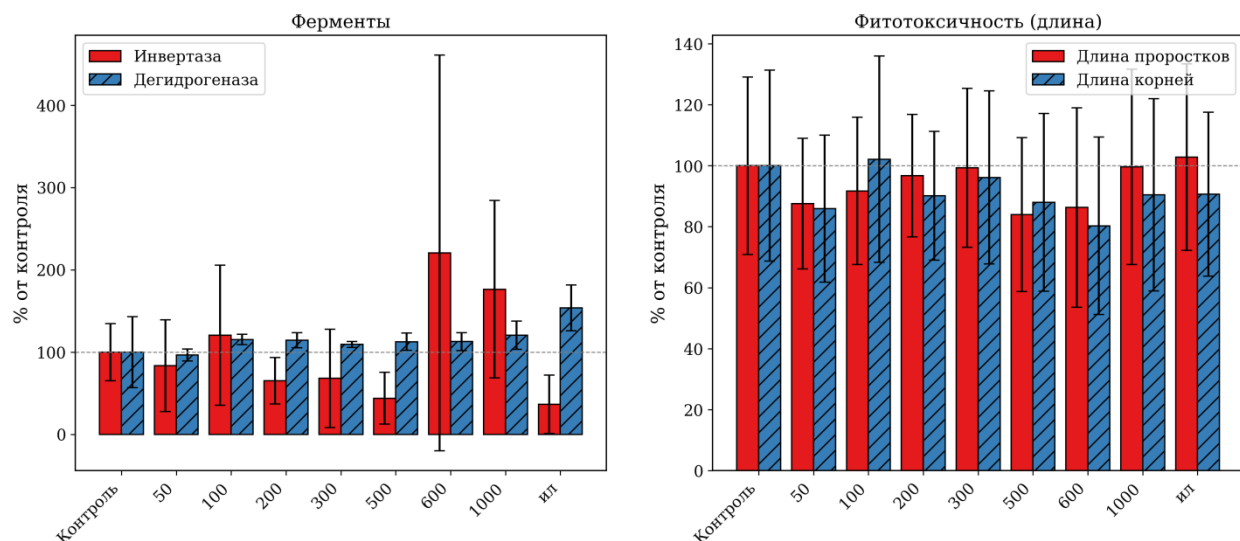


Рисунок 2 – Ферментативная активность (инвертаза, дегидрогеназа) и показатели начального роста (длина проростков, длина корней) чернозёма обыкновенного при внесении различных доз донных отложений; по оси абсцисс – доза донных отложений, т/га

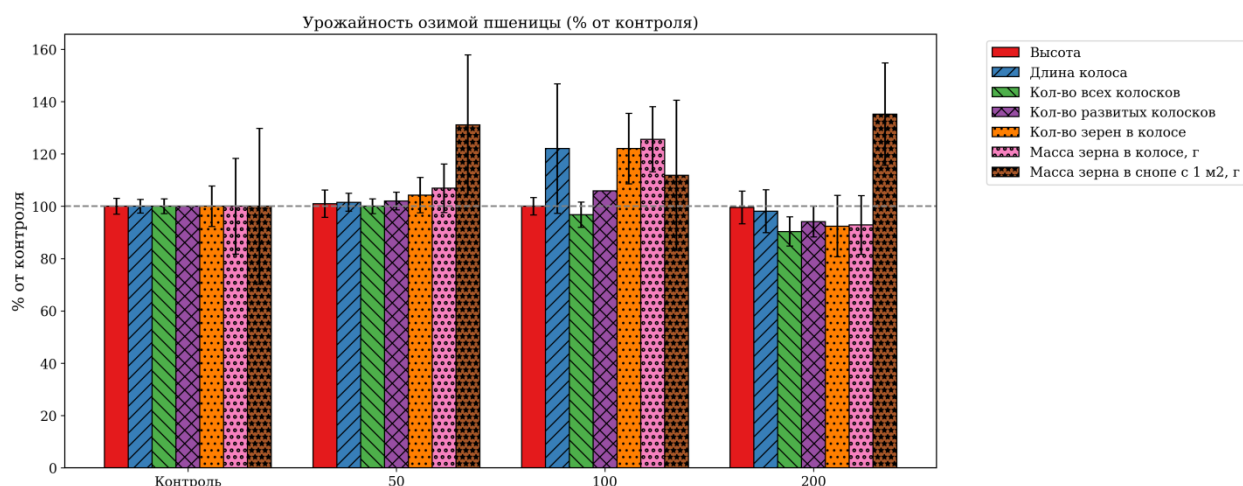


Рисунок 3 – Урожайность озимой пшеницы при внесении донных отложений в чернозем (полевой опыт, Ботанический сад ЮФУ); по оси абсцисс – доза внесения, т/га

Серопески (залежь и пашня) – при внесении ДО р. Дон в залежные серопески оптимальной оказалась доза 50 т/га (прирост длины проростков +31,5 %, фитомассы +56,8 %). ДО р. Аксай в пахотные серопески давали максимальную стимуляцию роста при 100 т/га (+73,0 %), но угнетали рост при 500 т/га (-9,6 %). Активность дегидрогеназы возрастала с дозой (до +211 %), однако инвертаза подавлялась при высоких дозах (на 71 % при 1000 т/га), что коррелировало с повышением содержания солей. Критическим лимитирующим фактором выступало засоление при дозах >500 т/га. Рекомендованы стартовые дозы 50–150 т/га (рис 4-5).

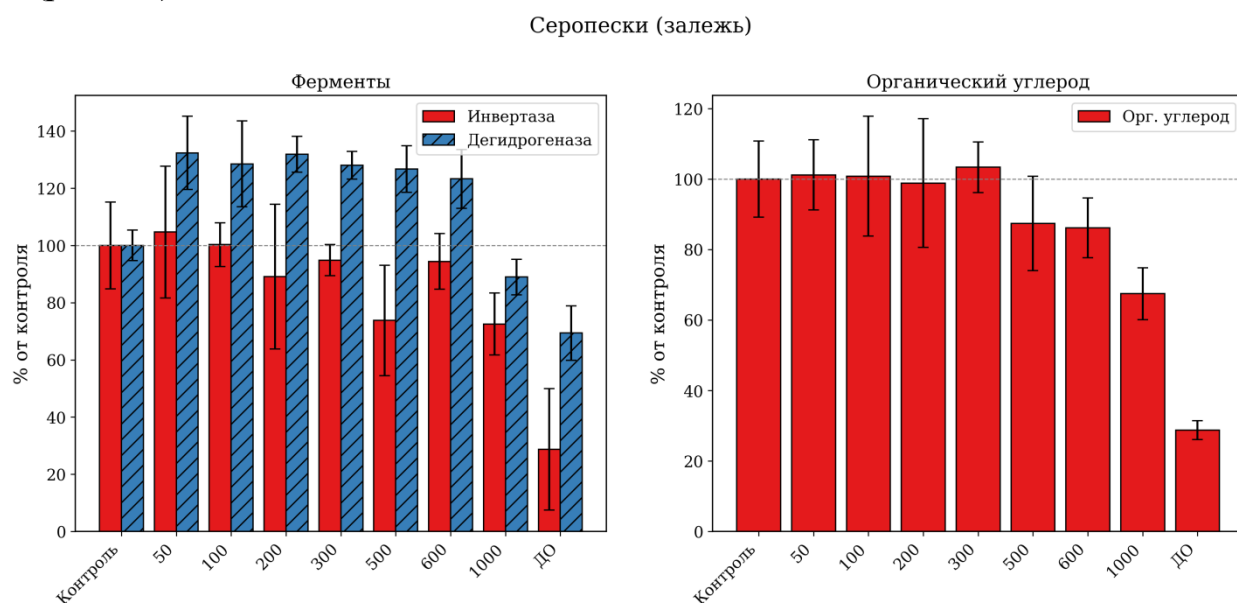


Рисунок 4 – Активность ферментов (инвертаза, дегидрогеназа) и содержание органического углерода в серопесках (залежь) при внесении донных отложений.; по оси абсцисс – доза донных отложений, т/га

Светло-каштановая почва – доза 100 т/га слабо стимулировала рост растений (+7,1 %) и повышала активность инвертазы (+13,5 %). Доза 500 т/га, напротив, угнетала все биометрические параметры (длина корней -27,0 %, фитомасса -22,6 %), снижала инвертазу (-13 %) при одновременном увеличении дегидрогеназы (+39 %). Обнаружена диссоциация ферментативного ответа, указывающая на перестройку микробного метаболизма. Высокая доза 500 т/га для данной почвы признана агрономически нецелесообразной (рис. 6).

Серопески (пашня)

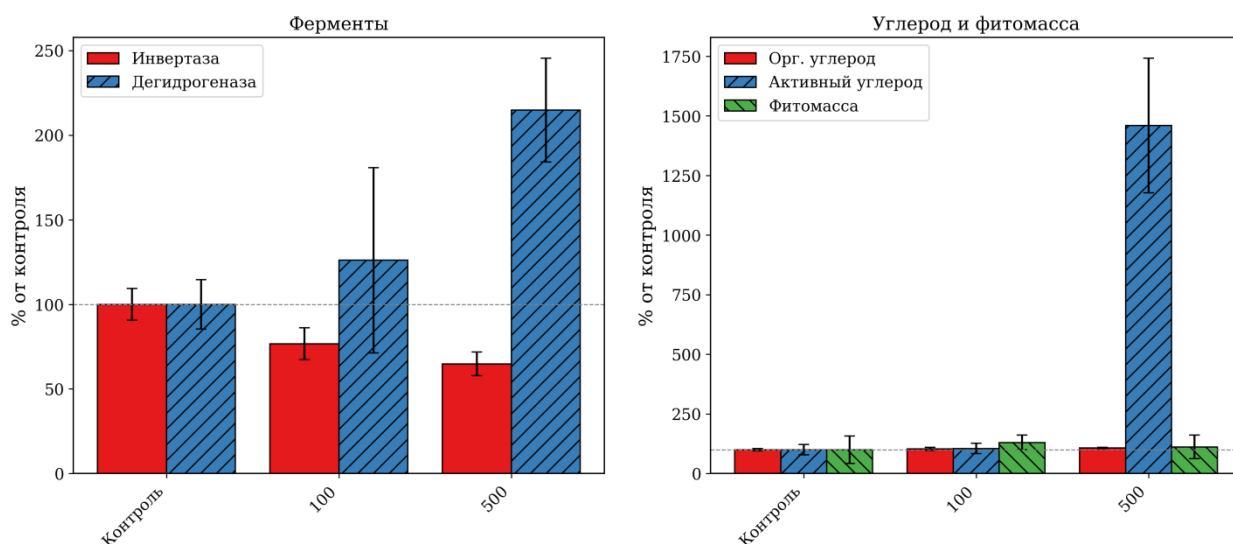


Рисунок 5 – Влияние донных отложений на ферментативную активность и содержание углерода/фитомассу серопесков (пашня); по оси абсцисс – доза донных отложений, т/га

Светло-каштановая

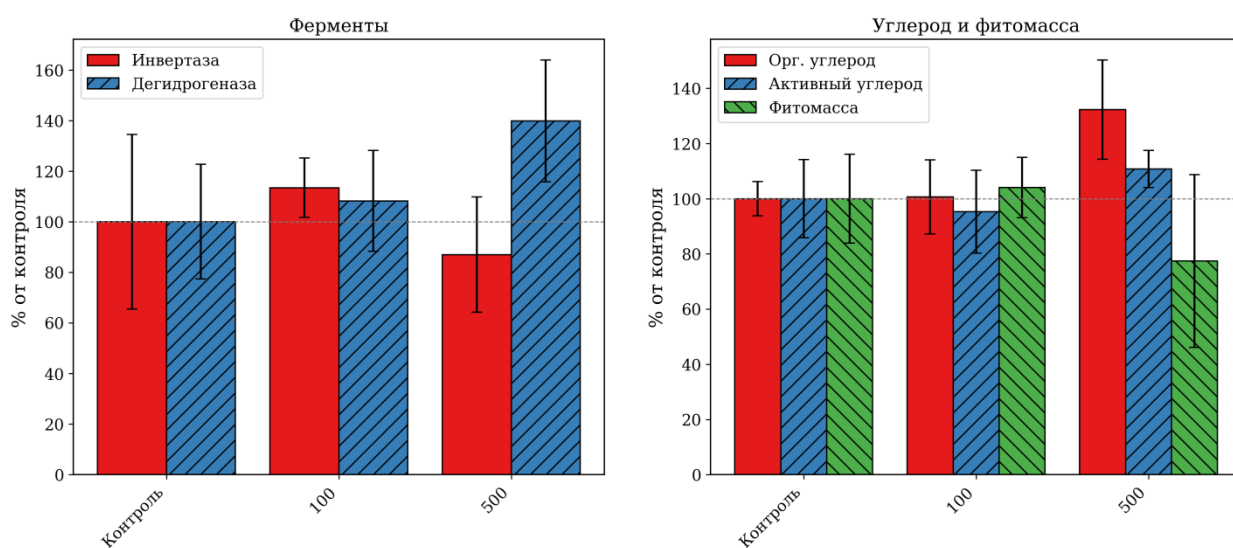


Рисунок 6 – Изменение биологических показателей светло-каштановой почвы под действием донных отложений; по оси абсцисс – доза донных отложений, т/га

Буряя лесная почва (бурозём кислый) – почва проявила высокую чувствительность к внесению ДО. При дозе 100 т/га отмечено угнетение длины проростков (-13,9 %, $p < 0,05$) при активации дегидрогеназы (+224 %). При дозе 500 т/га выявлено снижение длины корней (-9,6 %, $p < 0,05$), подавление инвертазы на 40,3 % и активация дегидрогеназы до 754 % от контроля. Таким образом, для бурой лесной почвы установлено разнонаправленное изменение биологических показателей: стимуляция дегидрогеназы сопровождалась угнетением инвертазы и снижением ростовых показателей. (рис. 7).

Буряя лесная

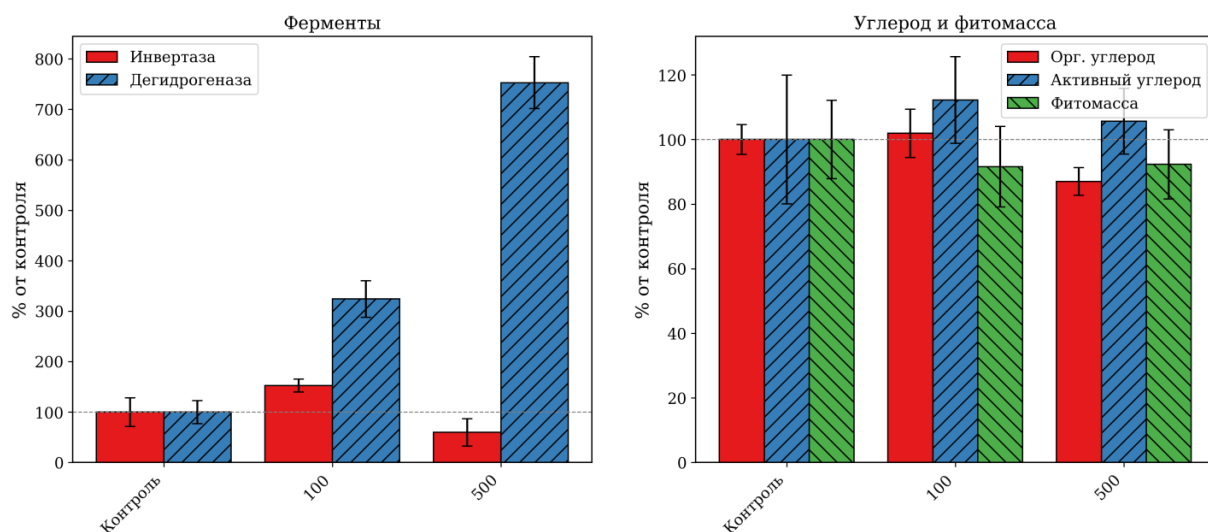


Рисунок 7 – Влияние донных отложений на свойства бурой лесной почвы; по оси абсцисс – доза донных отложений, т/га

Пески – в отличие от почв, только высокие дозы ДО (500 т/га) приводили к улучшению свойств субстрата: длина проростков и корней возрастала на 16–18 %, содержание органического углерода увеличилось в 3,6 раза. Однако фитомасса снижалась на 10,6 %, что объясняется иммобилизацией питательных веществ микроорганизмами. Активность дегидрогеназы удваивалась, тогда как инвертаза подавлялась даже при 100 т/га (-77,5 %). Формирование более стабильного органоминерального комплекса при высоких дозах оказывало выраженный мелиоративный эффект, однако требовало дополнительного внесения минеральных удобрений (рис 8).

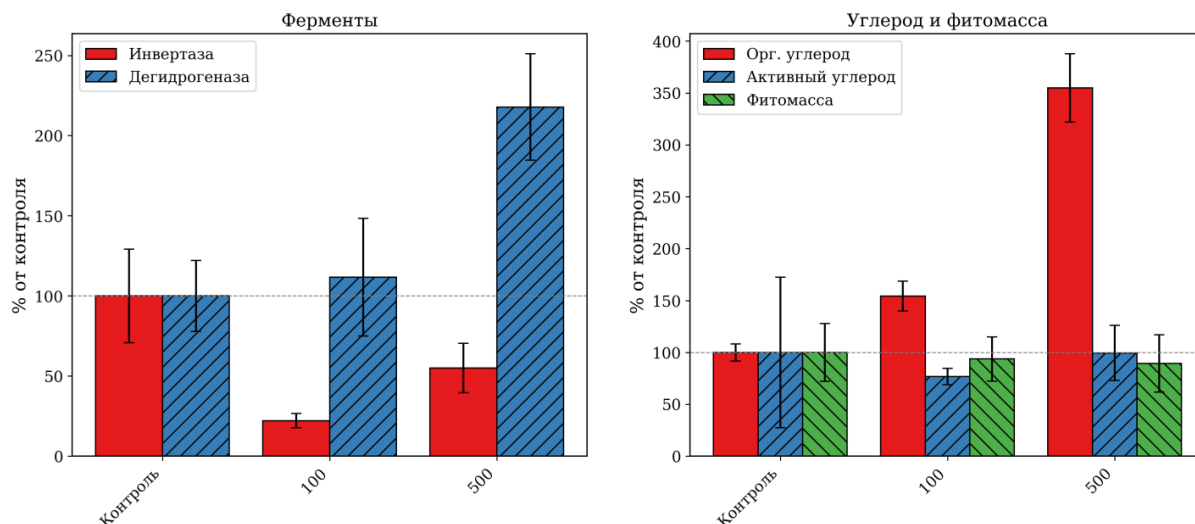


Рисунок 8 – Реакция песчаного субстрата на внесение различных доз донных отложений; по оси абсцисс – доза донных отложений, т/га

ГЛАВА 6. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ, ПЕСКОВ ПРИ ВНЕСЕНИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Для оценки воздействия донных отложений на биологическое состояние почв проведено ранжирование исследованных показателей по чувствительности и информативности. Установлено, что наиболее информативным показателем является активность дегидрогеназы, отражающая интегральную микробиологическую активность почвы и характеризующаяся устойчивой дозозависимой реакцией на внесение донных отложений ($r = +0,78...+0,99$; $p < 0,001$), сохраняющейся в последствии. Высокой информативностью также обладает активность инвертазы, позволяющая диагностировать нарушения углеводного обмена и дисбаланс микробных процессов. Наиболее чувствительным фитотоксикологическим показателем оказалась длина корней тест-культуры, статистически значимо реагирующая на изменение дозы донных отложений раньше других ростовых параметров. Эмиссия CO_2 характеризовалась высокой чувствительностью на начальных этапах воздействия, однако её диагностическая ценность ограничена влиянием сезонных факторов. Фитомасса и урожайность являются важными интегральными агрономическими показателями эффективности применения донных отложений, но уступают ферментативным показателям и длине корней по чувствительности к дозозависимым изменениям.

Таким образом, для мониторинга биологического состояния почв при внесении донных отложений рекомендуется использовать комплекс показателей, включающий активность дегидрогеназы, активность инвертазы и длину корней тест-культуры.

ВЫВОДЫ

1. Донные отложения бассейна Нижнего Дона характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией среды (рН 6,8–8,3), преимущественно органоминеральным карбонатным составом и по суммарному показателю загрязнения относятся к допустимой категории. По основным нормируемым показателям исследованные донные отложения соответствуют требованиям, предъявляемым к сапропелю II класса, что позволяет рассматривать их в качестве органоминерального мелиоранта при обязательном контроле содержания потенциально токсичных элементов.
2. Установлено, что влияние донных отложений на биологические свойства почв определяется типом почвы, её буферностью и дозой внесения. Наиболее устойчивым к внесению донных отложений оказался чернозём обыкновенный, для которого эффективны дозы 100–200 т/га. Для серопесков оптимальный диапазон составил 50–150 т/га, для светло-каштановой и каштановой почв — 100 т/га, тогда как для песков мелиоративный эффект достигался при дозе 500 т/га. Бурая лесная почва проявила наибольшую чувствительность к внесению донных отложений.
3. Показано, что повышение дозы донных отложений выше оптимальной не приводит к дальнейшему улучшению биологических свойств почв и может сопровождаться угнетением ростовых процессов растений и нарушением сбалансированности ферментативной активности. Наиболее отчётливо данный эффект проявлялся в светло-каштановой и бурой лесной почвах, а также в серопесках при высоких дозах внесения.
4. Установлено, что эффективность донных отложений зависит от их валового состава. Более выраженное стимулирующее действие на биологические показатели серопесков оказали донные отложения р. Аксай, характеризующиеся более высоким содержанием тонкодисперсной фракции и оксидов железа по сравнению с донными отложениями р. Дон.
5. Среди исследованных показателей наиболее информативным для оценки воздействия донных отложений является активность дегидрогеназы, сохраняющая дозозависимый отклик в последствии. Наиболее чувствительными показателями являются активность инвертазы и длина корней тест-культуры, позволяющие выявлять нарушения биологических процессов и фитотоксический эффект на ранних стадиях воздействия.
6. Внесение донных отложений способствует частичному восстановлению биологической активности почв, загрязнённых хромом, свинцом и нефтью. Наиболее выраженный ремедиационный эффект установлен в серопесках, где индекс интегрального показателя биологического состояния возрастал в 1,5–2,2

раза. Основными механизмами ремедиационного действия являются сорбция поллютантов минеральной фракцией донных отложений, подщелачивание среды и стимуляция почвенной микробиоты органическим веществом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 24 работы. Ниже представлены основные публикации по теме исследования.

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Рыбалкина, Е. И. Использование речных донных отложений для ремедиации загрязнённых почв разного генезиса / Е. И. Рыбалкина, К. Ш. Казеев // Живые и биокосные системы. – 2025. – № 54. – DOI 10.18522/2308-9709-2025-54-7. – EDN WMANOW. (K3).
2. Использование донных отложений Цимлянского водохранилища в качестве органического удобрения / О. В. Степаньян, Е. И. Рыбалкина, О. А. Хорошев [и др.] // Наука Юга России. – 2024. – Т. 20, № 4. – С. 61-69. – DOI 10.7868/S25000640240409. – EDN REESQN. (K1).
3. Рыбалкина, Е. И. Влияние сапропеля на биологическую активность каштановой почвы / Е. И. Рыбалкина, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников // Агрохимический вестник. – 2023. – № 4. – С. 39-46. – DOI 10.24412/1029-2551-2023-4-007. – EDN JZFWZE. (K1).
4. Рыбалкина, Е. И. Влияние речных донных отложений на биологическую активность чернозема и песчаной почвы / Е. И. Рыбалкина, К. Ш. Казеев // Агрохимия. – 2025. – № 5. – С. 35-43. – DOI 10.7868/s3034496425050047. – EDN TVOYVK. [*Переводная версия*: Rybalkina, E. I. The Influence of River Bottom Sediments on the Biological Activity of Chernozem and Sierosand Soil / E. I. Rybalkina, K. Sh. Kazeev // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2025. – Vol. 80, No. S2. – P. S197-S204. – DOI 10.3103/S0147687425700644. – EDN RBMPRX.]. (K1).

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ

5. Биоиндикация пригодности донных отложений реки Дон для сельского хозяйства / Е. И. Рыбалкина, Т. Н. Польшина, С. Н. Сушкова, К. Ш. Казеев // Гигиена и санитария. – 2025. – Т. 104, № 2. – С. 155-161. – DOI 10.47470/0016-9900-2025-104-2-155-161. – EDN OQJBHW.

Монографии

6. Биоиндикация экологического состояния антропогенно нарушенных почв : монография / В. В. Вилкова, М. С. Нижельский, Д. К. Казеев [и др.] ; ответственные редакторы: В. В. Вилкова, К. Ш. Казеев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет". – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2025. – 149 с. – ISBN 978-5-9275-5034-0 : 200 экз.

Патенты/свидетельства

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625861 Российская Федерация. Влияние внесения донных отложений реки Аксай в чернозем обыкновенный на показатели качества озимой пшеницы: № 2024625859: заявл. 02.12.2024: опубл. 11.12.2024 / Е. И. Рыбалкина, В. П. Солдатов, К. Ш. Казеев; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет». – EDN GLBTNX.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДО — донные отложения

ТМ — тяжелые металлы

ПАУ — полициклические углеводороды