

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

На правах рукописи



ДУДНИКОВА ТАМАРА СЕРГЕЕВНА

**ИСТОЧНИКИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ, МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ
ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В
ГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВАХ НИЖНЕГО ДОНА И ПОБЕРЕЖЬЯ ТАГАНРОГСКОГО
ЗАЛИВА**

1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Работа выполнена на кафедре почвоведения и оценки земельных ресурсов и в лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета

Научный руководитель: **Минкина Татьяна Михайловна,**
доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Академия биологии и медицины им. Д.И. Ивановского, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, заведующий.

Официальные оппоненты: **Кошелева Наталья Евгеньевна,**
доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор;

Лодыгин Евгений Дмитриевич,
доктор биологических наук, доцент, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», отдел почвоведения, ведущий научный сотрудник, руководитель группы химии почв.

Защита диссертации состоится **«17» сентября 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.13 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/1356339/>

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. 707, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.13 Бурачевской М.В., а также в формате .pdf на e-mail: mburachevskaya@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.б.н.



Бурачевская Марина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Прибрежные и пойменные почвы Нижнего Дона и побережья Таганрогского залива функционируют в зоне сопряжения наземных и водных потоков вещества, поэтому являются одновременно аккумуляторами и потенциальными источниками вторичного поступления поллютантов в сопредельные среды (Dudnikova et al., 2023). Близкое расположение объектов промышленности, крупных городов, портов, функционирование речного и морского транспорта приводит к аккумуляции полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) – канцерогенно активных, персистентных органических поллютантов. Из них 16 представителей ПАУ входят в список приоритетных поллютантов, а наиболее токсичным является бенз(а)пирен – канцероген первого класса опасности (СанПиН 1.2.3685-21; IARC, 2020). Особую значимость исследование приобретает для прибрежных и пойменных территорий Нижнего Дона и побережья Таганрогского залива, где почвы формируются в зоне сопряжения потоков веществ в системе «вода — суша». В таких условиях ПАУ могут не только аккумулироваться в органогенных и тонкодисперсных фракциях почв, но и вовлекаться в процессы латеральной и внутрипрофильной миграции, создавая риск вторичного загрязнения водных объектов и донных отложений. Отсутствие сведений о содержании, региональных фоновых уровнях ПАУ на данной территории, их источников, форм пространственного распределения и факторов, определяющих их биодоступность, обуславливает актуальность исследования. Выявление закономерностей взаимодействия между полиаренами и почвами на ландшафтном и почвенно-генетическом уровнях организации позволит проводить объективную диагностику экологического состояния гидроморфных почв.

Цель исследования – установить источники происхождения приоритетных ПАУ и выявить закономерности их аккумуляции, пространственного распределения и внутрипрофильной миграции в гидроморфных почвах Нижнего Дона и побережья Таганрогского залива в зависимости от свойств почв и интенсивности техногенной нагрузки.

Задачи исследования:

1. Выявить закономерности аккумуляции и распределения приоритетных ПАУ в почвах Нижнего Дона и прибрежной зоны Таганрогского залива.
2. Определить влияние физических, физико-химических и химических свойств почв на содержание ПАУ в почвах прибрежной зоны.
3. Установить фоновые содержания ПАУ в почвах гидроморфного ряда и идентифицировать основные источники их поступления при различной техногенной нагрузке на прибрежную зону.
4. Изучить особенности аккумуляции и внутрипрофильной миграции ПАУ в почвах гидроморфного ряда.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Пространственная дифференциация содержания и состава приоритетных ПАУ в гидроморфных почвах Нижнего Дона и побережья Таганрогского залива определяется сочетанием источников техногенного поступления, положения почв в ландшафтно-гидрологической системе и их физических и физико-химических свойств.
2. Интенсивность трансформации состава соединений ПАУ в аллювиальных почвах прибрежной зоны дельты реки Дон легко-, средне- и тяжелосуглинистого, а также супесчаного гранулометрического состава снижена по сравнению с почвами Таганрогского залива и малых рек, впадающих в залив, Нижнего Дона и г. Таганрога, что характеризуется большей аккумуляцией низкомолекулярных полиаренов по отношению к высокомолекулярным в составе приоритетных ПАУ.
3. Характер внутрипрофильного распределения ПАУ в гидроморфных почвах соответствует аккумулятивному типу и зависит от распределения гумуса в почвенном профиле и интенсивности техногенной нагрузки. Для аллювиальной луговой насыщенной слоистой почвы наблюдается второй максимум накопления ПАУ в горизонтах A'' почвенного профиля, связанный с накоплением органического вещества и аллювиального материала.

Научная новизна. Впервые для гидроморфных почв Нижнего Дона и побережья Таганрогского залива обосновано фоновое содержание приоритетных ПАУ, установлены диапазоны их природного и техногенного варьирования, дана пространственная характеристика распределения поллютантов в пределах прибрежной зоны. Показано, что аккумуляция, трансформация состава и миграция низко- и высокомолекулярных ПАУ зависят от гидрологического режима прилегающих водоемов, положения почв в ландшафте, содержания органического углерода, доли тонкодисперсных фракций, типа и интенсивности источника поступления поллютантов. На основе сочетания диагностических соотношений, пространственного анализа и факторного анализа впервые для исследуемой территории выделены основные типы источников ПАУ и установлены особенности их внутривертикального перераспределения в почвах гидроморфного ряда.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в расширении представлений о поведении ПАУ в гидроморфных почвах прибрежных территорий Нижнего Дона и Таганрогского залива, определяющих перераспределение полиаренов между поверхностными горизонтами, почвенным профилем и сопредельными средами. Обоснованные фоновые значения ПАУ и выявленные диагностические признаки источников их поступления могут быть использованы для экологического нормирования, ранжирования участков по степени опасности и выбора эталонных площадок мониторинга. Выявлена роль органического вещества, тонкодисперсных фракций и гидрологического режима в закреплении и миграции низко- и высокомолекулярных ПАУ. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных данных при экологическом мониторинге, картографировании и оценке загрязнения почв побережья Нижнего Дона и Таганрогского залива. Результаты работы могут быть применены при разработке региональных схем природоохранного зонирования, прогнозировании переноса поллютантов в воду и донные отложения, а также при выборе подходов к ремедиации и снижению экологических рисков в прибрежных экосистемах.

Методология исследований. Сформирована сеть мониторинга, определены маршруты экспедиционных работ и выполнен анализ литературных и картографических материалов. Проведено морфологическое описание почвенных разрезов и отбор проб поверхностных (0–20 см) и генетических горизонтов. Общепринятыми методами определены физические, физико-химические и химические свойства почв. Проведен количественный анализ ПАУ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Agilent 1260. Для интерпретации данных применены геостатистические и статистические методы, включая факторный, однофакторный дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы. Программное обеспечение для проведения геостатистических и статистических расчетов представлено Origin 2018, SigmaPlot 12.5, STATISTICA 8, QGIS 3.10.9, SAGA GIS 9.5.

Степень достоверности. Основные закономерности, выявленные в ходе выполнения диссертационного исследования, подтверждены с использованием статистических методов. Исследование сформировано на результатах определения физических и химических свойств почв, определения содержания ПАУ в поверхностных горизонтах почв (0–20 см), отобранных со 97 площадок мониторинга, а также почв, отобранных из каждого генетического горизонта 28 почвенных разрезов территории Нижнего Дона и Таганрогского залива.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на научных и научно-практических конференциях, конгрессах и съездах международного, всероссийского и регионального уровня: Международная научная конференция XXII Докучаевские молодежные чтения «Почвоведение в цифровом обществе», 2021, г. Санкт-Петербург; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», 2020–2024, г. Москва; Международная молодежная научная школа «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» в рамках международного форума «Степная Евразия – устойчивое развитие», 2023, Ростов-на-Дону; VII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные

аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», 15–19 мая 2023 г., Майкоп; Международный форум «Агробιοтехнологии: достижения и перспективы развития», 2023, Москва; III Международная научная конференция «Современное состояние черноземов», 2023, Ростов-на-Дону; VII конференция молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева «Почвоведение: горизонты будущего», 2023, 2024, Москва; II Международная конференция «Проблемы и перспективы устойчивого развития почвенного покрова горных и равнинных территорий», 2024, Геленджик; X Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – наука молодых», 2024, Самара; IX съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева, 2024, Казань.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 16 статей, из них 12 опубликованы в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, преимущественно первого и второго квартилей.

Личный вклад автора. Цель и задачи исследования определены соискателем совместно с научным руководителем. Проведены анализы физических и химических свойств почв, определение содержания ПАУ в почвенных образцах. Выполнен статистический анализ, сформирован картографический материал. Впервые обоснованы принципы определения фонового содержания полиаренов в почвах прибрежных территорий. Дана оценка и интерпретация результатов.

Структура и объём диссертации. Диссертация общим объёмом 161 страница состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Список литературы содержит 242 источника, из них 175 — на иностранном языке. Работа включает 57 рисунков и 14 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.5.19. Почвоведение по п. 6. Теоретические и научно-методические вопросы химии почв. Изучение взаимодействия органических и минеральных компонентов почв. Техногенное и агрогенное химическое загрязнение почв, изменение их естественной кислотности, химического состава и физико-химических свойств.

Финансовая поддержка работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, в рамках Соглашения №075-15-2024-614 «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз», гранта РНФ № 20-14-00317 «Эколого-геохимические закономерности формирования природно-антропогенных потоков веществ в почвах устьевой области реки Дон и побережья Таганрогского залива». Аналитические работы выполнены на оборудовании ЦКП «Биоинженерия почв» ЮФУ (Соглашение № 075-15-2025-667).

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, доктору биологических наук, профессору Татьяне Михайловне Минкиной, доктору биологических наук Светлане Николаевне Сушковой, кандидату технических наук Елене Михайловне Антоненко, кандидату биологических наук Манджиевой Сагларе Сергеевне, кандидату географических наук Константиновой Елизавете Юрьевне, старшему преподавателю кафедры Замулиной Инне Валерьевне, кандидату биологических наук, Невидомской Дине Георгиевне, аспиранту Шуваеву Евгению Григорьевичу, а также кандидату биологических наук, Васильевой Галине Кирилловне и доктору биологических наук, Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук Пинскому Давиду Лазаревичу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе приведены основные сведения, источники и пути поступления ПАУ в прибрежные почвы. Проведено сравнение содержания ПАУ в прибрежных почвах различных регионов мира. Выявлено, что суммарное содержание приоритетных полиаренов в почвах фоновых территорий береговых зон не превышает 600 нг/г, состав соединений ПАУ представлен преимущественно низкомолекулярными соединениями, прежде всего нафталином и фенантrenom, реже флуореном. Описаны механизмы, влияющие на аккумуляцию, латеральную и внутрипрофильную миграцию полиаренов в почвах.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись почвы прибрежной зоны Нижнего течения р. Дон и побережья Таганрогского залива. Для исследованной территории, охватывающей 4248 км², заложено 105 площадок мониторинга (рис. 1): на 97 площадках проведен отбор проб с 0–20 см слоя почвы (ГОСТ 17.4.3.01-2017). Для исследования внутрипрофильного распределения ПАУ в почвах заложено 28 полнопрофильных разрезов. Образцы почв отобраны из каждого генетического горизонта). Почвенный покров территории исследования представлен дерново-карбонатными почвами (Rendzic Leptosols), луговыми почвами (Fluvisols Humic), различными подтипами аллювиальных луговых почв, включая насыщенные (Fluvisols Salic), карбонатные (Calcaric Fluvisols), болотные (Histic Fluvisols) на аллювиальных отложениях, аллювиально-морских, лиманных и морских отложениях. В подтипе аллювиальных луговых насыщенных почв отдельно выделен род слоистых почв (Tidalic Fluvisols). Полугидроморфные почвы представлены солончаками корковыми (Gleyic Solonchaks). На водораздельных позициях отобраны образцы черноземов обыкновенных карбонатных (Haplic Chernozems) различной степени смывости, на склонах - неполноразвитые степная (Mollic Leptosols), в черте г. Таганрог – урбаноземы (Urbic Technosols) (Классификация и диагностика почв СССР, 1977; IUSS Working Group, 2014). Доля автоморфных почв составляет 15% от всех изученных.

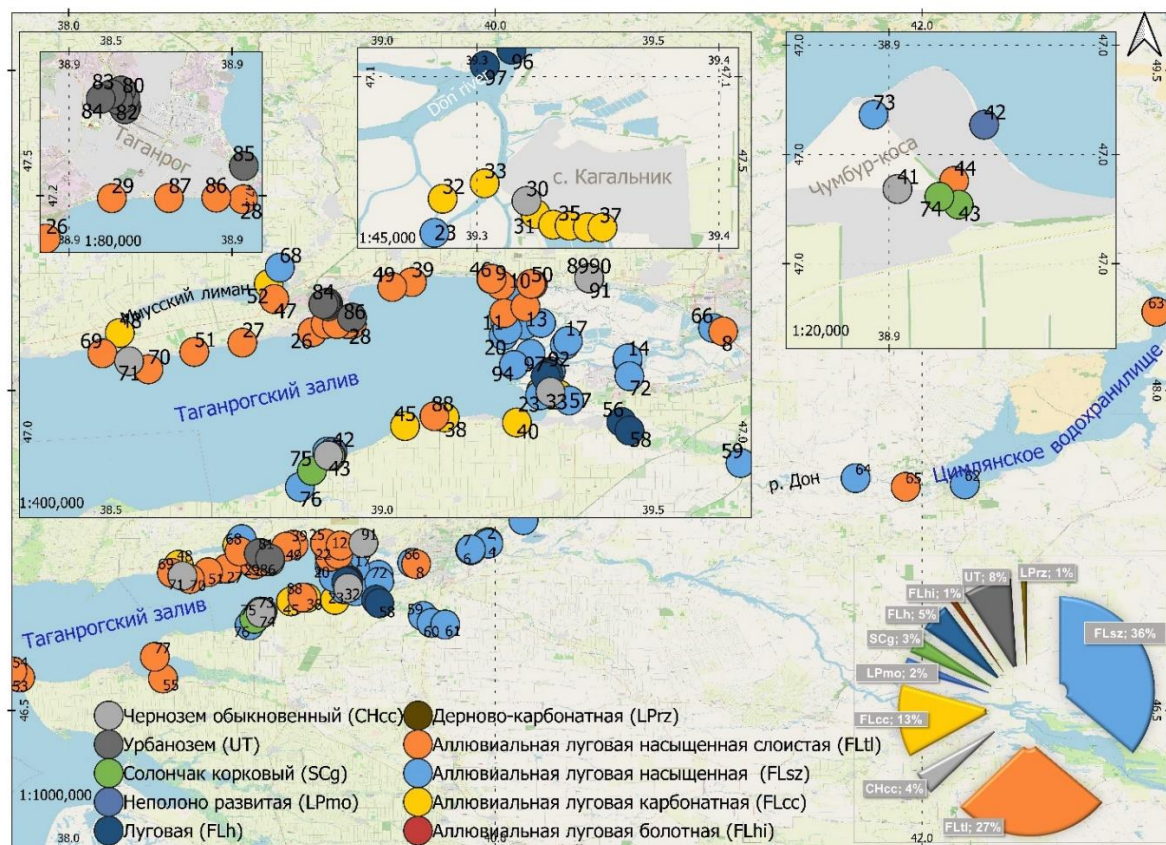


Рисунок 1. Картосхема расположения площадок мониторинга в пределах системы Нижний Дон – Таганрогский залив с указанием изученных типов почв и их соотношения

Интенсивность процессов перемещения и переотложения почвенного материала, а также привноса аллювиального материала в почвенный профиль различается для крупных и малых рек, их устьевых областей, побережья залива и автоморфных позиций в ландшафтной системе Нижний Дон – Таганрогский залив. В этой связи исследуемая прибрежная территория разделена с учетом особенностей гидрологического режима примыкающих к берегу водоемов: 1) Нижний Дон; 2) дельта Дона; 3) Таганрогский залив; 4) г. Таганрог; 5) прибрежные зоны рек, впадающих в Таганрогский залив, а также Миусский лиман (реки залива). Такая схема районирования позволяет сопоставить содержание и состав ПАУ с типом источника, условиями переноса и почвенно-ландшафтной позицией.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения аналитических исследований отобранные образцы почв просушивали до воздушно-сухого состояния в естественных условиях. Физические и химические свойства почв определены с использованием общепринятых методов, представленных в таблице 1 (Вадюнина, Корчагина, 1986; Воробьева, 2006; ГОСТ 26213-2021).

Таблица 1. Методы определения физических и химических свойств почв

Свойства почвы	Методы определения
1	2
Карбонаты	Комплексонометрический метод по С.А. Кудрину
pH	Потенциометрический метод в суспензии при соотношении почва:вода 1:2,5
Обменные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+}	Метод М.Ш. Шаймухаметова (1993)
Емкость катионного обмена (ЕКО)	Метод Бобко–Аскинази в модификации Алешина
Гранулометрический состав (ГМС) - содержание гранулометрических фракций физической глины (<0,01 мм) и ила (<0,001 мм)	Седиментационный метод с использованием пипетки Качинского с пирофосфатной подготовкой
Органический углерод	Метод бихроматного окисления по Тюрину с фотометрическим окончанием

Выполнен анализ окислительно-восстановительного потенциала (Eh) по профилю в основных рассматриваемых гидроморфных почвах Нижнего Дона и Таганрогского залива потенциометрическим методом с использованием прибора HORIBA LAQUAtwin ORP-11.

Экстракция ПАУ из почв проведена н-гексаном в трехкратной повторности (ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09) с последующим количественным определением содержания поллютантов методом ВЭЖХ на хроматографе Agilent Technologies (Santa Clara, CA, USA) с флуоресцентным детектором FL-3000. В исследовании определено содержание 15 приоритетных ПАУ из перечня US EPA (2020) за исключением индено(1,2,3-cd)пирена (рис. 2).

Источники происхождения ПАУ в почвах определены на основе наиболее часто используемых диагностических соотношений: 1) флуорантен/(флуорантен+пирен) (<0,4 — петрогенный источник; 0,4–0,5 — пиролиз угля и древесины; >0,6 — разливы бензина и дизельного топлива); 2) бенз(а)антрацен/(бенз(а)антрацен+хризен) (<0,2 — петрогенный источник; 0,2–0,45 — пиролиз угля; > 0,45 — автомобильные выбросы) (Цибарт, Геннадиев, 2013). Для уточнения результатов диагностики источников происхождения ПАУ в почвах проведен факторный анализ (Dudnikova et al., 2023).

Уровень загрязнения почв определен с использованием коэффициента концентрации (Kc) и суммарного показателя загрязнения (Zc) (МУ 2.1.7.730-99, 1999; Касимов и др., 2012; Федорец и др., 2015). Выбор фоновых участков для расчета Zc основывался на следующих принципах: 1) суммарное содержание приоритетных ПАУ не должно превышать верхний

порог содержания для незагрязненных почв (600 нг/г) согласно международным критериям и фоновым уровням различных стран мира (Maliszewska-Kordybach, 2008; Macdonald et al., 1996; Dai et al., 2022; ГН 2.1.7.2041-06; Wang et al., 2017; Ma et al., 2014; Yuan et al., 2014; Monaco et al., 2017; Orecchio, 2010); 2) соотношение низкомолекулярных ПАУ к высокомолекулярным должно быть выше, поскольку в естественных условиях образуются преимущественно двух- и трехкольчатые соединения (Wilcke, 2000; Sojini et al., 2010); 3) почва фоновой площадки мониторинга должна находиться на удалении от источников загрязнения (Siemering, Thiboldeaux, 2021; Zhang, Chen, 2017; Yuan et al., 2014, 2015; Bezberdaya et al., 2022); 4) результаты расчета диагностических соотношений должны указывать на педогенный или биогенный источник поступления ПАУ (Yuan et al., 2015).

Статистическая обработка полученных результатов проведена в программах STATISTICA 8, SigmaPlot 12.5 и Origin 2018. Картографический материал построен в программах QGIS 3.40 и SAGA GIS 2.3.2

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Свойства почв исследуемой территории варьируют в широких пределах. Наибольшие вариации свойств почв ($CV > 80\%$) наблюдаются в содержании CaCO_3 , Mg^{2+} и илистой фракции. Выделяются разновидности почв от песчаного до среднесуглинистого гранулометрического состава ($CV > 50\%$) (табл. 2). Коэффициент вариации pH изменяется в меньшей степени ($CV < 5\%$) — от 7,2 до 8,9. При этом 45,4 % почв площадок мониторинга относятся к слабощелочным, 39,2 % — к щелочным и 15,5 % — к нейтральным. На побережье Нижнего Дона, вблизи Цимлянского водохранилища, сформированы супесчаные и песчаные слабогумусированные почвы с нейтральной реакцией среды, карбонатные. В районе городов Аксая и Ростова-на-Дону почвы береговой зоны р. Дон характеризуются преимущественно легкосуглинистым гранулометрическим составом, слабощелочной реакцией среды, низкой гумусированностью, карбонатностью и высоким уровнем поглотительной способности. В почвах дельты р. Дон pH изменяется от слабощелочного до сильнощелочного, а гранулометрический состав варьирует от песчаного до тяжелосуглинистого. Наибольшей неоднородностью свойств по величине CV характеризуются почвы прибрежной зоны Таганрогского залива. Их гранулометрический состав варьирует от песков до легких глин, содержание гумуса — от очень слабой до высокой степени гумусированности, pH — от нейтрального до щелочного.

Таблица 2. Описательные статистики свойств почв площадок мониторинга, расположенных на территории Нижнего Дона и Таганрогского залива (n=97)

Свойства почвы		Средне е	Медиан а	Миниму м	Максиму м	Стандартно е отклонение	Коэффициен т вариации (CV), %
pH		7,9	7,9	7,2	8,9	0,3	4,2
CaCO_3	%	2,4	1,8	0,2	8,3	1,9	80,6
Гумус		2,3	1,9	0,2	6,8	1,4	62,6
Ил		13,8	11,7	0,1	33,1	9,8	70,7
Физическая глина		29,4	26,0	1,3	67,8	17,2	58,6
Ca^{2+}	смоль (+)/кг	16,1	15,8	3,2	36,3	8,4	52,3
Mg^{2+}		3,0	2,1	0,2	13,2	2,6	86,4
ЕКО		21,0	19,9	4,8	47,5	11,0	52,4

Карбонатные почвы встречаются преимущественно на северном побережье, слабокарбонатные — на южном. Наиболее однородными по физическим, физико-химическим и химическим свойствам являются почвы промышленной зоны г. Таганрога: они характеризуются тяжелым гранулометрическим составом, щелочной реакцией среды, высокой поглотительной способностью и карбонатностью.

Проведен расчет описательных статистик физических, физико-химических и химических свойств почв в зависимости от их типа. Показано, что наиболее распространенные аллювиальные луговые насыщенные почвы представлены преимущественно средними суглинками со слабощелочной реакцией среды, средней поглотительной способностью по ЕКО, низким содержанием гумуса и слабой карбонатностью. Более 50 % аллювиальных луговых насыщенных слоистых почв относятся к слабощелочным, слабокарбонатным, слабогумусированным супесям с низким уровнем поглотительной способности.

Профильное распределение Сорг в большинстве почв имеет аккумулятивный характер; исключения составляют аллювиальные луговые насыщенные слоистые почвы, для которых характерен дифференцированный тип распределения Сорг с вторым максимумом накопления в среднем горизонте. Нейтральная реакция среды характерна для верхних горизонтов чернозема обыкновенного карбонатного и аллювиальных луговых карбонатных почв единичных площадок. Как правило, содержание карбонатов увеличивается с глубиной, что обусловлено их повышенным количеством в лёссовидных суглинках, аллювиальных, морских и аллювиально-морских отложениях. За исключением аллювиальных луговых насыщенных слоистых почв, по распределению фракций ила и физической глины профили почв преимущественно не дифференцированы. При наличии глеевого процесса в нижней части профиля наблюдается повышение содержания мелкодисперсной фракции почв с глубиной, что характерно для солончака сорового. Изменение pH в профилях почв колеблется от нейтральной до слабощелочной. Нейтральная реакция среды характерна для верхних горизонтов чернозема обыкновенного карбонатного площадки мониторинга №71 и аллювиальных луговых карбонатных почв площадок мониторинга № 31 и №32. При наличии глеевого процесса в нижней части профиля наблюдается повышение содержания мелкодисперсной фракции почв с глубиной, что особенно характерно для солончака коркового и аллювиальной луговой карбонатной. В аллювиальной дерновой карбонатной, напротив, содержание физической глины и ила увеличивается к поверхностному слою. Содержание обменного кальция в верхних горизонтах большинства рассматриваемых типов почв превышает 25 смоль(+)/кг. В черноземах обыкновенных карбонатных, солончаке корковом, аллювиальных луговых болотных почвах, а также дерново-карбонатной содержание обменного кальция снижается с глубиной почвенного профиля, в аллювиальной луговой карбонатной, напротив, возрастает. Закономерности распределения обменного магния в почвенных профилях аналогично кальцию практически для всех типов почв, за исключением солончака. Так как в ППК рассматриваемых почв до 85% от суммы обменных оснований занимает кальций, распределение величины ЕКО в почвенном профиле схоже с обменным кальцием. Для черноземов обыкновенных карбонатных, за исключением почв, подверженных различной степени смывости, характерно увеличение CaCO_3 с глубиной почвенного профиля от 0,1-2,0% в горизонте Ad до 7,9-8,0% в горизонтах C.

В окислительных условиях, при значениях $E_h > 500$ мВ, процессы деградации органических поллютантов протекают интенсивнее, чем в восстановительных (Просолов, 2022). В ходе текущего исследования показатель E_h в почвенных горизонтах Ad аллювиальных луговых насыщенных слоистых почв варьировал в пределах 256-384 мВ, в аллювиальных луговых насыщенных – 270-350 мВ, в аллювиальной луговой болотной почве составлял 153 мВ. Для всех представленных почв характерно снижение величины E_h с глубиной почвенного профиля, что особенно выражено для слоистых почв (до 70 мВ). Снижение E_h ниже 200 мВ свидетельствует об активизации восстановительных процессов, замедляющих преимущественно аэробное разложение ПАУ (Шигаева и др., 2020).

Суммарное содержание ПАУ в исследуемых почвах варьирует в широких пределах — от 77 до 16017 нг/г (рис. 2). Около 70% почв исследуемых площадок мониторинга по суммарному содержанию ПАУ близки к природным территориям различных регионов мира и относятся к незагрязненным (<600 нг/г). Из них в четверти образцов почв содержание поллютантов составляет менее 200 нг/г. По медианному суммарному содержанию ПАУ (в нг/г) почвы территории образуют ряд: дельта Дона (1490) > г. Таганрог (1411) > р. Дон (597)

> Таганрогский залив (353) > реки, впадающие в Таганрогский залив (256) (рис. 2).

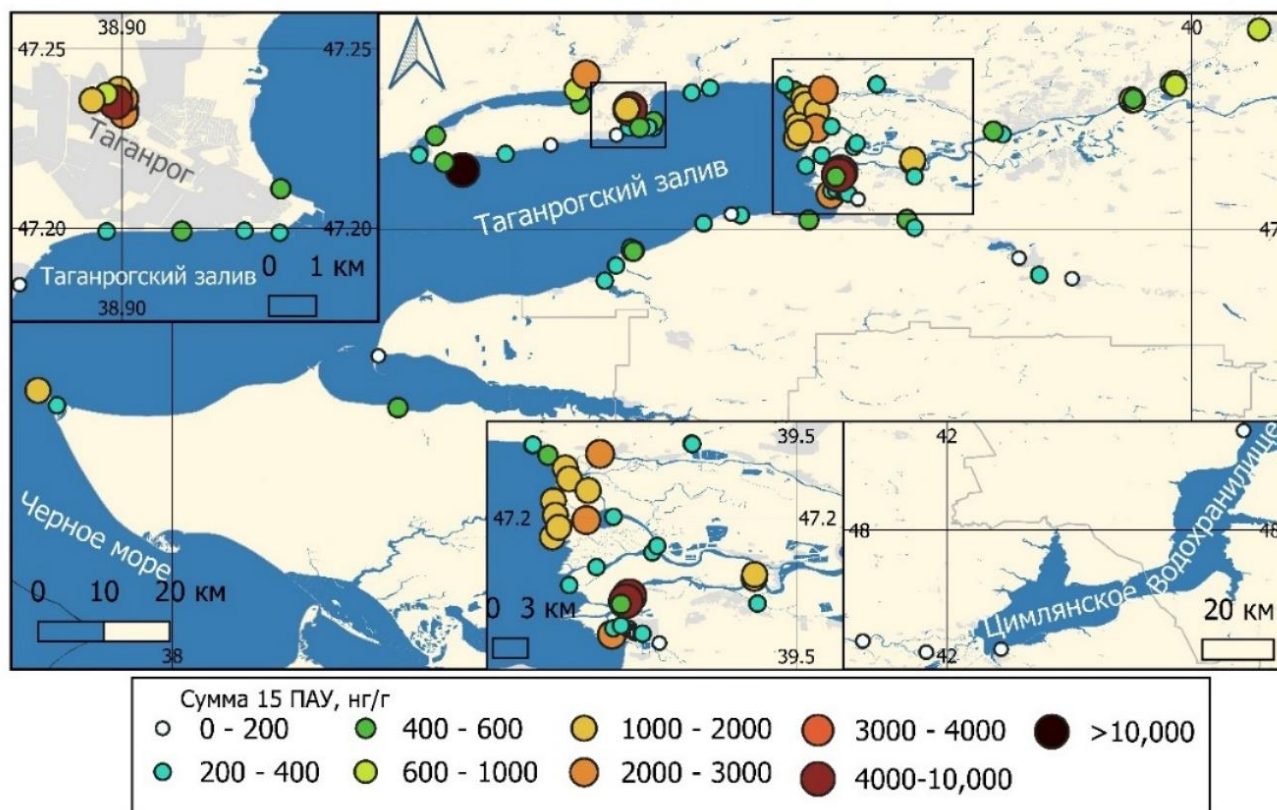


Рисунок 2. Пространственное распределение суммарного содержания 15 приоритетных ПАУ в почвах Нижнего Дона и Таганрогского залива

Выявлена взаимосвязь между суммарным содержанием ПАУ в почвах и содержанием индивидуальных представителей полиаренов. Степень взаимосвязи и её наличие указывает на те соединения, содержание которых увеличивается с повышением техногенной нагрузки. При рассмотрении результатов анализа на основе всего пула данных установлено, что по мере повышения суммарного содержания ПАУ в почвах исследуемой территории наблюдается взаимосвязанное увеличение концентрации практически всех полиаренов, за исключением нафталина, что вероятнее всего обусловлено его педогенным происхождением. В почвах побережья рек, впадающих в Таганрогский залив, суммарное содержание ПАУ увеличивается с повышением содержания 5-ти кольчатых соединений, включая наиболее опасный – бенз(а)пирен (табл. 3).

Таблица 3. Ранговая корреляция (r) между суммарным содержанием ПАУ и содержанием индивидуальных полиаренов в почвах исследуемой территории

ПАУ	Вся территория (n=97)	Нижний Дон (n= 11)	Дельта Дона (n=29)	Таганрогский залив (n=29)	Реки залива (n=22)	г. Таганрог (n=7)
1	2	3	4	5	6	7
Нафталин	0.07	0.33	0.22	-0.43	0.21	0.07
Флуорен	0.69	0.97	0.68	0.73	0.21	0.04
Фенантрен	0.88	0.95	0.88	0.82	0.39	0.75
Антрацен	0.46	0.93	0.02	0.68	0.42	0.64
Аценафтен	0.62	0.57	0.62	0.55	0.24	0.86
Аценафтилен	0.67	0.84	0.68	0.65	0.20	0.61
Флуорантен	0.96	0.95	0.93	0.76	0.91	0.99
Пирен	0.82	0.99	0.81	0.90	0.62	0.96

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
Хризен	0.82	0.99	0.74	0.89	0.58	0.99
Бенз(а)антрацен	0.94	0.92	0.94	0.74	0.81	0.82
Бенз(б)флуорантен	0.90	0.90	0.98	0.74	0.76	0.96
Бенз(к)флуорантен	0.83	0.79	0.84	0.64	0.86	0.96
Бенз(а)пирен	0.87	0.92	0.90	0.65	0.81	0.96
Дибенз(а,һ)антрацен	0.90	0.99	0.99	0.72	0.54	0.86
Бенз(ɡ,һ,і)перилен	0.89	0.95	0.98	0.76	0.71	1.00

Отличительной особенностью наиболее загрязненных почв прибрежной зоны г. Таганрога и дельты Дона является значительно более выраженная аккумуляция флуорена, аценафтена, аценафтилена, бенз(к)флуорантена и бенз(а)пирена, что указывает на сочетание транспортно-промышленных и нефтепродуктовых источников. Различия между почвами г. Таганрога и дельты Дона заключаются в содержании антрацена и фенантрена: в городских почвах аккумулируется значительно меньшее количество антрацена и значительно большее количество фенантрена (рис. 3).

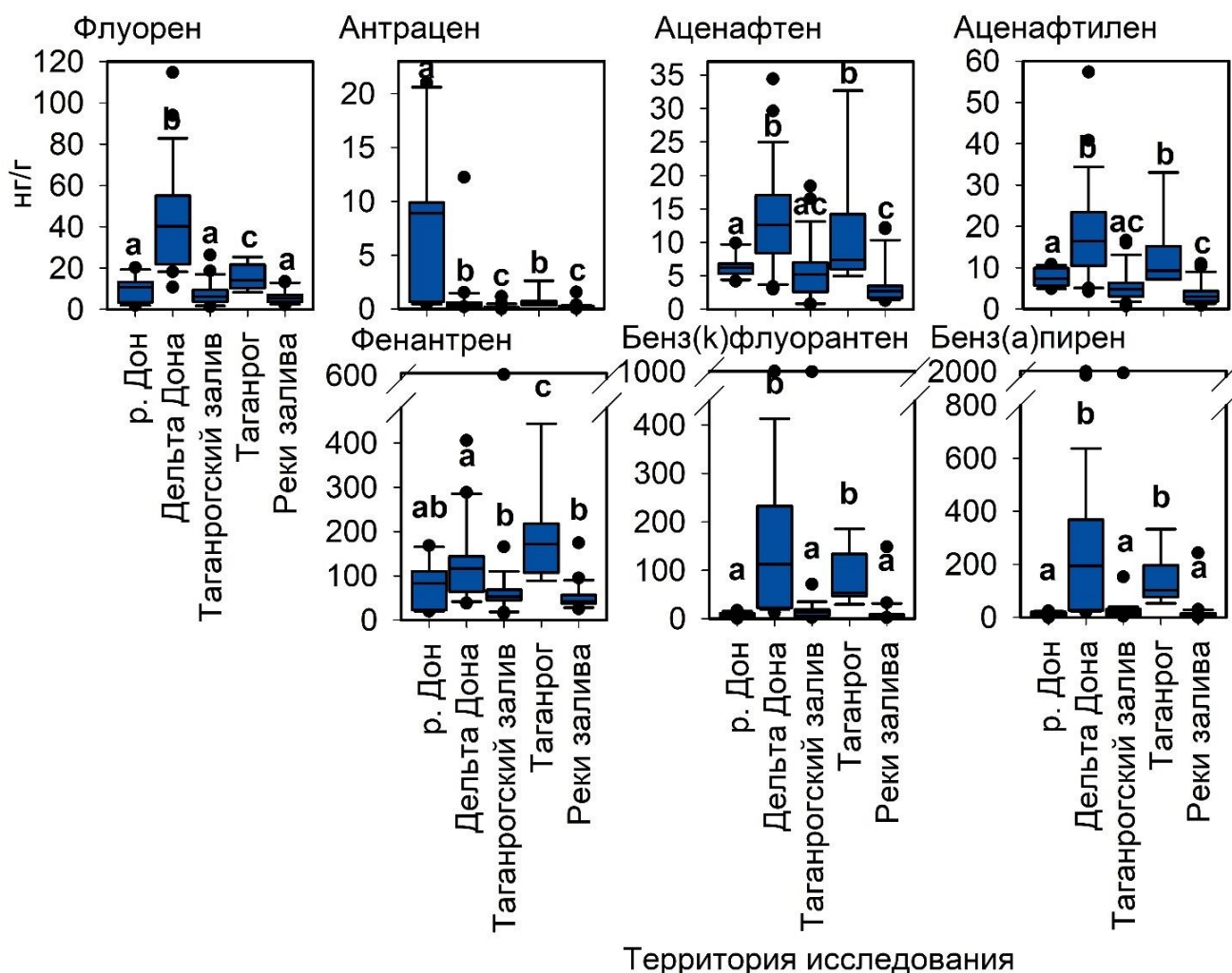


Рисунок 3. Содержание индивидуальных соединений ПАУ в почвах прибрежных зон Нижнего Дона и его дельты, Таганрогского залива, г. Таганрога и малых рек, впадающих в Таганрогский залив. Буквы указывают на значимые различия, полученные по результатам критерия Тьюки для неравнозначных выборок ($p < 0,05$).

Результаты расчета диагностических соотношений ПАУ показали, что практически все почвы исследуемой прибрежной территории подвержены техногенному влиянию, причем

накопление полиаренов часто связано со смешанными источниками. При этом почвы площадок мониторинга группируются в зависимости от преобладающих путей поступления ПАУ (рис. 4, 5). Первая группа представлена почвами дельты р. Дон, для которых характерно поступление поллютантов преимущественно с разливами топлива. Для второй группы поступление ПАУ обусловлено преимущественно сжиганием углеродсодержащих материалов. Третья группа представлена слабозагрязненными почвами, расположенными вблизи Цимлянского водохранилища, р. Кагальник и южного побережья Таганрогского залива.

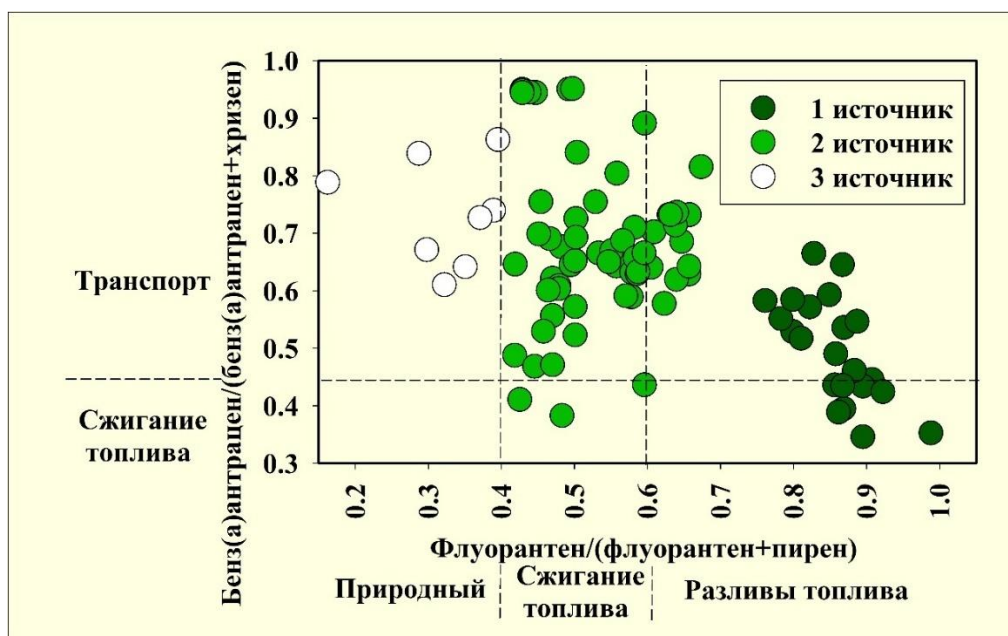


Рисунок 4. Идентификация источников происхождения ПАУ в почвах по диагностическим соотношениям

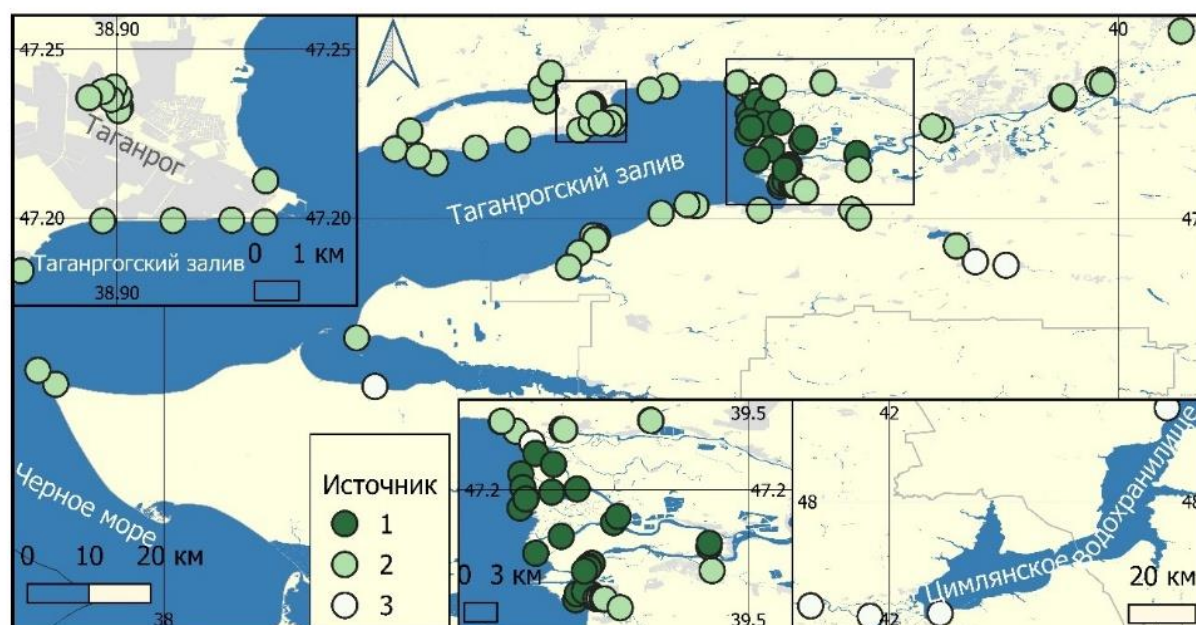


Рисунок 5. Группировка почв по источникам происхождения ПАУ в пространстве

По результатам факторного анализа с учетом критерия Кайзера выделено два фактора с собственными значениями более 1. В совокупности полученные факторы описывают 77,1% общей дисперсии. Вклад фактора 1 в полученную модель составил 63,6%, фактора 2 – 13,5%. Первый фактор (63,6%) нагружен 3-х кольчатыми за исключением антрацена, а также 4-х

кольчатыми флуорантеном, бенз(а)антраценом, 5-ти и 6-ти кольчатыми ПАУ. Значительный вклад во второй фактор (13,5%) вносят пирен и хризен. Исходя из результатов факторного анализа почвы площадок мониторинга группируются в пространстве в зависимости от типа источника эмиссии, его интенсивности, а также свойств почв. Распределение почвенных кластеров, полученных в ходе факторного анализа (рис. 6), согласуется с группировкой почв в пространстве относительно источников поступления поллютантов (рис. 5). При этом группа почв, которая подвержена влиянию пирогенного источника ПАУ (группа 2 на рис. 5), подразделяется на 2 подгруппы (кластер 1 и 3 на рис. 6). Суммарное содержание ПАУ в почвах данных подгрупп сильно варьирует (рис. 2). Однако отмечаются более высокие концентрации поллютантов в почвах кластера 3, что связано с близостью расположения участков мониторинга к импактным зонам промышленной территории г. Таганрог (№ 78-84) (рис. 1, 2) и Новочеркасской ГРЭС (№ 1-4), а также крупных населенных пунктов (№ 5-8, 66).

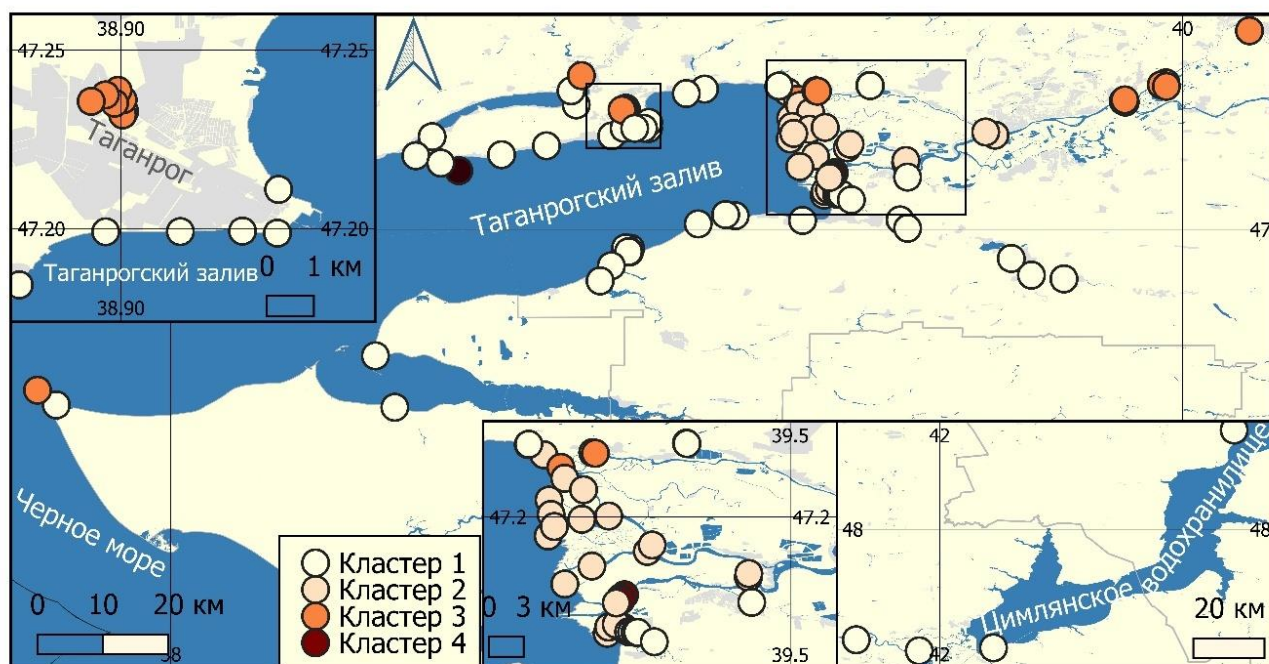


Рисунок 6. Группировка почв по источникам происхождения ПАУ в пространстве

Пространственное распределение содержания ПАУ и вероятных источников их поступления показывает, что даже при сходном генезисе полиаренов близко расположенные площадки часто неоднородны по суммарному содержанию 15 ПАУ. Установлено, что при относительно близком расположении площадок мониторинга (до 2 км) концентрации поллютантов в почвах могут различаться в десятки и даже сотни раз, что обусловлено варьированием физических и химических свойств почв. Наиболее выражена взаимосвязь между содержанием высокомолекулярных полиаренов и органическим углеродом, физической глиной, илом, особенно в прибрежных почвах Нижнего Дона и его дельты (рис. 7, 8).

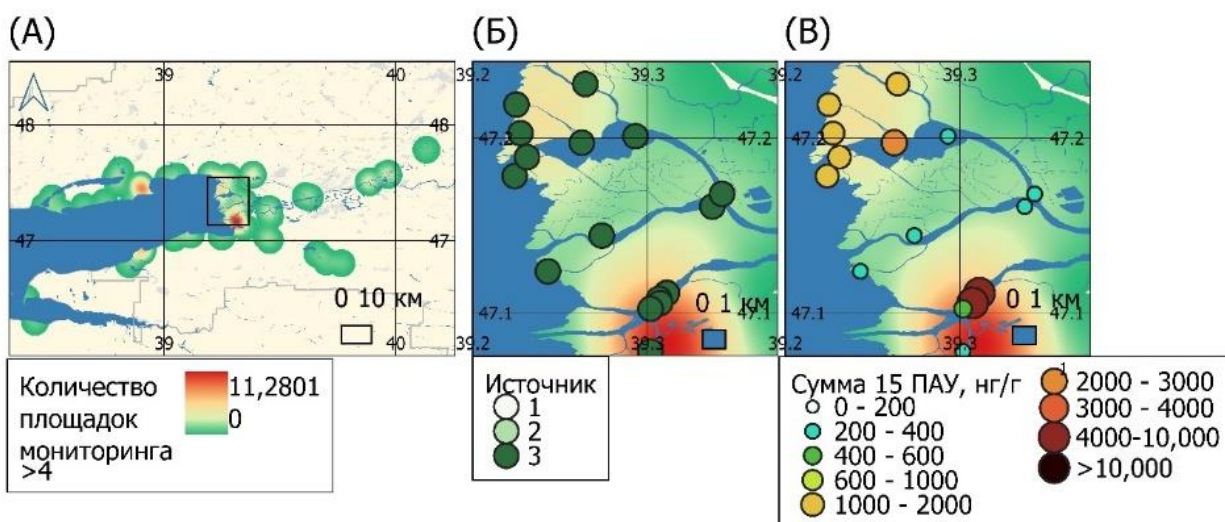


Рисунок 7. Сопоставление почв близкорасположенных площадок мониторинга (А) по источникам происхождения (В) и суммарному содержанию в них ПАУ (С)

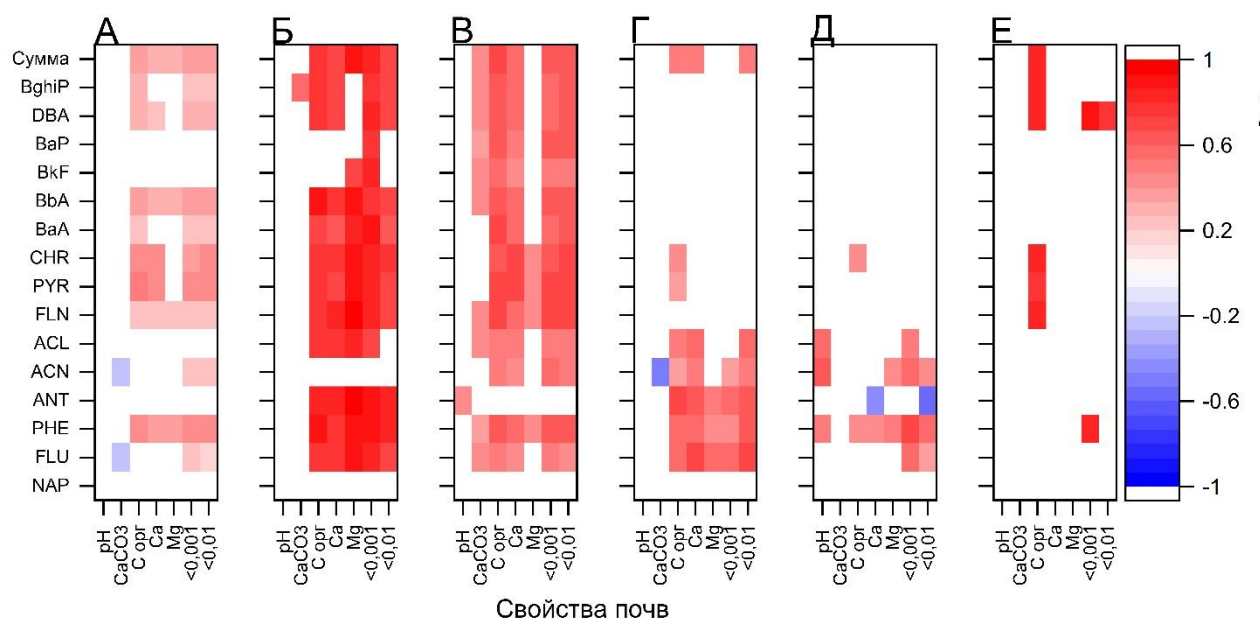


Рисунок 8. Взаимосвязь содержания индивидуальных соединений ПАУ, а также их суммы со свойствами прибрежных почв всей исследуемой территории (А), Нижнего Дона (Б), дельты Дона (В), Таганрогского залива (Г), малых рек, впадающих в залив (Д), города Таганрога (Е), определенная с использованием коэффициента корреляции Спирмена ($p < 0,05$)

Полиарены подвержены процессам биodeградации, в меньшей степени хемо- и фотodeградации, которые, в свою очередь, зависят от типа, интенсивности, длительности воздействия источников их поступления и свойств почв (Сушкова, 2020, Dudnikova et al., 2023, 2024, 2025). Состав ПАУ в суглинистых гидроморфных почвах стабилен даже при устранении влияния техногенного источника. В супесчаных почвах по сравнению с суглинистыми состав полиаренов менее стабилен, что обусловлено повышенным доступом кислорода, участвующего в микробиологическом окислении полиаренов. В почвах побережья Таганрогского залива, рек, впадающих в него, и р. Дона, состав высокомолекулярных соединений ПАУ практически не меняется между суглинистыми и супесчаными почвами, что свидетельствует о преобладании процессов поступления и закрепления поллютантов в почвенной матрице. Наиболее интенсивно аккумуляция полиаренов происходит в почвах

дельты Дона, поскольку с уменьшением содержания мелкодисперсной фракции наблюдается увеличение доминирования низкомолекулярных ПАУ (рис. 9, 10).

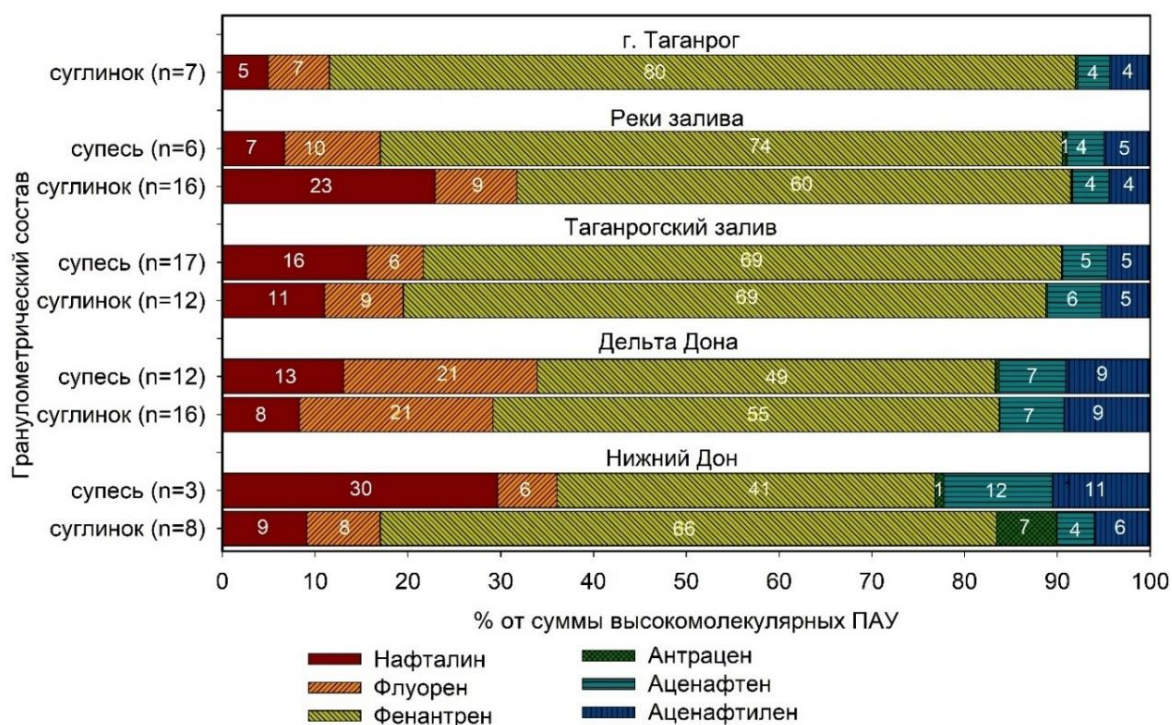


Рисунок 9. Соотношение индивидуальных ПАУ в составе суммы низкомолекулярных соединений в почвах прибрежной территории Нижнего Дона и его дельты, побережья Таганрогского залива и рек, впадающих в залив, а также г. Таганрога по медианным значениям

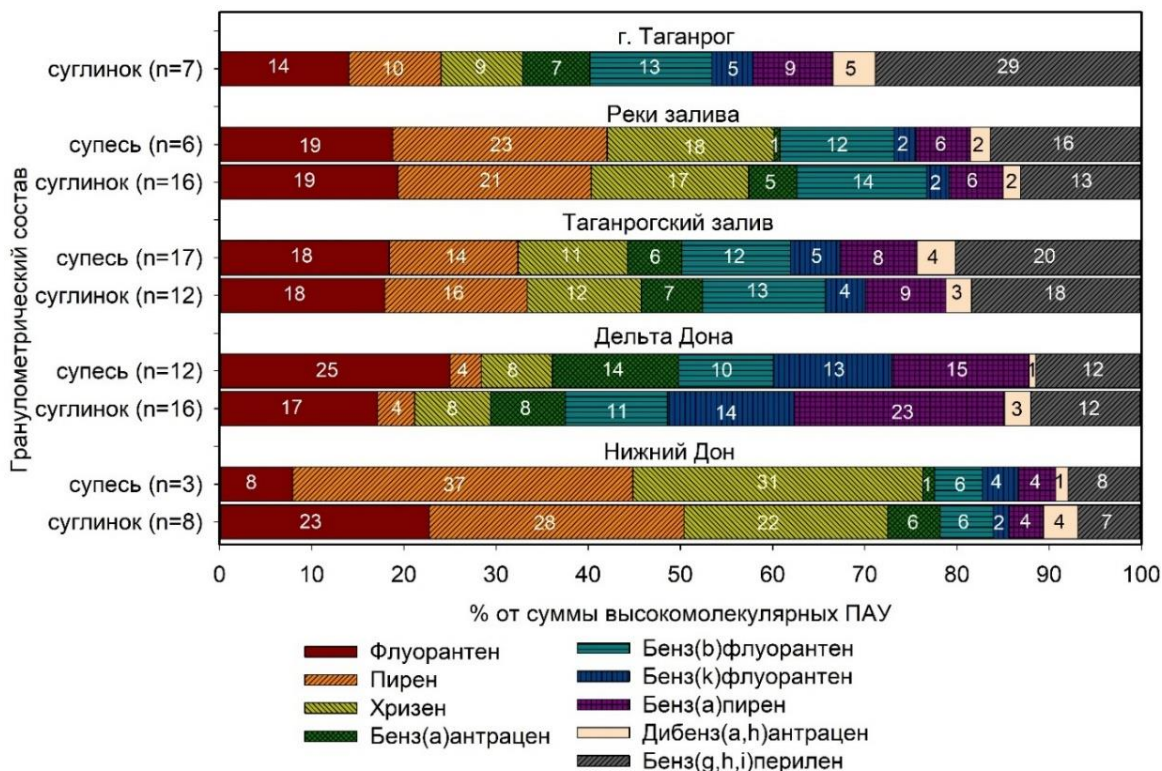


Рисунок 10. Соотношение индивидуальных ПАУ в составе суммы высокомолекулярных соединений в почвах прибрежной территории Нижнего Дона и его дельты, побережья Таганрогского залива и рек, впадающих в залив, а также г. Таганрога по медианным значениям

С использованием величин K_c и Z_c проведена оценка экологического состояния почв прибрежной зоны Нижнего Дона и Таганрогского залива (рис. 11, 12). Результаты расчета коэффициента концентрации ПАУ в почвах исследуемой территории свидетельствуют о значительном варьировании уровня концентрирования ПАУ в почвах относительно фона. В целом, по медианным значениям низкомолекулярные и 4-х кольчатые ПАУ такие как флуорен, фенантрен, аценафтен, аценафтилен, флуорантен, пирен и хризен характеризуются околофоновыми значениями. По медиане значения K_c нафталин и антрацен являются рассеивающимися соединениями. Флуорантен характеризуется средним уровнем концентрирования в почвах, другие высокомолекулярные ПАУ – сильным и очень сильным уровнем концентрирования. По максимальным значениям K_c практически все ПАУ характеризуются сильным и очень сильным уровнем концентрирования. Исключение составляет нафталин, максимальное значение K_c которого соответствует среднему уровню концентрирования ПАУ. Для почв, подверженных интенсивному техногенному воздействию со стороны промышленных объектов и автотранспорта города Таганрог, характерно чрезвычайно сильное концентрирование наиболее опасных 5-ти и 6-ти кольчатых ПАУ, а также бенз(а)антрацена ($K_c > 15$). При условии преобладания источника поступления ПАУ, связанного с разливами нефтепродуктов, в почвах береговой зоны дельты чрезвычайно высоким уровнем концентрирования обладают также 5-ти и 6-ти кольчатые ПАУ. Заметным отличием от почв города является меньшее концентрирование бенз(g,h,i)перилена и бенз(b)флуорантена. В почвах прибрежной зоны Нижнего Дона чрезвычайно высокий уровень концентрирования ПАУ установлен только для дибенз(а)антрацена и антрацена, очень высокий – для флуорантена, пирена и бенз(а)антрацена. Другие высокомолекулярные ПАУ характеризуются средним уровнем концентрирования в почве. В почвах побережья Таганрогского залива 5-ти и 6-ти кольчатые ПАУ характеризуются сильным концентрированием, бенз(k)флуорантен – очень сильным концентрированием, низкомолекулярные и 4-х кольчатые соединения по K_c соответствуют околофоновым значениям. Содержание практически всех исследуемых ПАУ в почвах прибрежных зон рек, впадающих в Таганрогский залив близко к фоновым значениям. Исключение составляют бенз(g,h,i)перилен и бенз(а)пирен, которые относятся к соединениям с низким уровнем концентрирования, а также бенз(b)флуорантен – со средним уровнем концентрирования.

Результаты расчета суммарного показателя Z_c показали, что только 11% почв площадок мониторинга прибрежной зоны соответствуют неопасной категории загрязнения. Большинство данных площадок мониторинга сосредоточено на побережье нижнего Дона вблизи Цимлянского водохранилища, а также реки Кагальник. В категорию с допустимым уровнем загрязнения почв входят 10%, малоопасных – 4% и умеренно опасных – 22% исследуемых площадок мониторинга, которые представлены преимущественно почвами прибрежной зоны р. Кагальник и Таганрогского залива. Категория опасных почв занимает 23%. Почвы с опасным уровнем загрязнения встречаются на побережье Дона, в его дельте, на берегу Таганрогского залива, Миусского лимана и устья реки Кагальник. К очень опасной категории относятся почвы площадок мониторинга, расположенные в зоне влияния Новочеркасской ГРЭС, в промышленных районах города Таганрог и в устье реки Миус (рис. 11). Наиболее значительный вклад в загрязнение вносят бенз(k)флуорантен и бенз(g,h,i)перилен, реже — флуорантен, бенз(b)флуорантен и бенз(а)пирен (рис. 12).

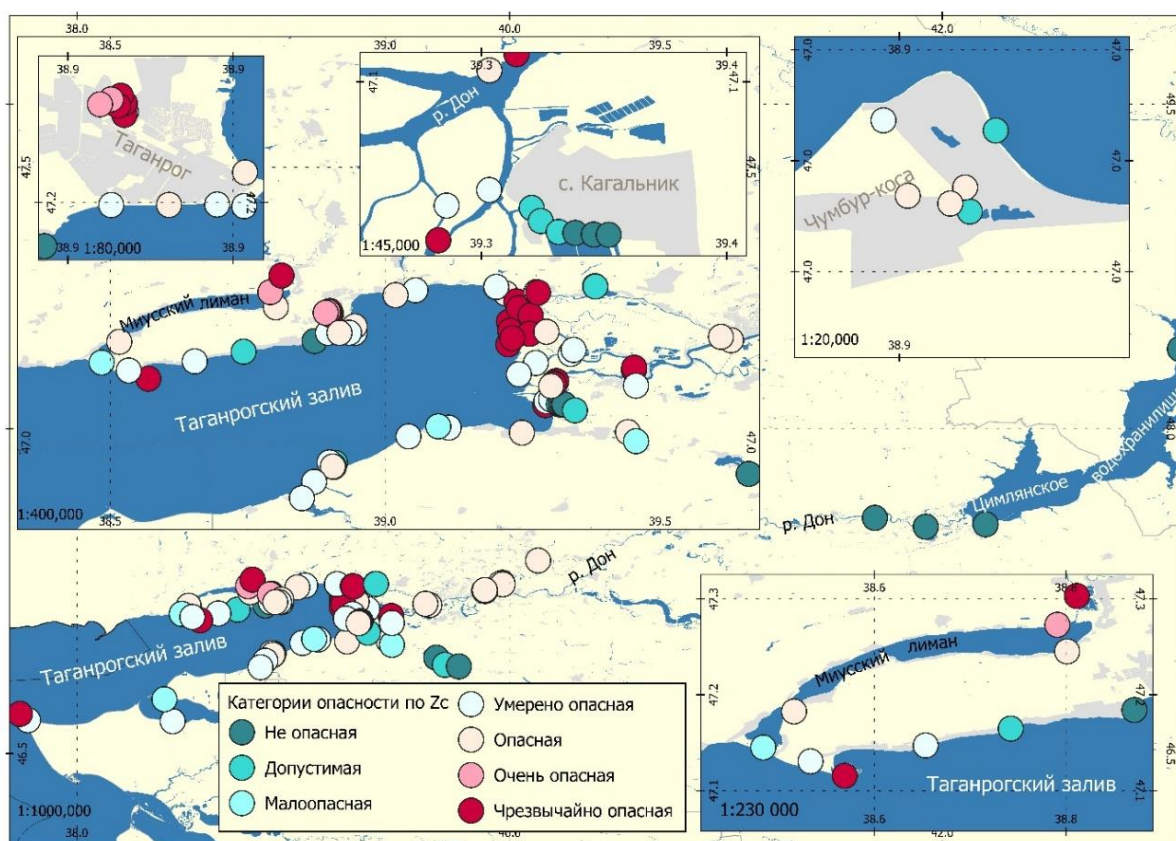


Рисунок 11. Категории опасности почв площадок мониторинга прибрежной зоны

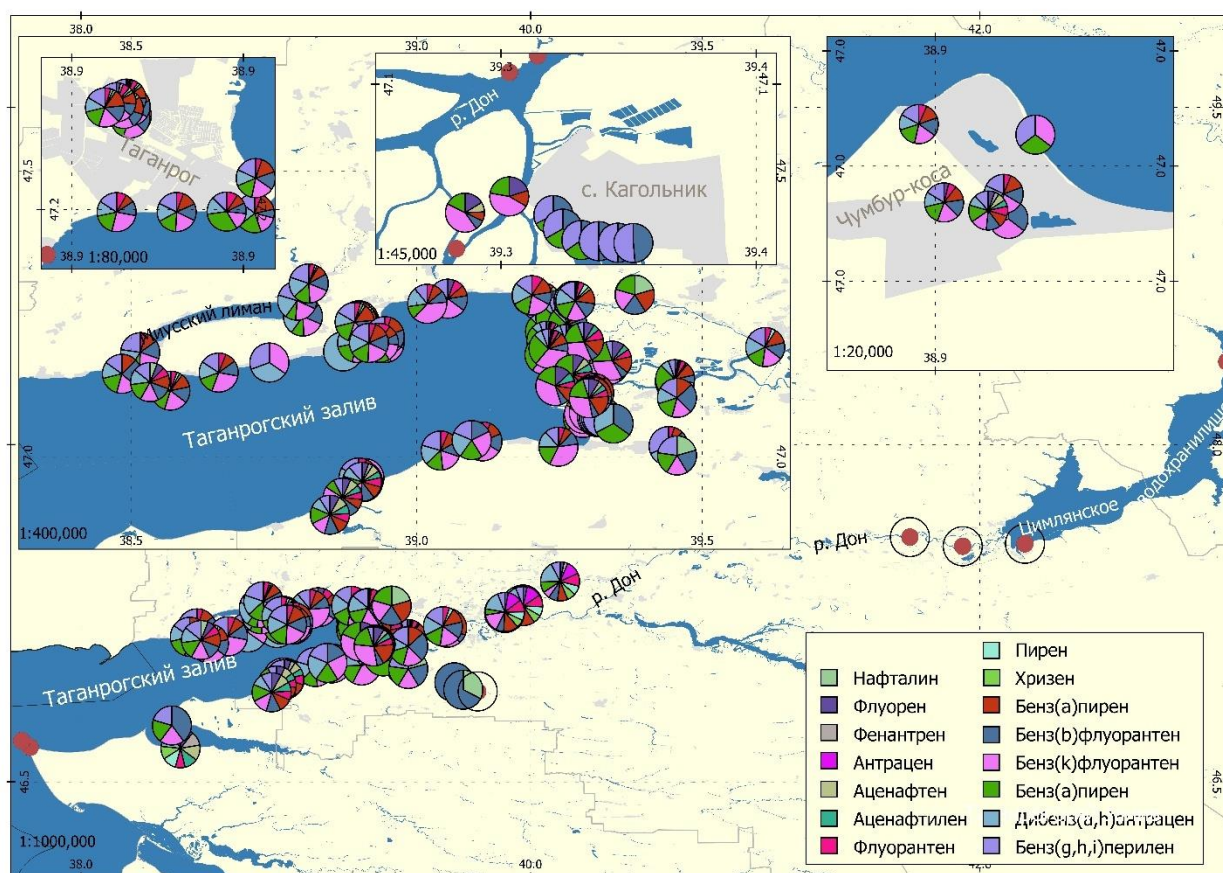


Рисунок 12. Вклад индивидуальных соединений ПАУ в загрязнение почв прибрежной зоны, определенный по величинам коэффициента концентрации (K_c)

Профильное распределение суммы 15 приоритетных ПАУ свидетельствует о преимущественно аккумулятивном типе их накопления: максимальные концентрации поллютантов приурочены к верхним горизонтам 0–20 см, содержание в нижележащих горизонтах снижается (рис. 13). Исключения связаны с почвами, где перераспределение органического вещества и мелкодисперсных фракций создает дополнительные сорбционные горизонты. По мере снижения содержания поллютантов с глубиной наблюдается перераспределение индивидуальных соединений ПАУ в составе их суммы. Выявлено увеличение доли низкомолекулярных соединений, особенно фенантрена, а также 4-х кольчатых флуорантена и пирена (рис. 14). В целом низкомолекулярные соединения обладают большей миграционной способностью по сравнению с высокомолекулярными. Фенантрен вследствие более высокой растворимости сохраняется в нижележащих горизонтах до 50 % от его содержания в верхнем горизонте. Такая закономерность отражает сочетание поверхностного поступления ПАУ и их различной миграционной способности в зависимости от молекулярной массы.

Отличительной особенностью профильного распределения ПАУ в аллювиальной луговой насыщенной слоистой почве является наличие второго максимума их накопления в средней части профиля. Эффект характерен для менее загрязненных аллювиальных луговых насыщенных слоистых почв, в которых суммарное содержание ПАУ верхних горизонтов не превышает 500 нг/г. При более высоком загрязнении поверхностного слоя второй максимум накопления ПАУ в средней части профиля не выражен. Анализ индивидуальных соединений выявил дифференциацию ПАУ по профилю почв независимо от уровня загрязнения (рис. 15). В целом изменения содержания индивидуальных соединений ПАУ соответствуют распределению органического углерода в профиле.

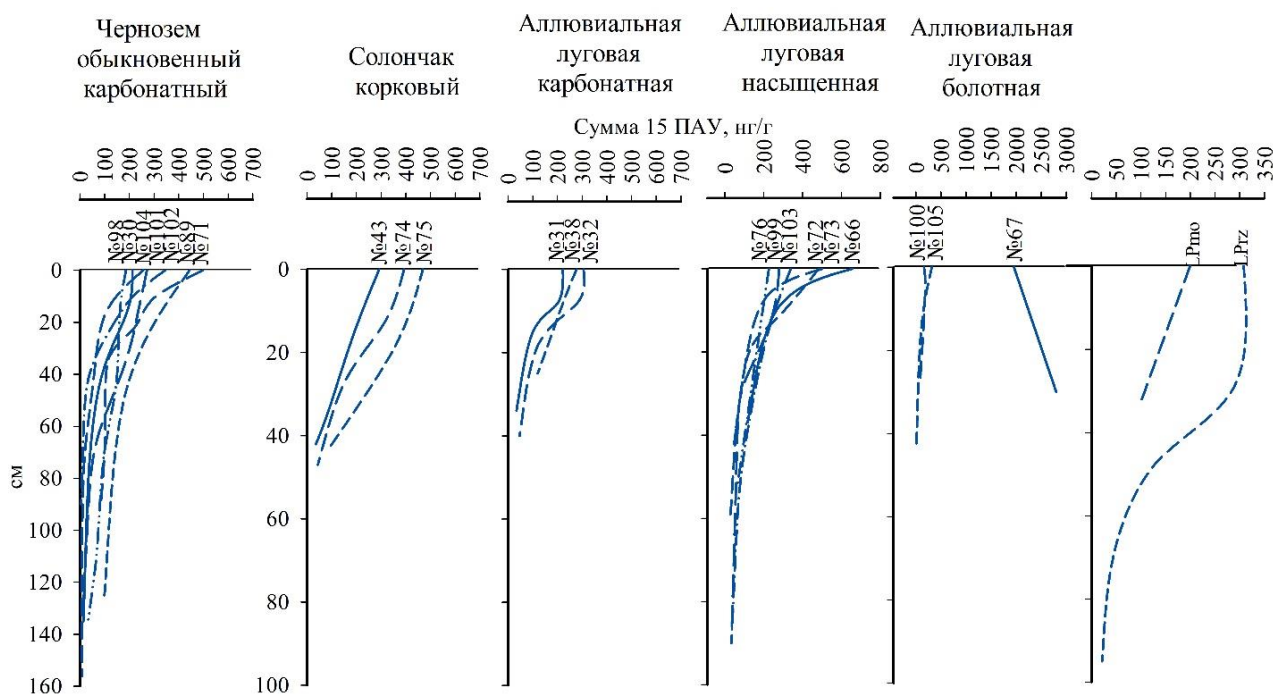


Рисунок 13. Профильное распределение суммарного содержания 15 ПАУ в прибрежных почвах различных типов. Примечание: LPrz – дерново-карбонатная, LPmo – неполноразвитая степная

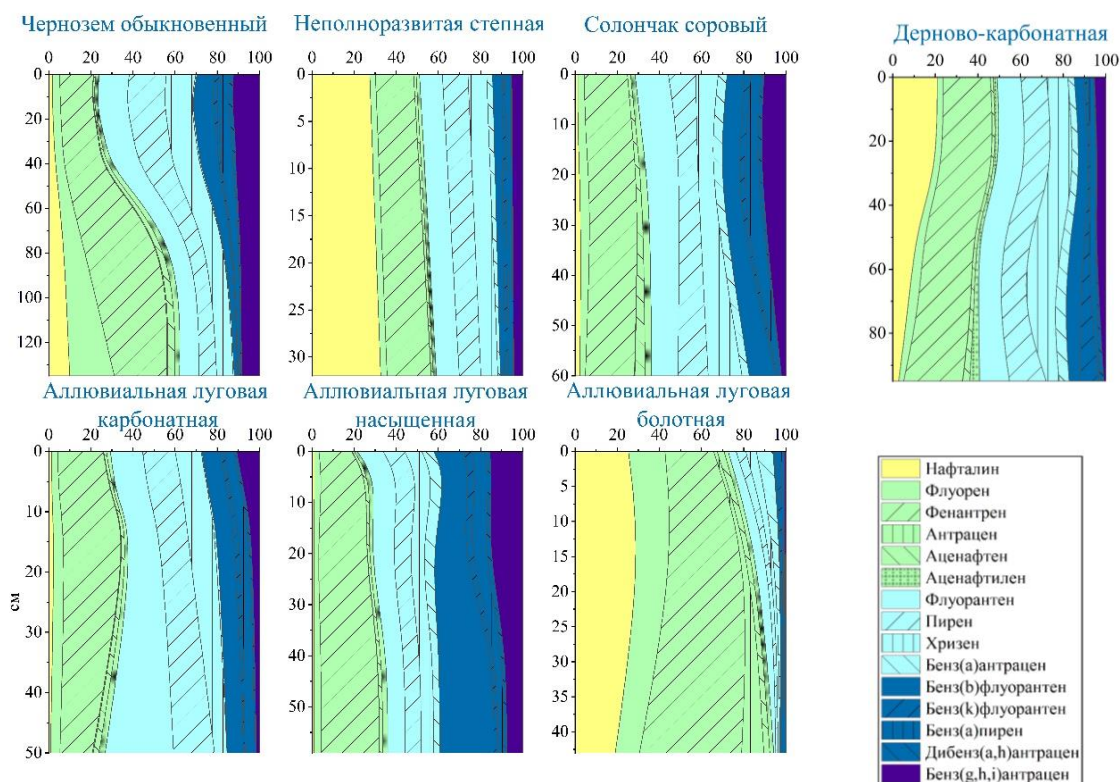


Рисунок 14. Профильное распределение индивидуальных соединений в процентах от суммарного содержания 15 ПАУ в почвах прибрежной зоны Нижнего Дона и Таганрогского залива

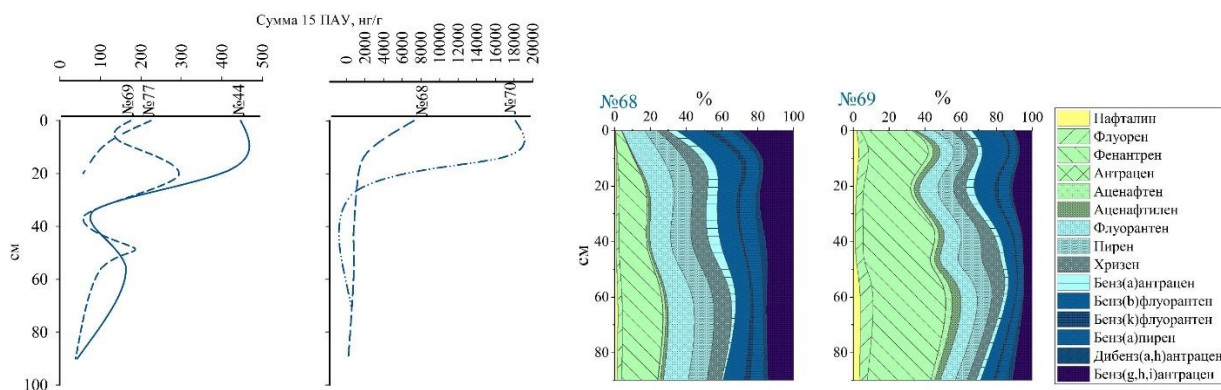


Рисунок 15. Профильное распределение суммарного содержания 15 ПАУ в аллювиальных луговых насыщенных слоистых почвах, а также относительное распределение индивидуальных соединений полиаренов

С увеличением молекулярной массы и размера молекулы ПАУ снижение содержания поллютантов с глубиной усиливается, о чем свидетельствуют результаты регрессионного анализа. Снижение содержания ПАУ аппроксимировано экспоненциальным уравнением: для низкомолекулярных соединений коэффициент детерминации $R^2 = 0,41$ ($p < 0,001$), для высокомолекулярных — $R^2 = 0,50$ ($p < 0,001$) (рис. 16). По результатам корреляционного анализа выявлена взаимосвязь содержания ПАУ со свойствами почв. Наибольшее количество значимых положительных корреляций отмечается между Сорг и всем пулом рассматриваемых ПАУ для почв, незагрязненных с поверхности (0-20 см) по Z_c ($r = 0,50-0,84$, при $p < 0,05$) (табл. 4).

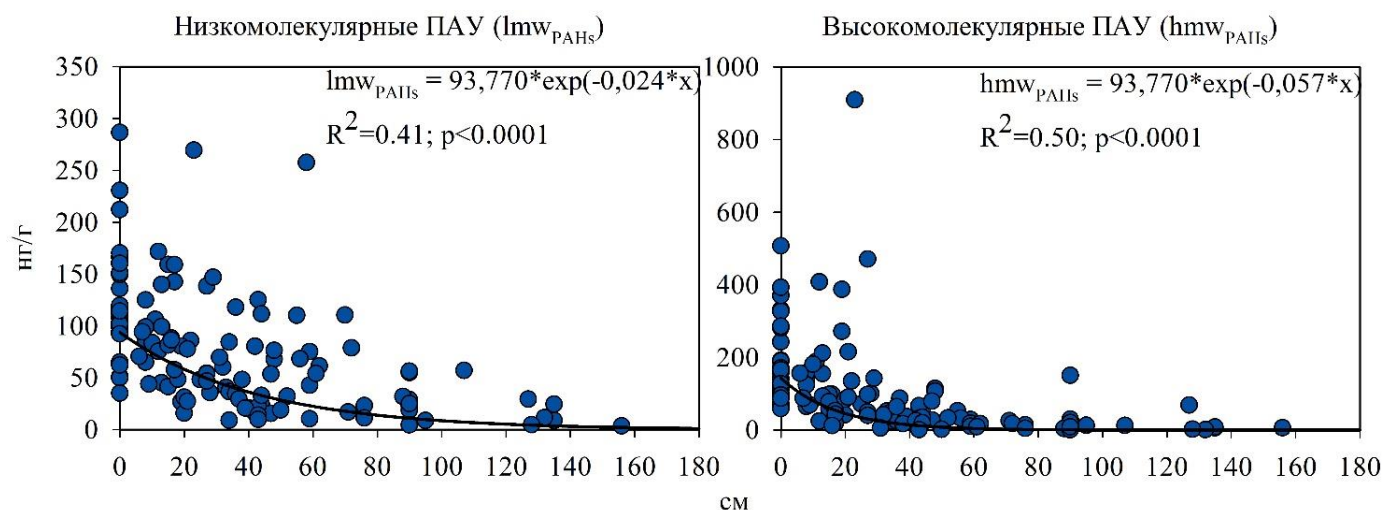


Рисунок 16. Взаимосвязь содержания низкомолекулярных и высокомолекулярных ПАУ с глубиной почвенного профиля, полученная по результатам регрессионного анализа с использованием экспоненциального уравнения

Таблица 4. Ранговая корреляция (r) между содержанием органического вещества и содержанием ПАУ в почвах при различной техногенной нагрузке

ПАУ	Загрязненные (n=111)	Незагрязненные (n=15)
Нафталин	0,49	0,59
Флуорен	0,58	0,50
Фенантрен	0,55	0,84
Антрацен	0,33	0,74
Аценафтен	0,48	0,49
Аценафтилен	0,46	0,53
Флуорантен	0,40	0,84
Пирен	0,52	0,76
Бенз(а)антрацен	0,63	0,75
Хризен	0,48	0,78
Бенз(б)флуорантен	0,38	0,73
Бенз(к)флуорантен	0,48	0,80
Бенз(а)пирен	0,50	0,77
Дибенз(а, h)антрацен	0,36	0,69
Бенз(g, h, i)перилен	0,40	0,74

ВЫВОДЫ

1. Почвенный покров прибрежной зоны Нижнего Дона и побережья Таганрогского залива представлен гидроморфными, полугидроморфными и автоморфными почвами, среди которых преобладают аллювиальные луговые насыщенные, аллювиальные луговые насыщенные слоистые, аллювиальные луговые карбонатные, аллювиальные луговые болотные почвы, солончаки соровые, черноземы обыкновенные карбонатные и урбаноземы. Почвы характеризуются значительным варьированием физических и химических свойств и различаются по гранулометрическому составу от песков до легких глин (1,3-67,8% физической глины), по содержанию гумуса (0,2-6,8%), карбонатов (0,2-8,3%), обменных катионов Ca^{2+} (3,2-36,3 смоль(+)/кг) и Mg^{2+} (0,2-13,2 смоль(+)/кг) и ЕКО (4,8–47,5 смоль(+)/кг), что обуславливает неодинаковую способность почв к аккумуляции и удерживанию ПАУ.

2. В связи с большим разнообразием свойств почв, уровня и типа техногенной нагрузки суммарное содержание в них 15 приоритетных ПАУ варьирует в широких пределах — 76,6–

16017,0 нг/г при среднем значении 1040,1 нг/г и медиане 406,4 нг/г. Для большей части территории побережья Нижнего Дона, Таганрогского залива и малых рек характерны фоновые и умеренно повышенные концентрации ПАУ в почвах. Наиболее высокие уровни накопления полиаренов установлены в дельте Дона и г. Таганрог. Почвы территорий г. Таганрог и дельты реки Дон характеризуются значительно большим накоплением флуорена, фенантрена, антрацена, аценафтена, аценафтилена, бенз(к)флуорантена и бенз(а)пирена, чем в почвах побережья Таганрогского залива, рек, впадающих в залив и Нижнего Дона.

3. На основе диагностических соотношений, пространственного анализа и факторного анализа выделены основные источники поступления ПАУ: пирогенные, пирогенно-угольные и связанные с нефтепродуктами. Показано, что ведущая роль в формировании состава ПАУ в почвах прибрежной зоны принадлежит техногенному воздействию, тогда как вклад педогенных процессов выражен преимущественно в менее загрязненных гидроморфных почвах.

4. Установлено, что 95% изученных почв прибрежной зоны подвержены техногенному воздействию. Согласно величине суммарного показателя загрязнения, примерно 30% изученных образцов почв относятся к опасной и чрезвычайно категории загрязнения, что особенно выражено для прибрежной зоны г. Таганрог и дельты Нижнего Дона. Весомый вклад в общий уровень загрязнения прибрежного г. Таганрог вносит бенз(g,h,i)перилен, в гидроморфных почвах дельты Дона — бенз(к)флуорантен, что указывает на значимость высокомолекулярных ПАУ, как индикаторов техногенного воздействия.

5. Профильное распределение ПАУ в большинстве исследованных почв соответствует аккумулятивному типу: максимальные концентрации полиаренов приурочены к верхним горизонтам, степень снижения их содержания с глубиной возрастает с увеличением молекулярной массы соединений. Миграция ПАУ в почвенном профиле усиливается в гидроморфных условиях и зависит от уровня техногенной нагрузки, гранулометрического состава и содержания гумуса в почвах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

Profile distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal soils of the Lower Don and Taganrog Bay, Russia / T. Dudnikova, T. Minkina, S. Sushkova [et al.] // Eurasian Journal of Soil Science. – 2024. – Vol. 13, No. 2. – P. 111-124. – DOI 10.18393/ejss.1403723. – URL: <https://doi.org/10.18393/ejss.1403723> K1

Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene by Soils of the Taganrog Bay Coastal Zone, Russia / T. S. Dudnikova, T. M. Minkina, G. K. Vasilyeva [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2025. – Vol. 58, No. 6. – P. 75. – DOI 10.1134/S1064229324603822. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229324603822>. [Русскоязычная версия: Сорбция и десорбция бенз(а)пирена почвами прибрежной зоны Таганрогского залива, Россия / Т. С. Дудникова, Т. М. Минкина, Г. К. Васильева [и др.] // Почвоведение. – 2025. – № 6. – С. 785-801. – DOI 10.7868/s3034561825060036]. K1

Features of the polycyclic aromatic hydrocarbon's spatial distribution in the soils of the Don River delta / T. Dudnikova, T. Minkina, S. Sushkova [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2023. – Vol. 45, No. 12. – P. 9267-9280. – DOI 10.1007/s10653-022-01281-1. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01281-1>. K1

Microbiological status of natural and anthropogenic soils of the Taganrog Bay coast at different levels of combined pollution with heavy metals and PAHs / E. P. Pulikova, F. Ivanov, A. V. Gorovtsov [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2023. – Vol. 45, No. 12. – P. 9373-9390. – DOI 10.1007/s10653-022-01405-7. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01405-7>. K1

Uptake of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons from the hydromorphic soil and their cellular effects on the *Phragmites australis* / T. M. Minkina, A. G.

Fedorenko, D. G. Nevidomskaya [et al.] // Environmental Pollution. – 2022. – Vol. 309. – P. 119727. – DOI 10.1016/j.envpol.2022.119727. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119727>. K1.

Soil PAHs contamination effect on the cellular and subcellular organelle changes of *Phragmites australis* Cav / S. Sushkova, T. Minkina, V. Radzhput [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. – Vol. 43, No. 6. – P. 2407-2421. – DOI 10.1007/s10653-020-00735-8. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00735-8>. K1

The effect of combined pollution by PAHs and heavy metals on the topsoil microbial communities of Spolic Technosols of the lake Atamanskoe, Southern Russia / A. V. Gorovtsov, K. Demin, S. N. Sushkova [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2022. – Vol. 44, No. 4. – P. 1299-1315. – DOI 10.1007/s10653-021-01059-x. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01059-x>. K1

Transfer and Degradation of PAHs in the Soil–Plant System: A Review / S. Tarigholizadeh, S. Sushkova, V. D. Rajput [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2024. – Vol. 72, No. 1. – P. 46-64. – DOI 10.1021/acs.jafc.3c05589. – URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c05589>. K1

A 10-Year Ecological Monitoring of Soils and *Triticum aestivum* in the Impact Zone of a Power Station / V. Chaplygin, T. Dudnikova, S. Mandzhieva [et al.] // Agriculture. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – P. 722. – DOI 10.3390/agriculture13030722. – URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030722>. K1

Ecological and human health impact assessments based on long-term monitoring of soil PAHs near a coal-fired power plant / E. Kravchenko, S. Sushkova, M. H. Raza [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2024. – Vol. 46, No. 8. – P. 288. – DOI 10.1007/s10653-024-02060-w. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02060-w>. K1

Influence of carbon-containing and mineral sorbents on the toxicity of soil contaminated with benzo[a]pyrene during phytotesting / S. Sushkova, T. Minkina, T. Dudnikova [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2022. – Vol. 44, No. 1. – P. 179-193. – DOI 10.1007/s10653-021-00899-x. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00899-x>. K1

Effects of benzo[a]pyrene toxicity on morphology and ultrastructure of *Hordeum sativum* / A. G. Fedorenko, N. P. Chernikova, T. M. Minkina [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. – Vol. 43, No. 4. – P. 1551-1562. – DOI 10.1007/s10653-020-00647-7. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00647-7>. K1

Публикации в сборниках трудов конференций

Monitoring the content of PAHs in the former sludge dump near the Seversky Donets River / S. Sushkova, T. S. Dudnikova, T. M. Minkina [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : [The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society, 19-24 July 2021, Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation]. – 2021. – Vol. 862, No. 1. – P. 012113. – DOI 10.1088/1755-1315/862/1/012113. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012113>.

Иные публикации

Background Content of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during Monitoring of Natural and Anthropogenically Transformed Landscapes in the Coastal Area Soils / T. S. Dudnikova, T. M. Minkina, S. N. Sushkova [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, No. 13. – P. 2424. – DOI 10.3390/w15132424. – URL: <https://doi.org/10.3390/w15132424>. K1

The morphological and functional organization of cattails *typha laxmannii* lepech. And *typha australis* schum. and thonn. under soil pollution by potentially toxic elements / T. M. Minkina, G. M. Fedorenko, D. G. Nevidomskaya [et al.] // Water. – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 227. – DOI 10.3390/w13020227. – URL: <https://doi.org/10.3390/w13020227>. K1

Physiological and Biochemical Responses of *Solanum lycopersicum* L. to Benzo[a]pyrene Contaminated Soils / M. S. Voloshina, V. D. Radzhput, N. P. Chernikova [et al.] // International

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВЭЖХ – высокоэффективная жидкостная хроматография
ЕКО – емкость катионного обмена
ПАУ – полициклические ароматические углеводороды
ПДК – предельно допустимая концентрация
АСЕ – аценафтен
АСН – аценафтилен
АНТ – антрацен
BaA – бенз(а)антрацен
BaP – бенз(а)пирен
BbF – бенз(б)флуорантен
BghiP – бенз(г,х,и)перилен
BkF – бенз(к)флуорантен
Сорг – органический углерод
CHR – хризен
CV – коэффициент вариации
DBA – дибенз(а,х)антрацен
FLN – флуорантен
FLU – флуорен
Кс – коэффициент концентрации
NAP – нафталин
PHE – фенантрен
PYR – пирен
Zс – суммарный показатель загрязнения