

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

На правах рукописи



ЩЕРБАКОВ АЛЕКСЕЙ ПАВЛОВИЧ

**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ДОН И ПОБЕРЕЖЬЯ
ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА**

1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2023

Работа выполнена на кафедре почвоведения и оценки земельных ресурсов
Академии биологии и биотехнологии 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 биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов,
заведующий

Официальные оппоненты: **Хасанова Резеда Фиргатовна**,
доктор биологических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное научное
учреждение Уфимский федеральный
исследовательский центр Российской академии наук,
Опытная станция «Уфимская», лаборатория селекции
зерновых и зернобобовых культур, заведующая,
главный научный сотрудник
Нестерук Галина Владимировна,
кандидат географических наук,
федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук»
(ЮНЦ РАН), лаборатория палеогеографии, научный
сотрудник

Защита диссертации состоится **26 декабря 2023 года в 17:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.01 по биологическим наукам на базе Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 712.

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/1319447/>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 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 ЮФУ801.01.01 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 исследования. Устье реки Дон и прибрежные районы Таганрогского залива Азовского моря – это уникальные по своей продуктивности территории Нижнего Дона и Северо-Восточного Приазовья. Здесь расположены такие города как Ростов-на-Дону, Таганрог, Азов, Новочеркасск, Батайск, находятся крупные промышленные предприятия, выбрасывающие большие объемы загрязняющих веществ, влияя на устойчивость экосистем (Невидомская и др., 2016; Никаноров, 2014; Матишов и др., 2015; Минкина и др., 2016). Поступление химических элементов с речным стоком и с прилегающих водосборов, периодическое затопление пойменных ландшафтов, близость грунтовых вод, обусловили в почвах поймы высокую активность и напряженность геохимических процессов.

Одними из наиболее опасных поллютантов, попадающих в природные среды в результате антропогенной деятельности, являются тяжелые металлы (ТМ). Металлы не подвержены биodeградации с течением времени, за счет чего они способны накапливаться в объектах окружающей среды и нести угрозу для различных живых организмов, передаваясь по трофической цепи. Это особенно опасно для устьевых экосистем, выполняющих роль природных барьеров благодаря активной аккумуляции всех привнесенных веществ. Механизмы процессов, обуславливающих состояние ТМ в почве, до настоящего времени изучены недостаточно, в том числе по причине отсутствия надежных методов контроля уровня загрязнения почв данными поллютантами.

Цель работы – изучить пространственное и профильное распределение тяжелых металлов (Pb, Cr, Cu, Cd, Zn, Mn и Ni) и их подвижность в почвах дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива.

Задачи исследования:

1. Определить влияние физических и химических свойств почв на пространственное распределение тяжелых металлов в почвах района исследования.
2. Установить внутрипрофильные особенности распределения тяжелых металлов в зональных и интразональных почвах района исследования.
3. Дать оценку подвижности тяжелых металлов в почвах исследуемой территории.
4. Выявить уровень антропогенной нагрузки на почвы рекреационных и природоохранных территорий по содержанию и составу соединений тяжелых металлов и буферной способности почв.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для гидроморфных геохимических ландшафтов подчиненных позиций характерно более высокое накопление тяжелых металлов в почвах по сравнению с

автоморфными. В почвах пойменных и прибрежных приморских ландшафтов дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива пространственное распределение и подвижность Cr, Ni, Cd, Mn, Pb, Cu, Zn формируется под влиянием свойств почв, определяющих буферность, таких как содержание органического вещества, физической глины и карбонатов.

2. В групповом составе соединений тяжелых металлов почв дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива преобладают прочно связанные формы. Среди непрочно связанных соединений ТМ большую часть составляют специфически сорбированные формы.

3. Показатели буферности почв и суммарного показателя загрязнения, рассчитанные с учетом непрочно связанных соединений тяжелых металлов, позволяют оценить уровень техногенной нагрузки на почвы рекреационных и природоохранных территорий. Буферная способность почв по отношению к Cr, Ni, Cd, Mn, Pb, Cu, Zn снижается от чернозема обыкновенного к неполноразвитой почве.

Научная новизна. Впервые изучены особенности аккумуляции и состава соединений ТМ в почвах прибрежных территорий в зависимости от их генезиса и степени техногенной нагрузки на территорию. Выявлены закономерности пространственного и внутрипрофильного распределения ТМ в почвах устьевой области реки Дон и побережья Таганрогского залива. Установлены особенности трансформации и миграции исследуемых поллютантов в почвах прибрежной территории по соотношению форм непрочно связанных соединений металлов. Впервые дана оценка буферной способности почв дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива по отношению к ТМ.

Теоретическая и практическая значимость. Исследованы особенности поведения ТМ в почвах гидроморфного ряда территории устьевой области р. Дон и побережья Таганрогского залива, имеющей важнейшее природоохранное и рекреационное значение.

В работе использована комбинация площадных эколого-геохимических исследований и изучения механизмов взаимодействия компонентов почв с ТМ. Выявлены пространственные закономерности содержания ТМ в почвах и оценена степень загрязнения ими почв исследуемой территории, установлены факторы, влияющие на устойчивость прибрежных экосистем. Результаты мониторинговых исследований, экспериментальных подходов и методов дадут возможность прогноза динамики экологического состояния изучаемой территории в условиях антропогенного воздействия. Полученные данные станут методологической базой для планирования природоохранных мероприятий в дельтовых и прибрежных зонах юга России. Результаты работы имеют перспективы практического использования научными, производственными и природоохранными

организациями для целей мониторинга почв, при оценке степени воздействия ТМ на состояние почв, экологическом нормировании химического загрязнения почв и определении предельно допустимой антропогенной нагрузки, разработке и внедрению способов восстановления почвенной компоненты загрязненных экосистем.

Методология исследований. Исследования проводились на основе комплексного системного подхода, включающего в себя аналитический обзор научной литературы в области оценки и мониторинга природно-антропогенных почв, а также систематизацию и обработку экспериментальных данных, полученных в результате натурно-полевых наблюдений. В работе применялись математические методы обработки данных, такие как корреляционный анализ и статистический анализ. Решение поставленных задач осуществлялось с помощью использования специальных программ для составления графических материалов (Excel, SigmaPlot 12.5, STATISTICA 8, QGIS 3.10.9.).

Степень достоверности полученных данных. Достоверность выводов и научных положений диссертации подтверждается надежностью и обоснованностью используемых методик, осуществлением мониторинга в соответствии с методическими указаниями, проведением аналитических испытаний в соответствии с методическими рекомендациями ГОСТ, сопоставлением полученных результатов с данными отечественных и зарубежных исследований.

Апробация работы. Полученные в ходе выполнения работы результаты и сделанные на их основе выводы представлялись научной общественности в докладах, выступлениях, обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях: XVI Ежегодная молодежная научная конференция «Юг России: вызовы времени, открытия, перспективы» (Ростов-на-Дону, 2020), Международный молодежный научный форум «Ломоносов» (Москва, 2020, 2021), XIII международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию Донского государственного технического университета «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса» (Ростов-на-Дону, 2020), XVII Ежегодная молодежная научная конференция «Наука и технологии Юга России» (Ростов-на-Дону 2021), XXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2021), XII Международная биогеохимическая школа, посвященная 175-летию со дня рождения В. В. Докучаева «Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине» (Тула, 2021), XXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва 2021), «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях

антропогенной нагрузки» (Ростов-на-Дону - Таганрог, 2022).

Публикация результатов исследования. Наиболее существенные положения и результаты исследований отражены в 13 публикациях общим объемом 2,6 п.л., в том числе с долей автора 0,7 п.л.; среди них 3 статьи в международных базах Scopus/Web of Science; 10 статей и тезисов, индексируемых в базе РИНЦ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из разделов: «Введение», «Глава 1. Обзор литературы», «Глава 2. Объекты и методы исследования», «Глава 3. Результаты и их обсуждение», «Выводы», «Список литературы». Список использованной литературы включает 160 источников, в том числе 29 источников иностранных авторов. Содержание работы изложено на 122 страницах, включает 22 рисунка и 15 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.5.19. Почвоведение в части «Теоретические и научно-методические проблемы химии почв. Проблемы техногенного и агрогенного химического загрязнения почв и изменения их естественной кислотности, состава почвенного поглощающего комплекса и почвенных водных мигрантов».

Личный вклад автора. Личный вклад соискателя состоит в определении актуальности темы исследований, проведении обзора отечественной и зарубежной литературы по теме исследования, постановке цели и задач, разработке основных теоретических положений, подборе методик, непосредственном участии в получении аналитической базы данных, обработке и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов, публикации научных работ. Доля личного участия в подготовке и написании диссертации составляет не менее 90 %.

Финансовая поддержка работы. Данная научная работа была поддержана грантами РНФ 20-14-00317 (2023–2024) Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-1122 (2022-2024); FENW-2023-0008 (2023-2025), Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030»).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, зав. кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов ЮФУ, д.б.н., проф. Т.М. Минкиной за совместную работу, ценные консультации, помощь и поддержку., к.б.н. Д.Г. Невидомской за всестороннюю помощь, к.б.н. Ю. А. Литвинову и Т.С. Дудниковой за рекомендации и помощь в подготовке графических материалов, профессорско-преподавательскому составу кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ЮФУ и сотрудникам лаборатории «Мониторинг биосферы» и «Здоровье почв» за поддержку в исследованиях.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе рассмотрены природные и антропогенные источники поступления ТМ в почвы, влияние совокупных процессов биологического и небиологического происхождения, определяющих направление и интенсивность миграции ТМ на границе аквальных и наземных экосистем.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Физико-географические условия территории исследования

Район исследования включал в себя территорию дельты р. Дон и часть побережья Таганрогского залива в составе Ростовской области. Исследуемая территория выполняет важную рекреационную функцию, является объектом массового туризма, а также включает побережье крупного промышленного центра Ростовской области – г. Таганрог. Территории Беглицкой косы, Чумбур-косы и о. Донской (центральная часть дельты р. Дон) имеют природоохранный статус.

2.2 Характеристика почвенного покрова и закладка площадок мониторинга

Для комплексной характеристики природных территорий дельты р. Дон и побережья Таганрогского залива было заложено 43 площадки мониторинга. Объектами исследования являлись почвы изучаемой территории: зональные - чернозем обыкновенный карбонатный, неполноразвитая почва; интразональные: солончак сорový, аллювиальная луговая карбонатная, аллювиальная луговая насыщенная и аллювиальная луговая насыщенная слоистая (Классификации почв, 1977) (рис. 1). На всех площадках мониторинга отобраны образцы поверхностных почвенных горизонтов (0-20 см) в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017. Полнопрофильные разрезы были заложены на каждом из представленных типов почв: чернозем обыкновенный карбонатный среднесуглинистый на лессовидных суглинках (площадка № 41), неполноразвитая тяжелосуглинистая почва на элювии известняка-ракушечника (площадка № 42), солончак сорový среднесуглинистый на морских отложениях (площадка № 43), аллювиальная луговая карбонатная супесчаная на морских отложениях (площадка № 38), аллювиальная луговая насыщенная среднесуглинистая на аллювиальных отложениях (площадка № 6), аллювиальная луговая насыщенная слоистая среднесуглинистая на морских отложениях (площадка № 26).

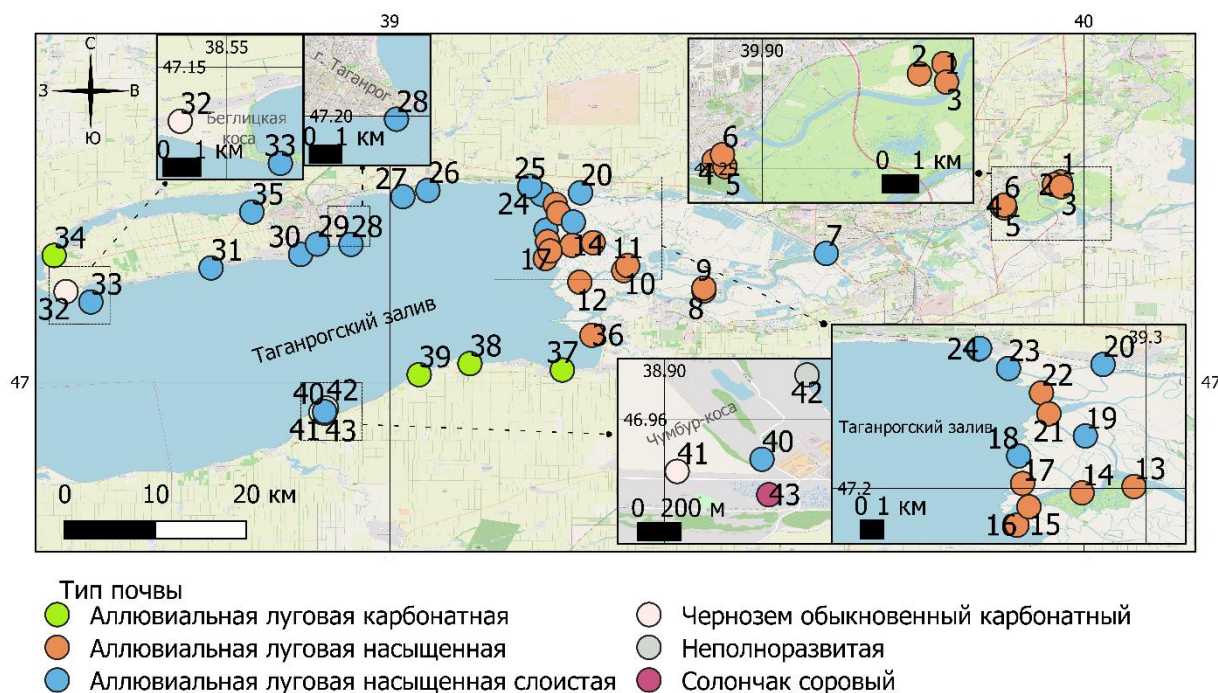


Рисунок 1 - Местоположение точек отбора почвенных проб с территории дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива

2.3 Методы исследования

В почвенных образцах были определены физические и химические свойства почв по следующим методикам: определение органического вещества – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213–2021); определение фракций физической глины ($<0,01$ мм) и ила ($<0,001$ мм) - седиментационным методом с использованием пипетки Качинского с пирофосфатной подготовкой (Вадюнина и др., 1986); обменные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} – по методу Шаймухаметова (Шаймухаметов, 1993); обменный Na^{+} по ГОСТ 26950-86; содержание карбонатов в почве – комплексометрическим методом по С.А. Кудрину (Воробьева, 2006); pH водной вытяжки – потенциометрическим методом (ГОСТ 26423-85). Состав легкорастворимых солей и величину сухого остатка в пробах и почв определяли в водной вытяжке (при соотношении 1:5) (Воробьева, 2006), на основании полученных данных проводили оценку степени и химизма засоления (Панкова и др., 2006). Валовое содержание ТМ и полуторных оксидов Fe и Al было определено рентген - флуоресцентным методом на спектроскане Макс-GV (Россия) согласно (ГОСТ 33850–2016).

Для оценки подвижности ТМ в почвах выполнена параллельная экстракция 3 вытяжками: 1 % NH_4Ac с pH 4,8, 1 % ЭДТА в NH_4Ac и 1 н. HCl , позволяющими определить содержание обменных, комплексных и специфически сорбированных форм (Бауэр, 2018; Minkina et al., 2018), которые суммарно составляют группу непрочно связанных (НС) соединений ТМ. Содержание прочно связанных (ПС)

соединений ТМ было определено по разности между валовым содержанием и содержанием НС соединений (Алексеев и др., 2017). Для учета роли различных соединений металла (обменных, комплексных и специфически сорбированных) в изменении подвижности рассчитывали их долю в групповом составе.

Оценку степени загрязнения почв поллютантами проводили на основе сравнения содержания ТМ в почве с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ в почве (СанПиН 1.2.3685–21), ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК) (МУ 2.1.7.730-99), а также с кларком почв (Виноградов, 1957).

Полиметальное загрязнение почв охарактеризовано с помощью суммарного показателя загрязнения (Z_c), рассчитанного по отношению к фоновому содержанию элементов в почве ($C_{фон}$) (Сае и др., 1990) (1):

$$Z_c = \sum Kc_i - (n - 1) \quad (1)$$

где Kc_i – коэффициент концентрации отдельных элементов и/или соединений, n – число учитываемых элементов и соединений с $Kc_i > 1$. Согласно полученным значениям Z_c были определены категории загрязнения (МУ 2.1.7.730-99, 1999; Касимов и др., 2012; Федорев и др., 2015).

Kc_i рассчитан по формуле (Сае и др., 1990) (2):

$$Kc_i = C_i / C_b \quad (2)$$

где C_i – содержание ТМ (мг/кг) в исследуемой пробе, C_b – фоновое значение ТМ (мг/кг).

Для определения фона (C_b) использован метод, предложенный Reimann et al (2005) по формуле (3):

$$C_b = MED + 2 \left(\frac{|X_1 - MED| + |X_2 - MED| + |X_n - MED|}{n} \right) \quad (3)$$

где $C_{фон}$ – фоновая концентрация ТМ в почве, MED – медиана выборки.

Расчет фоновых концентраций проведен для супесчаных и суглинистых почв отдельно.

Для выявления основных свойств почв, оказывающих существенное влияние на поглощение и миграцию поллютантов, была рассчитана буферная способность почв по отношению к ТМ по методике (Ильин и др., 2001).

Математическая обработка результатов исследования проводилась с помощью статистических функций пакетов программ SigmaPlot 12.5, STATISTICA 8. Статистический анализ включал расчет описательных статистик, расчет коэффициента корреляции Спирмена и критерия Краскала-Уолиса. Отличия между содержанием ТМ в почвах рассчитано для наиболее распространенных аллювиальной луговой карбонатной, аллювиальной луговой насыщенной и аллювиальной луговой насыщенной слоистой почвой. Результаты считали

статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Картографический материал представлен с использованием программы QGIS 3.10.9.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Физико-химические свойства исследуемых почв

Почвы исследуемой территории относятся в основном к слабощелочным. Наиболее распространенные полугидроморфные почвы, такие как аллювиальные луговые насыщенные почвы характеризуются преимущественно легкосуглинистыми разновидностями, аллювиальные луговые насыщенные слоистые и аллювиальные луговые карбонатные – супесчаными. Свойства почв в рамках подтипов аллювиальных почв варьируют слабо. Отличия карбонатных подтипов внутри типа аллювиальных почв заключается в повышенном содержании CaCO_3 (табл. 1). Почвы автоморфных ландшафтов представлены черноземами обыкновенными карбонатными тяжелосуглинистыми и неполноразвитой почвой с тяжелосуглинистым гранулометрическим составом (табл. 2). Гидроморфный солончак соровый представляет собой средний суглинок, относится к очень сильнозасоленным.

Таблица 1 - Описательные статистики физических и химических свойств почв дельты Дона и побережья Таганрогского залива (слой 0-20 см)

Статистические параметры	pH	CaCO ₃	C _{орг}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сумма обменных оснований	<0.001 мм	<0.01 мм
		%		смоль(+) /кг			%	
Аллювиальная луговая насыщенная (n=20)								
Среднее	7.9	2.1	1.1	15.7	2.5	18.9	12.3	24.7
Медиана	7.9	1.2	1.1	14.4	2.0	16.9	11.8	24.6
Минимум	7.3	0.2	0.1	5.0	0.2	5.3	1.4	3.5
Максимум	8.9	8.3	2.5	36.3	6.0	42.9	28.4	47.7
Стандартное отклонение	0.4	2.2	0.5	7.3	1.4	8.7	7.0	9.8
Коэффициент вариации	5.2	103.7	51.8	46.6	56.4	103.0	57.0	39.8
Аллювиальная луговая насыщенная слоистая (n=15)								
Среднее	7.8	2.0	0.8	10.1	1.5	12.3	6.0	16.6
Медиана	7.8	1.8	0.7	9.8	1.5	11.5	5.6	18.6
Минимум	7.4	0.6	0.1	3.2	0.3	4.2	0.1	1.3
Максимум	8.2	4.4	2.0	19.8	2.9	22.7	17.6	33.2
Стандартное отклонение	0.3	1.4	0.6	4.9	0.8	5.7	5.6	9.2
Коэффициент вариации	3.5	67.9	73.1	48.8	55.6	104.4	92.9	55.4
Аллювиальная луговая карбонатная (n=4)								
Среднее	7.7	2.9	1.0	12.0	2.1	14.1	8.5	19.8
Медиана	7.8	2.8	1.1	11.9	1.8	13.8	8.7	18.8
Минимум	7.5	1.3	0.5	6.0	1.3	7.3	5.9	12.7
Максимум	7.8	4.8	1.3	18.1	3.5	21.8	10.8	29.0
Стандартное отклонение	0.1	1.4	0.4	6.0	1.0	7.0	2.2	7.9
Коэффициент вариации	1.9	49.7	36.5	50.2	47.3	97.5	25.7	39.6

Чернозем обыкновенный карбонатный (n=2)								
Среднее	7.6	2.8	2.6	27.9	5.5	33.6	26.9	52.1
Медиана	7.6	2.8	2.6	27.9	5.5	33.6	26.9	52.1
Минимум	7.5	1.9	2.0	26.9	4.1	31.0	24.0	47.3
Максимум	7.8	3.7	3.1	28.9	6.8	35.7	29.8	56.8
Стандартное отклонение	0.2	1.3	0.8	1.4	1.9	3.3	4.1	6.7
Коэффициент вариации	3.3	64.8	41.6	5.3	46.6	51.8	17.2	14.1
Неполноразвитая (n=1)								
Среднее	7.9	6.1	0.9	25.9	2.1	28.4	49.6	26.8
Солончак сорový (n=1)								
Среднее	8.1	1.1	1.7	15.9	6.5	25.1	20.2	36.1

Таблица 2 - Внутрипрофильное распределение физических и химических свойств почв территории дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива

Горизонт. глубина. см	Сорг, %	Содержание гранулометрических фракций, %		CaCO ₃ , %	Обменные катионы. смоль (+)/кг		pH	Плотный остаток, %
		Физ. глина ($<0.01\text{мм}$)	Ил ($<0.001\text{мм}$)		Ca ²⁺	Mg ²⁺ /Na ⁺		
Аллювиальная луговая насыщенная среднесуглинистая на аллювиальных отложениях								
Ad 0-3	2.6±0.21	32.5±1.5	16.0±1.64	0.6±0.02	16.4±1.3	1.6±0.4	7.5±0.04	0.11±0.003
A 3-9	2.2±0.18	32.1±1,07	17.8±1.87	1.7±0.04	16.6±0.9	1.8±0.3	7.6±0.05	0.13±0.004
AB 9-31	1.6±0.11	32.5±1,92	17.1±2.01	2.8±0.06	15.9±1.4	1.7±0.1	7.7±0.06	0.15±0.006
B 31-46	0.6±0.04	32.9±1,54	17.4±1.55	2.9±0.05	14.0±1.5	1.4±0.2	7.8±0.02	0.23±0.008
[A] 46-71	1.3±0.09	33.0±2,19	16.0±1.62	1.7±0.03	16.4±1.1	1.9±0.1	7.8±0.01	0.49±0.013
Аллювиальная луговая насыщенная слоистая среднесуглинистая на морских отложениях								
A' 0-4	1.20±0.06	31.5±1,01	14.8±0.36	2.6±0.55	18.1±1.2	2.9±0.2	8.3±0.06	0.49±0.003
A'' 4-12	1.16±0.03	31.7±1,07	15.0±1.15	3.3±0.48	17.9±1.6	2.8±0.2	8.2±0.03	0.26±0.021
A''' 12-30	0.93±0.01	32.8±1,64	16.8±1.03	3.2±0.36	17.2±1.4	3.1±0.1	8.1±0.01	0.23±0.008
A'''' 30-42	0.87±0.05	33.6±1,92	17.0±1.89	2.9±0.29	16.9±0.8	3.6±0.3	8.0±0.01	0.20±0.005
A''''' 42-53	0.81±0.04	33.9±2,15	19.9±1.66	2.6±0.32	17.3±1.2	3.7±0.1	7.9±0.02	0.19±0.023
AG 53-59	0.52±0.04	35.1±2,89	14.6±1.67	3.1±0.18	18.1±1.3	4.8±0.2	8.0±0.03	0.11±0.011
G 59-90	0.58±0.03	40.8±2,64	16.2±1.34	4.9±0.23	18.0±1.5	6.1±0.3	8.1±0.04	0.06±0.004
Аллювиальная луговая карбонатная супесчаная на морских отложениях								
Ad 0-3	1.0±0.09	13.0±1,21	7.2±0.48	2.3±0.03	6.0±0.2	1.5±0.1	7.8±0.04	0.09±0.001
A 3-10	0.6±0.03	14.0±1,16	8.1±0.66	0.8±0.01	7.2±0.4	2.0±0.1	8.0±0.06	0.06±0.003
Bg 10-25	0.3±0.01	16.1±0,92	12.8±1.13	0.1±0.01	8.6±0.5	2.9±0.1	7.9±0.01	0.08±0.004
Чернозем обыкновенный карбонатный среднесуглинистый на лессовидных суглинках								
Ad 0-5	2.32±0.16	40.6±2,81	24.0±1.84	0.9±0.02	25.3±1.6	5.1±0.3	7.7±0.05	0.08±0.007
Al 5-20	2.20±0.11	41.5±1,38	24.6±1.52	1.8±0.01	24.8±1.6	4.8±0.2	7.8±0.06	0.05±0.002
Aca 20-35	1.80±0.17	42.6±1,79	25.1±0.96	2.0±0.04	24.8±1.3	4.5±0.4	7.8±0.08	0.05±0.001
ABca 35-52	1.16±0.09	43.1±2,08	25.3±2.27	3.4±0.03	24.2±1.5	5.3±0.3	7.9±0.06	0.05±0.003
BC1ca 52-100	0.46±0.01	43.9±2,54	25.6±2.15	4.1±0.01	23.6±2.0	6.2±0.1	8.0±0.04	0.04±0.002
BCsa 100-135	0.35±0.02	43.3±2,88	27.8±2.63	5.8±0.02	25.1±1.9	5.1±0.3	8.0±0.07	0.01±0.003
Неполноразвитая тяжелосуглинистая почва на элювии известняка-ракушечника								
A 0-32	0.99±0.06	49.6±2,64	26.8±1.64	16.1±0.17	25.9±2.1	2.1±0.2	8.0±0.03	0.16±0.012
C дно	0.46±0.03	45.6±4,18	27.9±2.22	18.9±0.25	26.8±2.2	2.9±0.2	8.2±0.01	0.11±0.004
Солончак сорový среднесуглинистый на морских отложениях								
Ag 0-7	1.80±0.08	35.4±3,24	19.5±1.14	2.1±0.11	16.0±1.2	6.1±0.3/ 2.2±0.1	8.2±0.08	2.23±0.192
BCg 7-25	1.52±0.06	37.8±2,43	22.0±1.92	1.0±0.07	15.2±1.3	7.1±0.4/ 1.5±0.1	8.0±0.04	1.84±0.112
Cg 25-42	0.80±0.02	40.5±1,68	28.2±2.43	0.8±0.02	17.6±0.8	7.0±0.5/ 1.2±0.1	8.1±0.03	1.60±0.097
C 42-дно	0.30±0.02	42.1±2,03	32.1±3.06	0.6±0.03	17.8±1.6	5.6±0.3/ 1.2±0.1	8.1±0.03	1.41±0.048

3.2 Содержания тяжелых металлов в почвах

Установлено, что в поверхностном слое почв большинства площадок мониторинга прибрежной зоны Таганрогского залива валовое содержание ТМ не превышает кларковые значения почв, ПДК и ОДК. Встречается незначительное превышение ПДК Mn, Ni, Cu, Pb и ОДК Cd и Zn, что указывает на наличие локального источника загрязнения. Сходная закономерность отмечается по обменным формам. При этом содержание обменных форм ТМ превышает ПДК на большинстве площадок мониторинга (табл. 3). Наибольшее содержание ТМ, в том числе НС соединений, отмечалось для почв, расположенных вблизи города Таганрога, Беглицкой косы, Чумбур-косы (рис. 2).

Таблица 3 - Статистические параметры валового содержания и обменных форм тяжелых металлов в почвах, мг/кг

Переменная	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Кларк	ПДК/ОДК
Валовое содержание								
Mn	782.3	96.7	39.7	35.0	83.3	24.5	850.0	1500/-
Ni	718.1	95.7	33.6	33.6	68.3	18.9	40.0	80/-
Cr	66.1	51.2	19.9	12.3	10.2	2.5	70.0	-/150
Zn	1910.0	174.0	83.0	69.4	202.6	126.8	50.0	100/220
Cu	327.6	20.3	16.3	11.5	43.6	20.3	20.0	55/132
Pb	41.9	21.0	41.2	32.8	52.3	82.6	10.0	32/130
Cd	782.3	96.7	39.7	35.0	83.3	24.5	0.26	0.5/2
Обменные формы								
Mn	53.7	38.8	6.0	307.0	51.8	96.5	-	140/-
Cr	1.3	1.2	0.2	3.3	0.7	57.4	-	4/-
Ni	1.7	1.2	0.2	6.3	1.4	83.2	-	6/-
Cu	0.8	0.7	0.1	3.2	0.6	78.2	-	23/-
Zn	6.4	4.4	0.3	37.6	8.0	124.8	-	3/-
Pb	1.3	1.2	0.0	6.7	1.2	90.9	-	6/-
Cd	0.04	0.03	0.01	0.14	0.03	75.94	-	0.22/-

*Примечание: - Виноградов, 1957; МУ 2.1.7.730-99, 1999; СанПИН-1.2.3685-21

Выявлены различия в накоплении элементов в подтипах аллювиальных почв с учетом их гранулометрического состава. В большей степени отмечается варьирование НС соединений Cd в почвах различных типов. Так, содержание НС соединений Cd значительно выше в аллювиальной луговой карбонатной почве по сравнению с другими гидроморфными почвами. В целом, содержание Mn, Ni, Zn и Cd значительно выше, а Cu – значительно ниже в карбонатных подтипах по сравнению с другими аллювиальными почвами. Различия усиливаются с облегчением гранулометрического состава (рис. 3).

С использованием коэффициента корреляции Спирмена выявлена взаимосвязь обменных форм ТМ между собой. Степень взаимосвязи между элементами уменьшается с повышением подвижности рассматриваемой фракции ТМ в ряду: валовые формы > непрочно связанные формы > обменные формы. На основе корреляционного анализа выделено две группы обменных форм ТМ.

Первая группа представлена элементами с одним ярко выраженным источником происхождения – Mn, Zn и Cd, которые имеют 4 и более положительные корреляции с другими металлами, а вторая со смешанным – Cr, Ni, Cu и Pb, которые имеют меньшее количество достоверных корреляций с другими металлами (табл. 4).

Таблица 4 - Коэффициенты корреляции Спирмена, характеризующие взаимосвязи между обменными формами тяжелых металлов

Элемент	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
Mn	1.00	0.52	0.63	0.49	0.71	0.32	0.70
Cr	0.52	1.00	0.34	0.17	0.35	0.29	0.50
Ni	0.63	0.34	1.00	0.45	0.67	0.28	0.39
Cu	0.49	0.17	0.45	1.00	0.59	0.29	0.13
Zn	0.71	0.35	0.67	0.59	1.00	0.44	0.66
Pb	0.32	0.29	0.28	0.29	0.44	1.00	0.53
Cd	0.70	0.50	0.39	0.13	0.66	0.53	1.00

*Примечание: Жирным шрифтом отмечены корреляции значимые при $p < 0,05$

Наиболее высокие концентрации обменных форм ТМ первой группы характерны для пойменных почв вблизи Таганрога и Беглицкой косы (рис. 2).

Активной аккумуляции металлов способствовали высокое содержание Сорг и ила в почве (табл. 4). В аллювиальных луговых почвах с супесчаным ГМС низкое содержание ТМ было связано с низким содержанием органического вещества, обменных катионов, илистой фракции. Выявлена неравномерность распределения ТМ в профиле исследуемых почв и большая вариабельность содержания как в целом, так и внутри каждого типа почв.

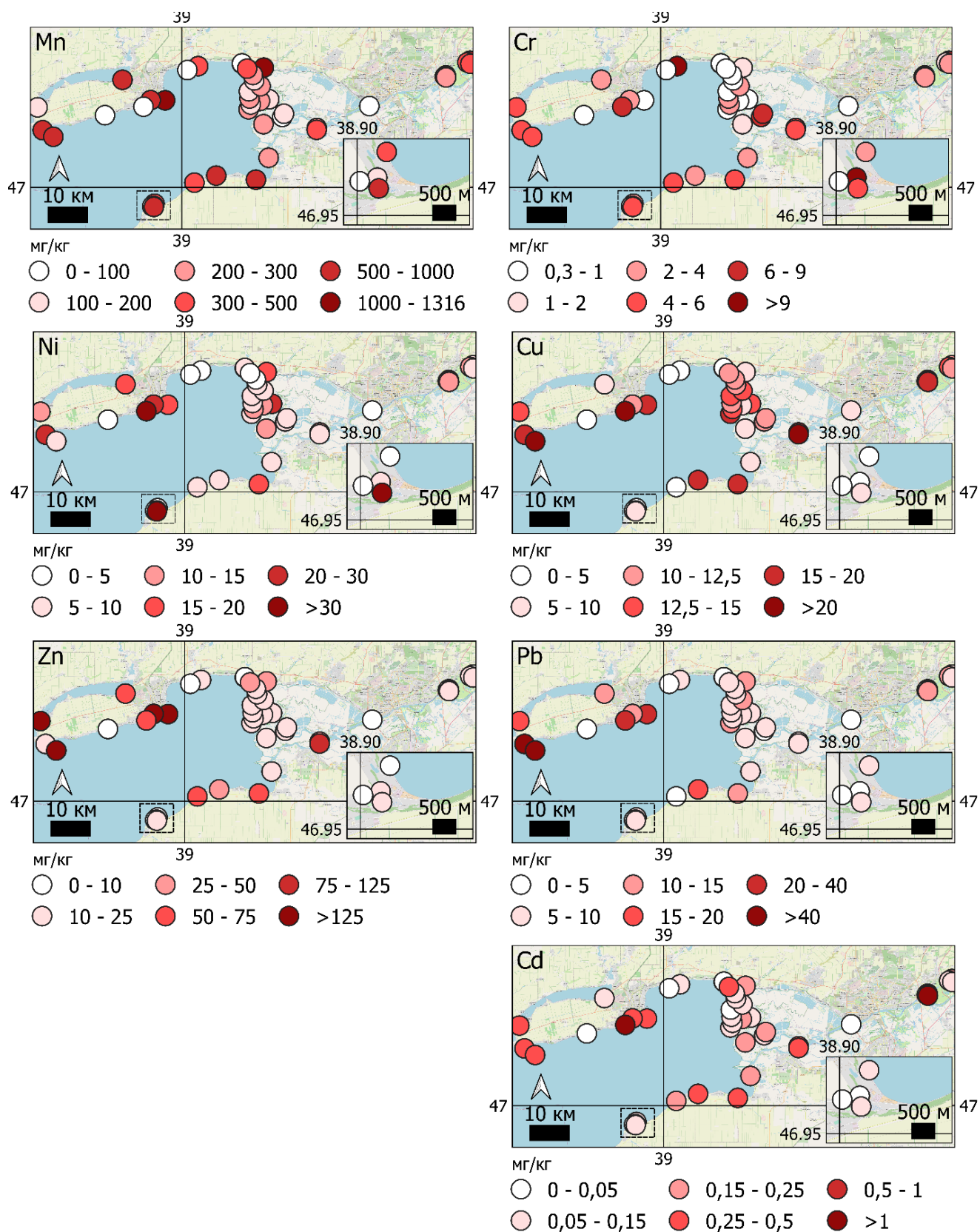


Рисунок 2 - Пространственное распределение непрочно связанных соединений тяжелых металлов в почвах прибрежной зоны Таганрогского залива и дельты р. Дон

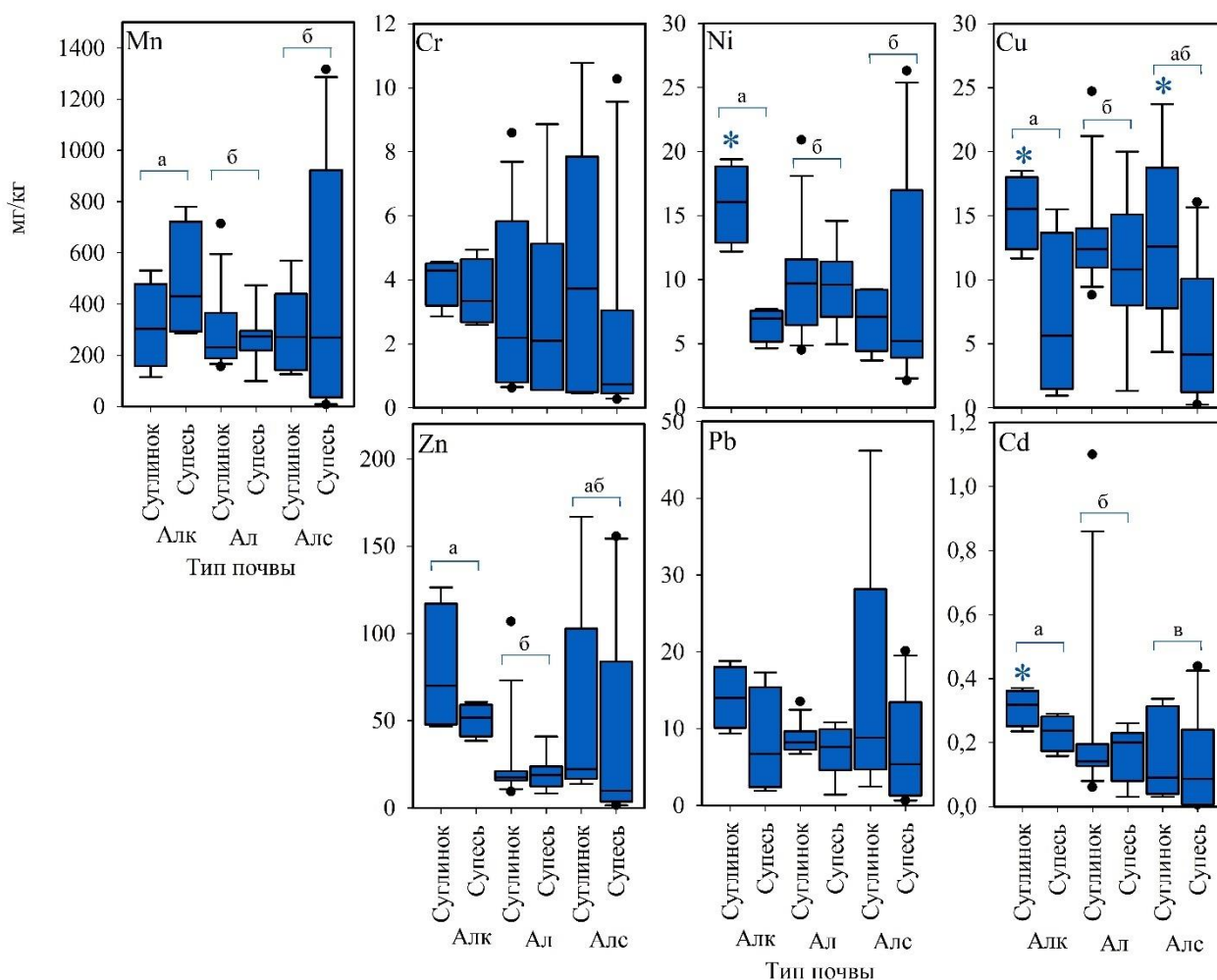


Рисунок 3 - Непрочно связанные формы ТМ в суглинистых и супесчаных аллювиальной луговой карбонатной (Алк), аллювиальной луговой насыщенной (Ал) и аллювиальной луговой насыщенной слоистой (Алс) почвах. Разные буквы обозначают значительные различия ($p < 0,05$) между подтипами почв, * отмечены значительные различия между суглинистыми и супесчаными почвами в пределах одного подтипа

В аллювиальных почвах наблюдается равномерное внутрипрофильное распределение большинства микроэлементов с накоплением в верхней части профиля. В почвах с выраженной слоистостью распределение элементов имеет дифференцированный характер, что обусловлено процессами сортировки почвенного материала.

В солончаке соровом наблюдается биогенное накопление в верхних засоленных горизонтах и аккумуляция элементов в оглеенном горизонте, что обусловлено наличием солевого и глеевого барьеров. В неполноразвитой почве дифференциация ТМ по профилю почвы не установлена (табл. 5).

Таблица 5 - Распределение валового содержания (А) и непрочно связанных форм (Б) тяжелых металлов в профиле различных типов почв

Горизонт, глубина, см	Mn		Cr		Ni		Cu		Zn		Pb		Cd	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Аллювиальная луговая насыщенная среднесуглинистая на аллювиальных отложениях														
Ad 0-3	705,3	147,58	97,3	14,26	41,8	11,14	32,6	7,60	107,7	33,49	45,5	17,50	3,18	1,746
A 3-9	355,9	71,13	112,0	12,04	54,6	8,96	43,3	5,72	75,1	18,17	53,9	13,92	2,85	0,732
AB 9-31	492,1	63,05	92,1	9,47	43,7	6,59	34,3	3,61	71,8	8,97	37,6	9,04	2,35	0,590
B 31-46	251,5	28,17	106,8	6,77	27,3	4,18	21,4	1,98	44,5	4,38	12,6	2,81	1,98	0,455
[A] 46-71	248,6	20,05	93,3	5,15	25,9	3,42	18,6	1,31	39,9	3,04	13,4	2,46	1,62	0,356
Аллювиальная луговая насыщенная слоистая среднесуглинистая на морских отложениях														
A' 0-4	633,7	127,78	100,2	13,27	40,3	10,26	36,6	9,00	71,5	19,20	26,9	5,99	1,84	1,008
A'' 4-12	758,4	115,60	102,7	11,97	50,2	6,42	44,5	7,83	81,4	13,54	20,0	4,31	1,20	0,320
A''' 12-30	782,6	96,99	93,2	10,79	45,1	4,56	39,6	6,69	80,3	11,64	23,2	3,94	1,45	0,184
A'''' 30-42	1100,4	70,12	112,4	9,29	53,2	3,49	46,7	6,52	86,5	9,19	21,6	3,28	1,33	0,166
A''''' 42-53	1389,0	67,67	100,5	7,43	58,8	1,56	50,5	4,23	96,6	6,15	19,2	2,61	1,28	0,088
AG 53-59	1465,8	60,83	125,3	5,48	46,1	1,19	40,7	2,85	77,9	3,25	20,3	1,65	1,12	0,037
G 59-90	471,9	19,96	89,4	4,43	40,6	0,93	36,3	1,64	49,7	1,73	12,9	0,79	0,95	0,027
Аллювиальная луговая карбонатная супесчаная на морских отложениях														
Ad 0-3	708,5	212,40	64,9	8,65	30,7	8,32	30,7	9,56	56,3	18,48	61,8	27,71	1,84	1,16
A 3-10	692,5	139,14	62,0	6,72	25,6	6,48	28,3	6,39	51,7	14,97	56,6	23,05	1,02	0,603
Bg 10-25	696,8	109,71	64,8	4,61	28,9	3,82	33,0	3,73	58,5	5,80	60,9	12,31	1,59	0,462
Чернозем обыкновенный карбонатный среднесуглинистый на лессовидных суглинках														
Ad 0-5	962,1	231,21	123,5	18,78	65,0	21,15	55,2	14,98	84,5	21,77	24,6	6,85	0,64	0,03
Al 5-20	938,2	223,38	117,0	17,61	64,0	15,90	56,5	12,68	83,4	15,3	31,8	7,0	0,86	0,03
Aca 20-35	887,2	210,49	114,9	14,11	63,9	13,86	55,3	7,49	85,2	13,51	35,4	6,13	0,76	0,02
ABca 35-52	883,5	157,72	112,3	12,94	64,3	12,38	49,2	8,73	79,4	8,71	20,7	2,76	0,78	0,02
BC1ca 52-100	752,4	135,72	113,1	10,59	57,4	7,91	48,6	5,36	75,7	6,88	18,2	1,6	0,80	0,02
BCca 100-135	732,5	104,14	111,6	8,61	56,0	7,05	46,4	4,02	75,8	5,75	19,0	1,34	0,76	0,02
Неполноразвитая тяжелосуглинистая почва на элювии известняка-ракушечника														
A 0-32	655,0	28,2	68,7	0,5	45,2	0,8	35,3	0,2	71,6	1,7	31,3	1,4	0,85	0,02
C дно	586,7	21,5	61,3	0,1	38,4	0,3	28,4	0,1	65,4	0,3	24,2	0,7	0,72	0,01
Солончак соровый среднесуглинистый на морских отложениях														
Ag 0-7	1451,0	131,8	91,1	3,6	60,0	5,0	55,9	5,3	97,9	16,3	38,6	5,3	0,57	0,11
BCg 7-25	1136,9	104,8	95,3	2,9	66,0	3,6	69,3	3,8	105,6	12,3	33,2	3,7	0,53	0,08
Cg 25-42	927,7	75,8	89,6	2,5	59,0	1,5	61,1	3,3	99,6	10,2	28,8	2,2	0,48	0,03
C 42-дно	618,6	43,9	49,6	1,4	51,4	0,5	54,3	1,7	83,3	5,3	21,1	1,2	0,42	0,02

3.3 Подвижность тяжелых металлов в почвах

Выявлены различия в подвижности ТМ в доминирующих типах почв исследуемой территории. Разница обусловлена прежде всего гранулометрическим составом почв и особенностями отдельных элементов, а также их генезисом. От аллювиальной луговой карбонатной к аллювиальной луговой насыщенной почве в валовом содержании ТМ увеличивается доля НС соединений. В почвах, обладающих супесчаным гранулометрическим составом, наблюдается увеличение подвижности металлов. По подвижности для исследуемых почв металлы формируют ряд: $Cd > Mn > Zn > Pb \approx Cu \approx Ni > Cr$ (рис. 4).

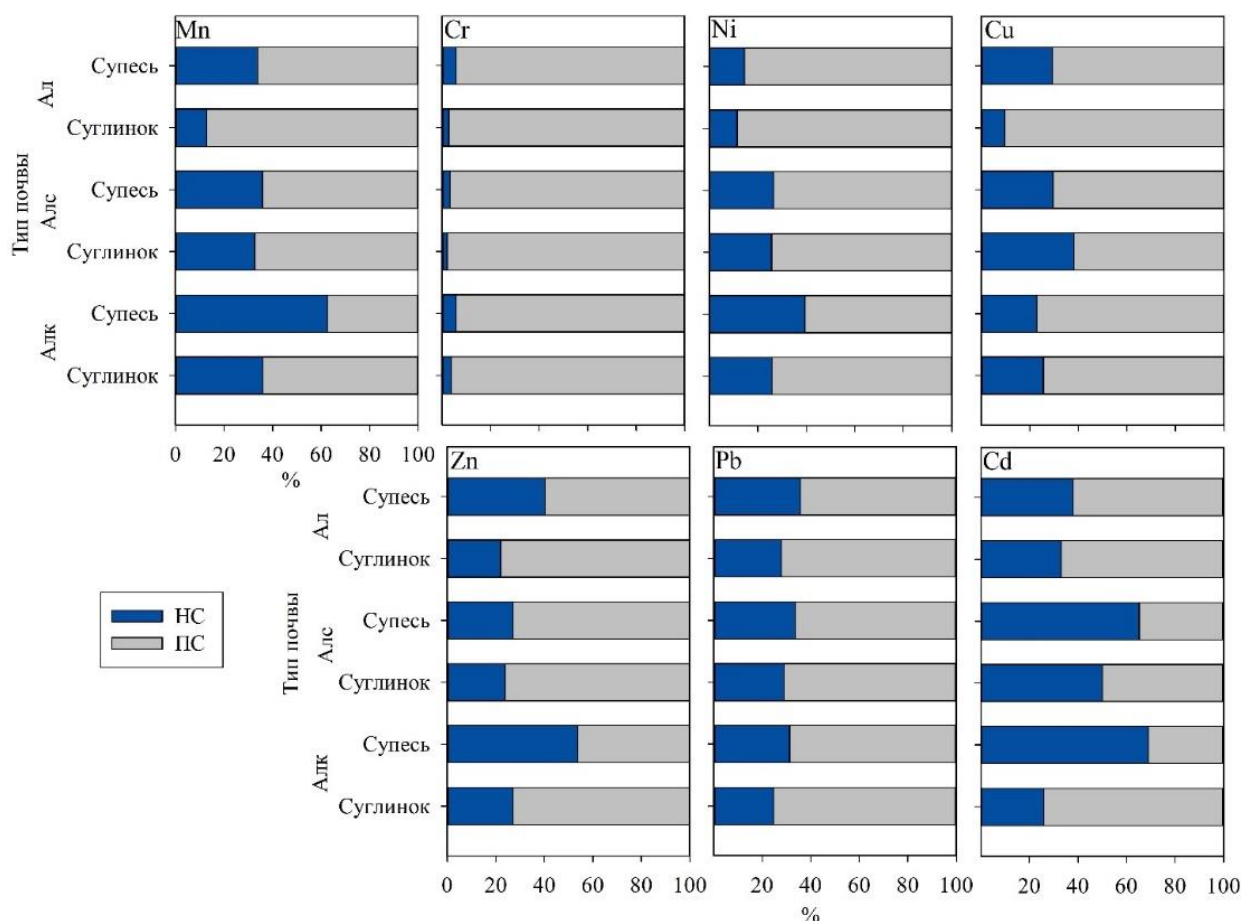


Рисунок 4 - Соотношение прочно (ПС) и непрочно (НС) связанных соединений тяжелых металлов в суглинистых и супесчаных аллювиальной луговой карбонатной (Алк), аллювиальной луговой насыщенной слоистой (Алс) и аллювиальной луговой насыщенной (Алн) почвах

В группе НС соединений ТМ в аллювиальных луговых насыщенных и аллювиальных луговых насыщенных слоистых почвах преобладают специфически сорбированные формы, за исключением Cd, отличающегося повышенным содержанием обменных форм, особенно в слоистых и карбонатных подтипах супесчаных разновидностей. Наблюдается заметное увеличение комплексных форм Pb и Cu по сравнению с другими исследуемыми элементами, что обусловлено их высоким сродством элементов к органическому веществу почв. Наиболее низкие значения комплексных форм характерна для Cd (рис. 5).

В менее распространенных автоморфных почвах состав НС соединений ТМ представлен преимущественно специфически сорбированными формами. Более низкие значения характерны для Cu, Pb и Cd. В гидроморфном солончаке соровом подвижность ТМ близка к аллювиальным супесчаным почвам, что обусловлено присутствием в ППК ионов Na^+ (от 4,6 до 9%).

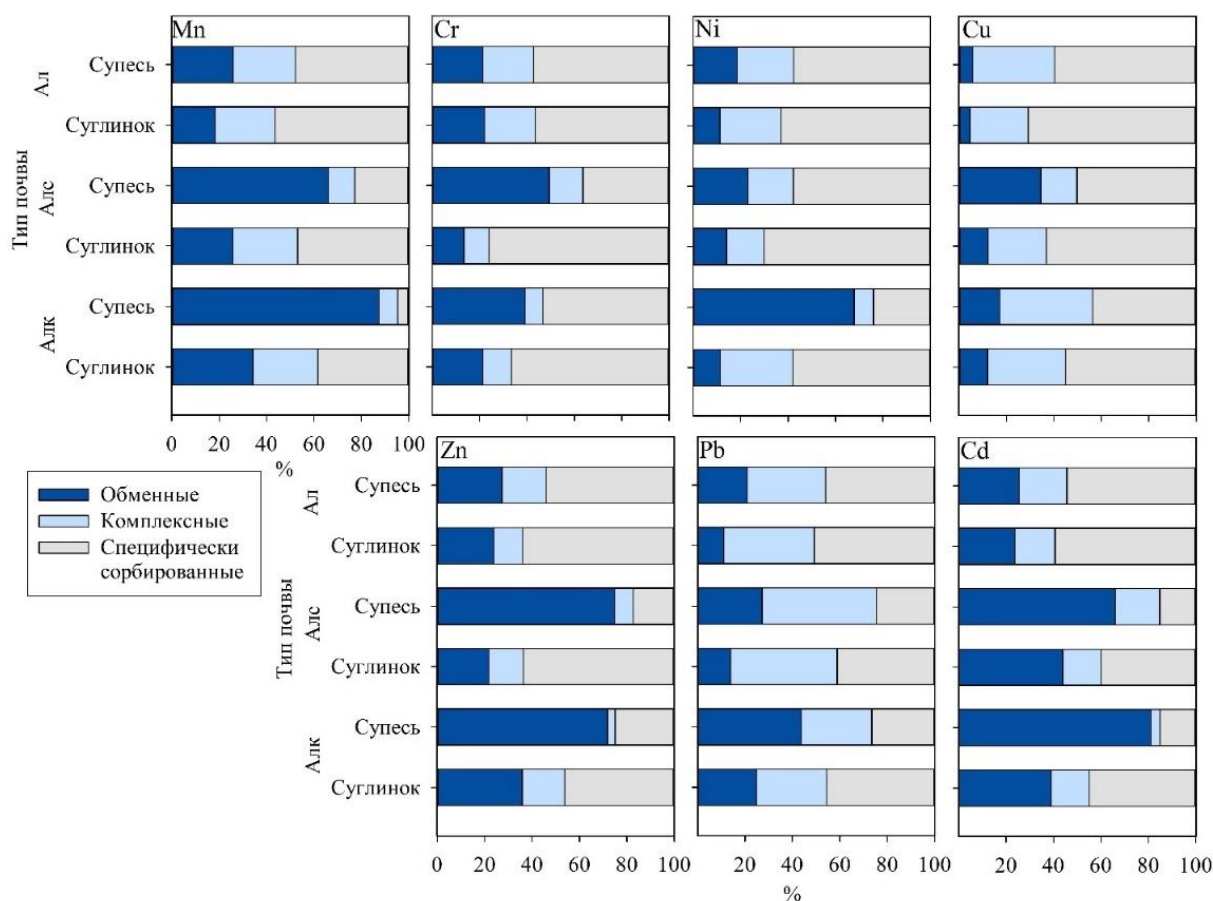


Рисунок 5 - Состав непрочно связанных соединений тяжелых металлов в суглинистых и супесчаных аллювиальной луговой карбонатной (Алк), аллювиальной луговой насыщенной слоистой (Алс) и аллювиальной луговой насыщенной (Алн) почвах

3.4 Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами

В целом величина Z_c исследуемых почв площадок мониторинга варьирует от «неопасного» до «умеренно опасного» загрязнения. Относительно валового содержания ТМ умеренно загрязненный участок приурочен к Беглицкой косе, для обменных форм – северное и южное побережье Таганрогского залива, для НС – прибрежная зона города Таганрога (рис. 6).

Выявлена взаимосвязь между накоплением ТМ и почвенными свойствами. Степень влияния свойств почв на накопление металла усиливается с увеличением подвижности элемента. По валовому содержанию значительные корреляции характерны между Cr и Сор_г, а также Cd и pH (табл. 6).

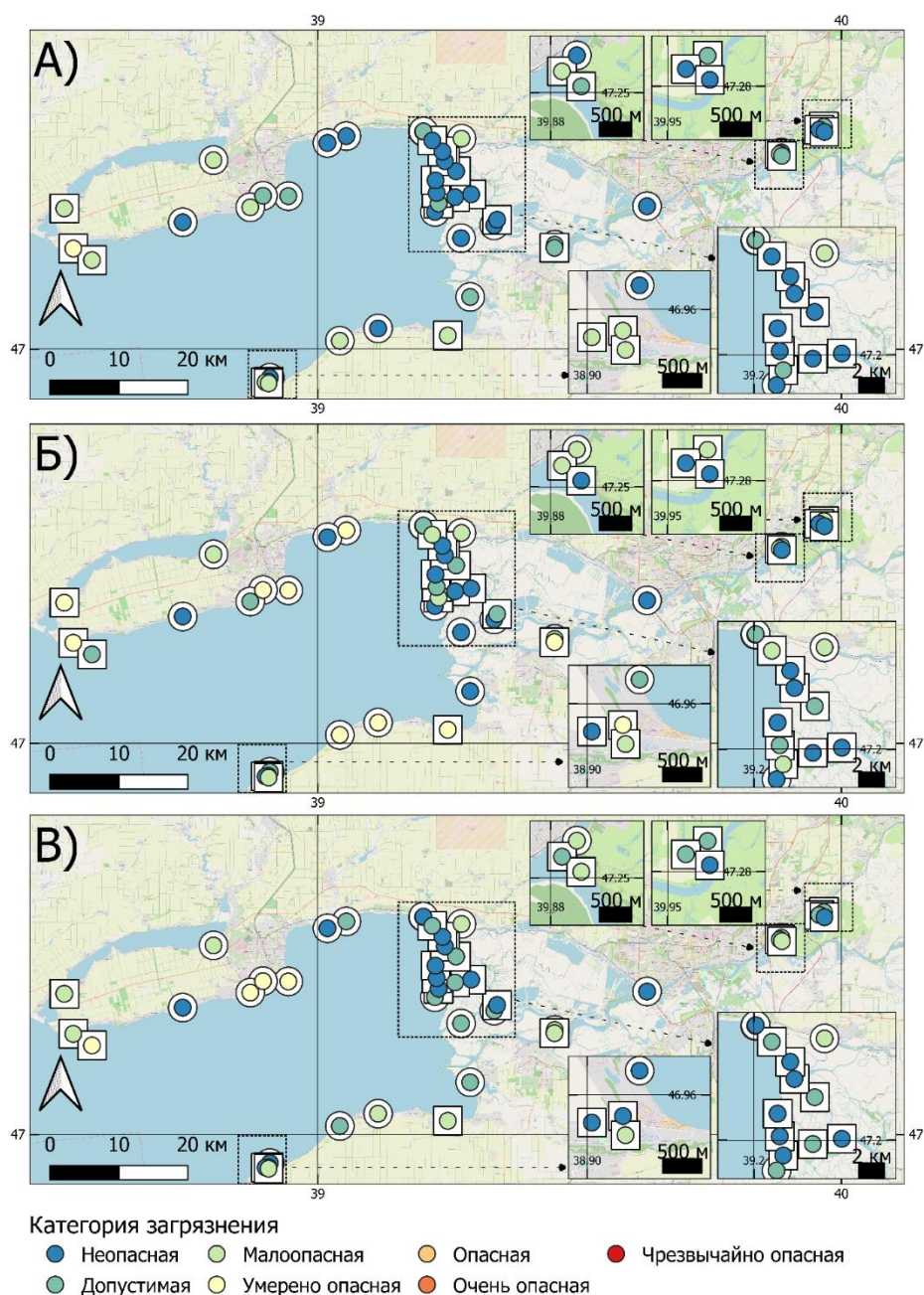


Рисунок 6 - Суммарный показатель загрязнения почв прибрежной зоны Таганрогского залива, рассчитанный по валовому содержанию (А), обменным формам (Б) и непрочно связанным формам (В) Mn, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb и Cd

По НС соединениям наблюдается взаимосвязь практически всех ТМ с рН и Сорг. На накопление обменных форм ТМ оказывает влияние рН, Сорг, обменные Са и Mg, а также содержание физической глины и ила (табл. 6).

Буферность почв исследуемой территории варьирует от средней до очень высокой. При этом северное побережье Таганрогского залива и северная часть дельты Дона характеризуются повышенной и высокой буферностью по отношению к ТМ (преимущественно аллювиальные насыщенные слоистые почвы). Наиболее низкие значения данного показателя характерны для почв (аллювиальные

насыщенные и аллювиальные насыщенные слоистые почвы) восточной части дельты Дона и Чумбур-косы, что обуславливает увеличение НС соединений и долю наиболее подвижной обменной формы (рис. 7).

Таблица 6 - Коэффициенты корреляции Спирмена, характеризующие взаимосвязи между физико-химическими свойствами и содержанием непрочно связанных форм тяжелых металлов

Свойства	Элементы						
	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
pH	-0.34	-0.16	-0.17	-0.34	-0.48	-0.31	-0.29
CaCO ₃	0.02	-0.12	0.07	-0.17	0.03	0.11	0.01
Сорг	0.24	0.41	0.41	0.56	0.42	0.31	0.30
Ca ²⁺	0.11	0.06	0.27	0.29	0.15	0.19	0.02
Mg ²⁺	0.12	0.14	0.33	0.44	0.20	0.32	0.19
Сумма обменных оснований	0.11	0.08	0.28	0.32	0.17	0.21	0.05
Физ. глина <0,001 мм	0.24	0.31	0.34	0.37	0.20	0.33	0.17
Ил <0,01 мм	0.23	0.26	0.34	0.37	0.20	0.30	0.18

*Примечание: Жирным шрифтом отмечены значительные корреляции при $p < 0,05$

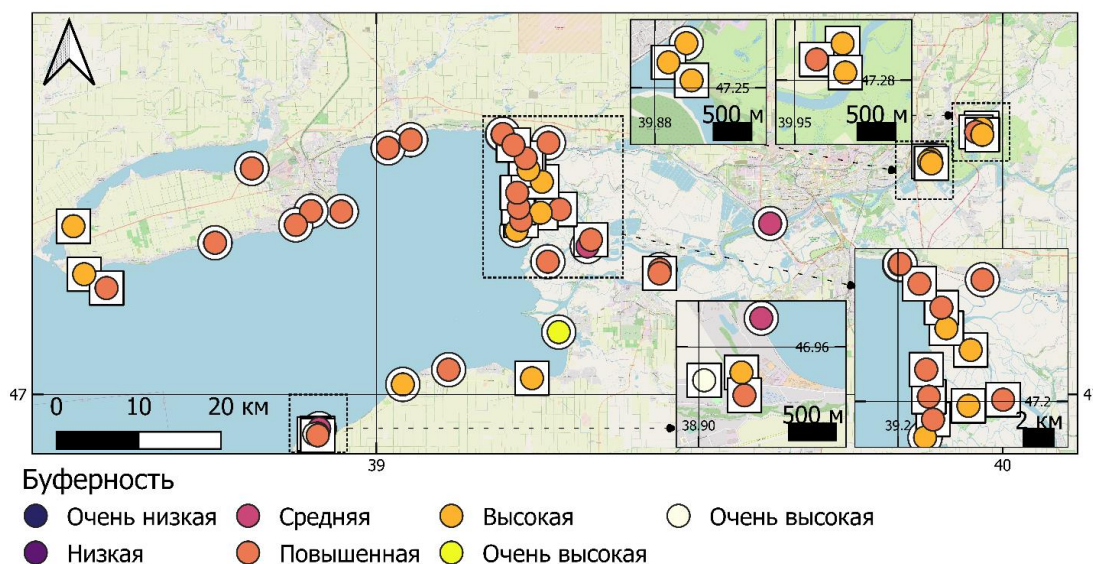


Рисунок 7 - Буферность почв дельты Дона и побережья Таганрогского залива по отношению к ТМ

Наибольший вклад в формирование буферности почв вносят pH и содержание физической глины. Наибольшая буферность характерна для чернозема обыкновенного (очень высокая), наименьшая – неполноразвитой почвы (средняя). В целом, супесчаные почвы относятся преимущественно к категории почв с повышенной буферностью, а суглинки – с высокой буферностью. При этом

высокое содержание карбонатов в почвах повышает буферную способность супесчаных почв (рис. 8).

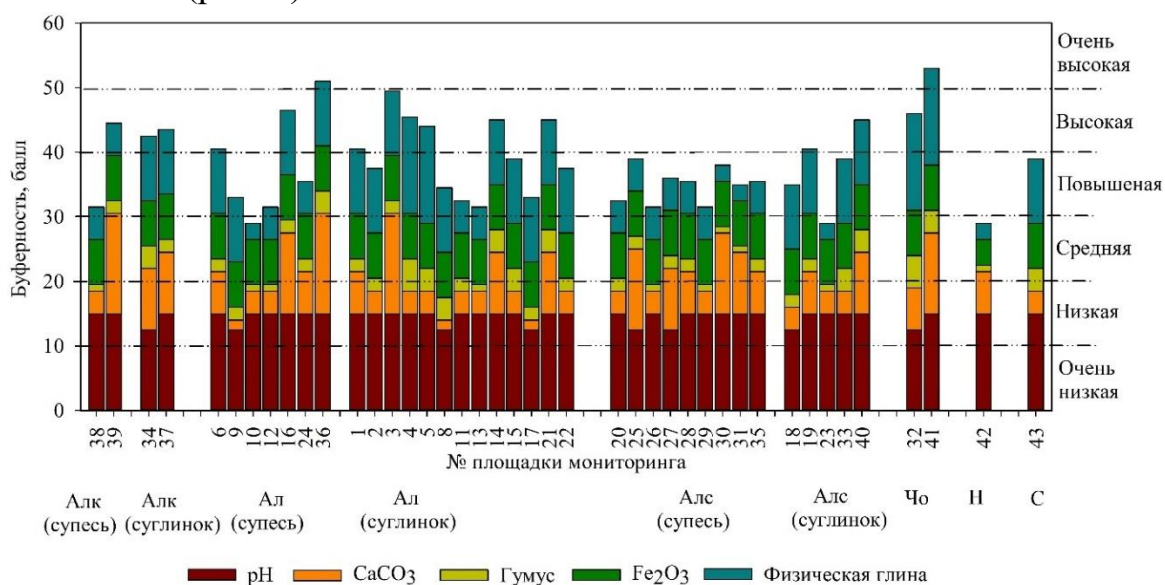


Рисунок 8 - Буферность почв различных типов по отношению к ТМ

Наблюдается незначительное уменьшение буферности почв с глубиной почвенного профиля для аллювиальной луговой карбонатной, обусловленное снижением содержания карбонатов, а также для солончака сорового и неполноразвитой, обусловленное уменьшением гумуса и физической глины. В целом, буферная способность черноземов обыкновенных, аллювиальной луговой насыщенной и насыщенный слоистой не меняется по профилю (рис. 9).

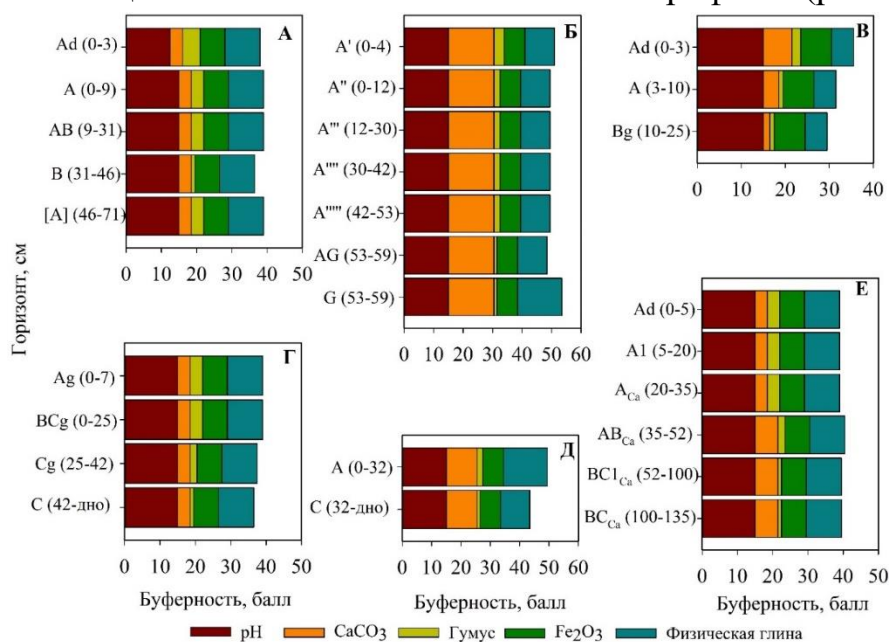


Рисунок 9 - Величины буферности по профилю аллювиальной луговой насыщенной (А), насыщенной слоистой (Б), карбонатной (В), а также солончака сорового (Г), неполноразвитой (Д) и чернозема обыкновенного карбонатного (Е) по профилю

ВЫВОДЫ

1. В почвах дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива выявлены особенности пространственного распределения валового содержания Cr, Mn, Ni, Zn, Cu, Pb и Cd. Обнаружены превышения валового содержания Zn, Cr, Pb и Cu до 2–4 раз в почвах над ПДК/ОДК. Аллювиальные насыщенные слоистые почвы, расположенные на северном побережье Таганрогского залива и северной части дельты Дона, характеризуются повышенной и высокой буферностью по отношению к исследуемым металлам. Аллювиальные насыщенные и аллювиальные насыщенные слоистые почвы восточной части дельты Дона и Чумбур-косы обладают более низкой буферной способностью по отношению к тяжелым металлам, что приводит к увеличению их подвижности в почве.

2. В отличие от автоморфных почв, полугидроморфные и гидроморфные почвы характеризуются наибольшими значениями Сорг и тонкодисперсных частиц, активно адсорбирующих тяжелые металлы. В гидроморфных почвах данной группы аккумулируется большая часть загрязняющих веществ, поступающих с водосборов речной системы Дона в составе взвешенных частиц твердого стока.

3. На внутрипрофильное распределение тяжелых металлов в исследуемых типах почв оказывает влияние буферная способность почв, которая в почвах пойменных ландшафтов определяется преимущественно содержанием органического вещества, физической глины и карбонатов. В аллювиальных почвах наблюдается равномерное внутрипрофильное распределение большинства тяжелых металлов с накоплением в верхней части профиля. В почвах с выраженной слоистостью распределение элементов имеет дифференцированный характер.

4. В исследуемых почвах в соотношении различных групп соединений тяжелых металлов доминируют прочно связанные формы. В составе группы непрочно связанных соединений тяжелых металлов в почвах преобладают их специфически сорбированные формы - до 41 до 77 % от состава всей группы непрочно связанных соединений. Содержание группы непрочно связанных соединений Cd наиболее высокое среди рассматриваемых металлов, особенно в аллювиальной луговой карбонатной почве (до 85 % от валового содержания металла).

5. На основе величин буферности почв к тяжелым металлам и суммарного показателя загрязнения с использованием непрочно связанных соединений металлов предложена система геохимической оценки состояния почв пойменных ландшафтов. Буферность почв дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива и их способность к прочной фиксации Cd, Pb, Mn, Cr, Zn, Cu, Ni снижается от чернозема обыкновенного к неполноразвитой почве.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах и сборниках, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

1. Microbiological status of natural and anthropogenic soils of the Taganrog Bay coast at different levels of combined pollution with heavy metals and PAHs / Pulikova E., Ivanov F., Gorovtsov A., **Sherbakov A.**, Sushkova S. // Environmental Geochemistry and Health. – DOI 10.1007/s10653-022-01405-7

2. Potentially toxic elements distribution in the contaminated bottom sediments by the industrial genesis within Lower Don river system / D. Nevidomskaya, T. M. Minkina, Y. Fedorov, **A. Shcherbakov** [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 265. – Art. No 02018. – DOI 10.1051/e3sconf/202126502018

3. Establishment of regional background for heavy metals in the soils of the Lower Don and the Taganrog Bay coast / E. Konstantinova, T. M. Minkina, D. G. Nevidomskaya, **A. Shcherbakov** [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 265. – Art. No 03004. – DOI 10.1051/e3sconf/202126503004

Статьи и тезисы конференций, опубликованные в других изданиях

4. Assessment of the Soil Buffer Capacity in the Sea of Azov Basin Under Heavy Metal Pollution / Minkina, T., Nevidomskaya, D., **Sherbakov, A.**, Chaplygin, V., Litvinov, Y., Kravtsova, N., Bren, D., Lobzenko, I. // KnE Life Sciences. – 2022. – Vol. 7, No 1. – P. 484-490. – DOI 10.18502/cls.v7i1.10158

5. Свойства почв поймы малых рек, впадающих в Таганрогский залив / Е. С. Федоренко, О. Е. Хронюк, А. В. Барахов, А. Затонских, Т. Макарова, **А. Щербаков**, Т. М. Минкина // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки: материалы Международной молодежной научной школы, Ростов-на-Дону, 27–30 сентября 2022 г. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 244-247.

6. Сравнительный анализ статистических методов определения региональных фоновых значений тяжелых металлов в аллювиальных почвах / Е. Ю. Константинова, **А. П. Щербаков**, В. И. Северина [и др.] // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции, Москва, 22–24 апреля 2021 г.: в трех томах. Т. 1. – Москва: РУДН, 2021. – С. 300-304.

7. Щербаков, А. П. Оценка содержания, подвижности и биодоступности Pb в почвах ООПТ «Беглицкая коса» побережья Таганрогского залива / **А. П. Щербаков**, Д. Г. Невидомская // Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине: труды XII Международной биогеохимической школы, посвященной 175-летию со дня

рождения В. В. Докучаева, 16–18 сентября 2021 г., Тула – Куликово поле. – Тула: ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2021. – С. 211-214.

8. Факторы формирования элементного состава донных отложений в природно-антропогенных системах Нижнего Дона / Д. Г. Невидомская, Т. М. Минкина, Ю. А. Федоров, **А.П. Щербаков**, А.К. Шерстнев /// Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции, Москва, 22–24 апреля 2021 г.: в трех томах. Т. 1. – Москва: РУДН, 2021. – С. 344-348.

9. **Щербаков, А. П.** Содержание комплексных форм Cd, Ni и Cr в почвах прибрежных ландшафтов Таганрогского залива / А. П. Щербаков, А. В. Барахов // Наука и технологии Юга России: XVII Ежегодная молодежная научная конференция, г. Ростов-на-Дону, 15–30 апреля 2021 г.: тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2021. – С. 28.

10. Подвижность тяжелых металлов в почвах прибрежной территории дельты реки Дон / **Щербаков А. П.**, Барахов А. В., Чаплыгин В. А., Литвинов Ю. А. Секция "Почвоведение". Подсекция "Почвы урбанизированных и техногенных ландшафтов. Проблемы загрязнения и ремедиации почв" Москва – Статья № 54. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/section_23_22148.htm (дата обращения 03.09.2023).

11. Анализ загрязнения тяжелыми металлами почв и растений дельты реки Дон и побережья таганрогского залива / Д. Г. Невидомская, Т. М. Минкина, Н. Е. Кравцова, **А. П. Щербаков** [и др.] // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса (Интерагромаш 2020): юбилейный сборник научных трудов XIII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Донского государственного технического университета (Ростовского-на-Дону института сельхозмашиностроения), в рамках XXIII Агропромышленного форума юга России и выставки "Интерагромаш", Ростов-на-Дону, 26-28 февраля 2020 года: в 2 томах. Т. 2. – Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ, 2020. – С. 372-375.

12. Тяжелые металлы в почвах и растениях дельты реки Дон и побережья Таганрогского залива / **А. П. Щербаков**, Чаплыгин В. А. // Секция "Почвоведение". Подсекция "Почвы урбанизированных и техногенных ландшафтов. Проблемы загрязнения и ремедиации почв" Москва – Статья № 51. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/data/section_23_19404.htm (дата обращения 03.09.2023).

13. **Щербаков, А. П.** Подвижность Zn, Pb и Cr в почвах приморской части дельты р. Дон / А. П. Щербаков // Юг России: вызовы времени, открытия, перспективы: XVI Ежегодная молодежная научная конференция, г. Ростов-на-Дону, 13–28 апреля 2020 г.: материалы конференции. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2020. – С. 16.