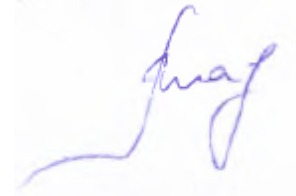


На правах рукописи



Власов Михаил Николаевич

**ЭКОЛОГО - ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРОДСКИХ
АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВ ПОЙМ МАЛЫХ РЕК
(НА ПРИМЕРЕ г. ПЕРМИ)**

03.02.13 – Почвоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова»

Научный руководитель: *Васильев Андрей Алексеевич*, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова»

Официальные оппоненты: *Еремченко Ольга Зиновьевна*, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой физиологии растений и экологии почв ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Смоленцев Борис Анатольевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация: ФГБУН Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «23» декабря 2021 года в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 003.013.01 при ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 8/2, ИПА СО РАН; тел./факс (383) 363-90-25; e-mail: soil@issa-siberia.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПА СО РАН <https://www.issa-siberia.ru> и на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, канд. биол. наук  Татьяна Ивановна Сиромля

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Почвы пойм рек являются чувствительными индикаторами экологических проблем урбанизированных территорий [Варава, 2007; Водяницкий, 2008; Lair, 2009; Schulz-Zunkel, 2009; Янин, 2013; Прокофьева, 2014; Минкина, 2016]. На территории г. Перми протекает около 100 малых водотоков [Двинских, 2011]. Почвы пойм малых рек, несмотря на малую площадь, выполняют важные функции в поддержании устойчивого функционирования городской среды. Долины малых рек при современных темпах и тенденциях развития г. Перми предусматривается использовать как зоны рекреации [Генеральный план..., 2010]. Оценка эколого-геохимического состояния почв пойм малых рек имеет актуальное значение для принятия природоохранных решений и организации контроля состояния почвенного покрова на территории города с населением свыше 1 млн. человек, расположенного в пределах водосборного бассейна Воткинского водохранилища на р. Кама.

Степень разработанности темы. Исследования элементного химического состава подземных вод [Катаев, 2009; Тюрина, 2011], почв водосборных урболандшафтов [Ворончихина, 2013; Еремченко, 2003, 2005, 2016; Лаптева, 2005; Водяницкий, 2008б, 2009б; Шишкин, 2009; Васильев, 2015; Хайрулина, 2019], донных осадков [Осовецкий, 2006] и вод малых рек [Двинских, 2011], выполненные на территории г. Перми, дают только косвенные представления о химическом составе почв пойм. Информация об элементном химическом составе аллювиальных почв пойм малых рек г. Перми базируется до настоящего времени только на фрагментарных исследованиях [Водяницкий, 2008в]. Экологические условия формирования элементного химического состава почв, состав минералов железа и конкреций почв пойм малых водотоков г. Перми практически не изучены. Особенности генезиса почв пойм малых рек г. Перми не охарактеризованы, их классификационное положение не установлено.

Цель исследований. Оценить эколого-геохимическое состояние почв пойм малых рек г. Перми.

Задачи исследований: 1. Изучить морфологические, оптические, физические, физико-химические свойства, состав почв пойм малых рек г. Перми и установить их классификационное положение. 2. Изучить режимы влажности, окислительно-восстановительного потенциала (E_H), реакции среды (pH), rH, температуры почв. 3. Оценить физико-химические и окислительно-восстановительные (ОВ) условия трансформации, миграции и аккумуляции химических элементов в почвах пойм. 4. Исследовать содержание и состав минералов железа в почвах и новообразованиях и оценить их геохимическую роль. 5. Определить и оценить валовой химический состав наилков, роренштейнов и почв пойм. 6. Определить и оценить содержание и подвижность химических элементов (Fe, Cu, Ni, Cr, Mn, Zn) в почвах.

Научная новизна работы: 1. Дана комплексная морфоаналитическая характеристика почв пойм малых рек Ива, Малая Ива, Егошиха, Данилиха, Верхняя Мулянка и Ласьва на территории г. Перми и установлено их классификационное положение. 2. Впервые выявлены закономерности и количественные характеристики ОВ-состояния почв пойм малых городских рек. 3. Впервые в

почвах пойм малых рек г. Перми установлены закономерности содержания, распределения и взаимосвязи химических элементов, выявлены приоритетные элементы-загрязнители, оценена их подвижность, охарактеризованы железосодержащие фазы-носители тяжелых металлов.

Теоретическая и практическая значимость работы: 1. Выявлены параметры и охарактеризованы различия в уровнях опасности и степени элементного химического загрязнения аллювиальных почв пойм малых рек – притоков первого порядка р. Кама в пределах Воткинского водохранилища. 2. Выявлено наличие в профиле почв биогеохимических, сорбционных, глеевых и сероводородных геохимических барьеров. 3. Природоохранные службы г. Перми могут учитывать результаты работы для повышения эффективности мониторинга состояния почв пойм и прогнозирования экологического риска при формировании химического состава вод Воткинского водохранилища и хозяйственном использовании пойм. 4. Теоретические положения концепции урбопедоседиментогенеза дополнены конкретными данными о параметрах и особенностях динамики ОВ-условий, трансформации, миграции и аккумуляции редокс-зависимых химических элементов в почвах пойм малых рек крупного промышленного города на востоке Европейской части России.

Методология и методы исследования базируются на обзоре научной литературы, постановке цели и задач, организации полевых и лабораторных работ, статистической обработке полученных данных и анализе результатов. В работе использован комплекс методов полевого и лабораторного изучения состава, свойств и режимов почв. В диссертации применены методы геохимической оценки почв, разработанные В.А. Кузнецовым [1984], М.А. Глазовской [1988a], Н.С. Касимовым [1990, 2015], В.Б. Ильиным [1991], В.В. Добровольским [1999b], А.И. Перельманом [1999], С.И. Колесниковым [2006], М.С. Паниным [2006], Е.Г. Язиковым [2010], В.А. Алексеенко [2013], Е.Г. Яниным [2013], М. Famёra [2018]. Учтён опыт региональных геохимических исследований в Предуралье, основанный на работах М.А. Шишкина [2009], И.С. Копылова [2012, 2013], Е.А. Ворончихиной [2013], А.А. Васильева [2014, 2015], О.З. Еремченко [2016], Е.А. Хайрулиной [2019]. Анализ ОВ-состояния почв опирался на методологию И.П. Сердобольского [1960], И.С. Кауричева [1979, 1982], Ф.Р. Зайдельмана [1974, 2003], В.И. Савича [2004, 2006, 2008].

Защищаемые положения: 1. На низких поймах среднего и нижнего течения рек Ива, Егошиха, Данилиха, Верхняя Мулянка и Ласьва в промышленно-коммунальной зоне г. Перми сформировались хемозёмы металлозагрязнённые по урбо-аллювиальным глеевым почвам и химически загрязнённые урбо-аллювиальные глеевые и глееватые почвы. 2. Морфологические свойства, почвенные режимы и параметры цвета почв в оптической системе CIE-L*a*b* отражают преимущественно восстановительное и контрастное ОВ-состояние почв пойм малых рек г. Перми. 3. Неоднородные по профилю ОВ-условия почвообразования являются фактором формирования в почвах сорбционных, глеевых, сероводородных, щелочных и биогеохимических (конкреционных) геохимических барьеров. 4. Формирование полиэлементных геохимических аномалий в почвах происходит при участии железосодержащих минералов.

Степень достоверности. В полевых и лабораторных исследованиях использованы общепринятые методики и ГОСТы химического и минералогического анализа почв, стационарных режимных наблюдений. Образцы почв проанализированы в аккредитованных лабораториях ФГБНУ Почвенного института им. В.В. Докучаева, ОАО «МНИИЭКО ТЭК», Московского института стали и сплавов (ФГАОУ ВО «НИТУ МИСиС»), Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова (ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова»), Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ГО «Борок» (ИФЗ РАН) на автоматизированном аналитическом оборудовании и приборах. Результаты исследований и их интерпретация, изложенные в диссертации, соотносятся с экспериментальными и аналитическими данными других авторов. Материалы режимных наблюдений и результаты анализов обработаны методами математической статистики.

Апробация результатов работы. Материалы докладывались на: LXIX Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Молодёжная наука: технологии, инновации» в ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», г. Пермь, 10-11 марта 2009 г.; LXX Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Молодёжная наука 2010: технологии, инновации» в ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», г. Пермь, 30-31 марта 2010 г.; Международной научно-практической конференции «Инновации аграрной науки – предприятиям АПК» в ФГБОУ ВПО «Пермская ГСХА», г. Пермь, 24 апреля 2012 г.; IV Всероссийской научно-практической конференции «Устойчивое развитие территорий: теория и практика» в г. Сибай, Зауральском филиале ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ» г. Уфа, 18 мая 2012 г.; LXXIV Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Молодёжная наука 2015: технологии, инновации» в ФГБОУ ВПО «Пермская ГСХА», г. Пермь, 10-13 марта 2015 г.; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Агротехнологии XXI века» в ФГБОУ ВО «Пермский ГАТУ», г. Пермь, 27-28 февраля 2019 г.; IV Международной научно-практической конференции «Информационные системы и коммуникативные технологии в современном образовательном процессе», 26-28 ноября 2020 г., г. Пермь, Россия.

Результаты исследований изложены в 19 публикациях, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, из них 3 в журнале, входящем в базы цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Соискателем разработана программа исследований, определены объекты, заложены разрезы и отобраны образцы почв. Автором проведены лабораторные исследования, полевые режимные наблюдения, статистическая обработка и обобщение результатов в виде кандидатской диссертации. Исследования проведены в 2006-2020 гг. в соответствии с программой научно-исследовательских работ ФГБОУ ВПО «Пермская ГСХА» на 2006-2010 гг., тема 9; на 2010-2015 гг. № государственной регистрации 01201151674; тематическим планом основных направлений научных исследований ФГБОУ ВО «Пермский ГАТУ» на 2016-2020 гг., № государственной регистрации АААА-А16-116021210271-4.

Автор диссертации выражает благодарность научному руководителю канд. с.-х. наук, заведующему кафедрой почвоведения ФГБОУ ВО «Пермский ГАТУ» А.А. Васильеву за многочисленные консультации при подготовке диссертации. Соискатель признателен за сотрудничество д-ру с.-х. наук Ю.Н. Водяницкому, д-ру с.-х. наук А.Т. Савичеву, д-ру геол.-минерал. наук В.В. Коровушкину, д-ру техн. наук Ю.Т. Платову, канд. физ.-мат. наук В.А. Цельмовичу, сотрудникам и студентам кафедры почвоведения ФГБОУ ВО «Пермский ГАТУ».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 408 источников. Работа изложена на 263 страницах, включает 37 таблиц, 17 рисунков и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Почвы пойм городов и их эколого-геохимическое состояние (обзор научной литературы)

В главе рассмотрены источники и фазы-носители техногенных элементов (ТЭ) в почвах пойм городов, и их трансформация. Раскрыта роль минералов железа в закреплении ТЭ в почвах. Разобраны механизмы фиксации ТЭ и геохимические барьеры. Описано влияние ОВ-состояния почв пойм на подвижность ТЭ. Дана эколого-геохимическая оценка загрязнения ТЭ почв пойм. Охарактеризованы масштабы загрязнения ТЭ почв пойм городов в России и мире.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Объекты исследований – почвы низких пойм малых рек г. Перми, испытывающих разную степень антропогенной нагрузки.

Почвы пойм средних и нижних течений рек Ива, Егошиха, Данилиха и Верхняя Мулянка на территории промышленно-коммунальной зоны города были вскрыты 17 разрезами, соответственно – 80-84, 90-94, 100-104, 110-111 (рисунок 1). Почвы поймы нижнего течения р. Ласьва вскрыты разрезами 120-124 в пределах агропоселковой зоны периферии города.

На южной окраине промышленно-коммунальной зоны города были заложены разрезы 95 и 105 в поймах верхних течений рек Егошиха и Данилиха соответственно (рисунок 1).

За условный местный фон принята аллювиальная серогумусовая глееватая среднесуглинистая почва (разрез 85), сформировавшаяся в пойме верхнего течения р. Малая Ива – правого притока р. Ива, на территории функциональной зоны г. Перми – «земли сельскохозяйственного назначения».

Реки Ива, Егошиха, Данилиха и Верхняя Мулянка являются левобережными притоками р. Кама в пределах Воткинского водохранилища, а река Ласьва правобережным притоком (рисунок 1).

В поймах нижнего течения каждой реки заложены один ключевой и четыре аналоговых разреза. Разрезы почв закладывали на расстоянии 3-5 метров от уреза воды и через 250 метров друг от друга. В местах закладки ключевых разрезов

(№№ 80, 90, 100, 110, 120), размещали стационарные наблюдательные площадки-трансекты, размером 3×30 м., на которых проводили режимные наблюдения.

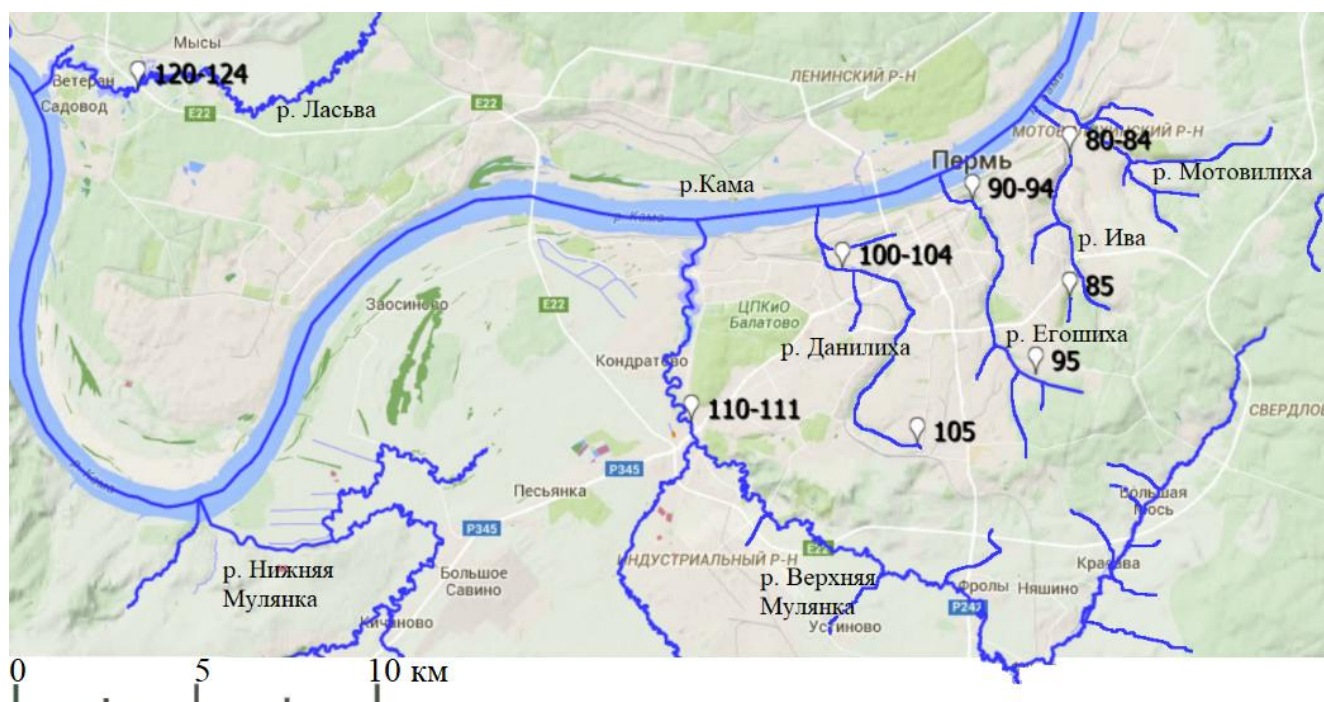


Рисунок 1 – Схема закладки разрезов почв в поймах малых рек г. Перми.

Методы исследований. В *полевых условиях* изучены морфологические свойства, методом стационарных наблюдательных площадок изучены режимы влажности, E_H , рН и температуры почв. Режимы почв пойм рек Ива, Егошиха и Данилиха изучали в 2006, 2008 и в 2014 годах, а в 2007 году в почвах пойм рек Ласьва и Верхняя Мулянка. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом. Один раз в декаду с мая по сентябрь на каждой наблюдательной площадке отбирали образцы почв буром АН-6 в трёхкратной повторности из поверхностного и подповерхностного горизонтов. Одновременно закладывались свежие почвенные разрезы, в которых в средней части поверхностных и подповерхностных горизонтов определяли E_H , рН и температуру потенциометрическим методом с помощью портативного рН метра HI-9025 (Hanna Instruments), оборудованного электродами редокс HI 3230, рН HI 1230, и термокомпенсатором. Повторность измерений трехкратная. Редокс-потенциал E_H пересчитывали на водородный электрод.

Определение физико-химических, физических свойств и гранулометрического состава почв проведено по общепринятым методикам [Аринушкина, 1970; Александрова, 1986; Вадюнина, 1986]. Соренштейны выделены методом отмывки по методике Ф.Р. Зайдельмана [2001]. Магнитную фазу из почв выделяли методом сухого фракционирования с помощью постоянного ферритового магнита. Валовое содержание Zn, Pb, As, Cr, Ni, Cu, Mn, Sr, Al, Si, K, Y, Rb, Ga, Ti, Zr, Fe, P, S, Ca и Mg определяли рентгенофлуоресцентным методом на приборе ORTEC-6111-TEFA. Содержание потенциально подвижных форм Fe, Mn, Ni, Cu и Zn определяли в вытяжках Тамма и Мера-Джексона атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре ААС-3. Легкоподвижные формы Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn экстрагировали 1 н. ацетатно-аммонийным буфером с рН 4,8. Дальнейшее

определение осуществлялось методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе iCAP-6000. Удельная магнитная восприимчивость почв определена на приборе Kappabridge KLY-2. Фазовый состав и состояние железосодержащих минералов идентифицировали методом мессбауэровской спектроскопии на спектрометре Ms-1104Em. Морфологию частиц магнитной фазы и их элементный химический состав изучали на комплексе Tescan Vega II. Спектрофотометрическая характеристика почв изучалась в координатах цвета CIE-L*a*b* на спектроколориметре Пульсар.

Оценку химического состава почв пойм проводили с использованием ранжированных рядов, представляющих собой геохимические ассоциации средних и усреднённых максимальных значений геохимических показателей. Геохимические коэффициенты определяли *расчётным путём*. Коэффициент концентрации (K_K) вычисляли как отношение содержания элемента в образце (C_i , мг/кг) к уровню кларка для почв мира по Виноградову [1957] (C_{iK} , мг/кг). Индекс загрязнения ($K_{yф}$) рассчитывали, как отношение содержания элемента в почвенном образце или наилке (C_i , мг/кг) к фоновому уровню ($C_{iyф}$, мг/кг). Коэффициент опасности элемента относительно его валового содержания ($K_{ов}$) подсчитывали как отношение содержания элемента в образце (C_i , мг/кг) к его ПДК (ОДК) для валового содержания ($C_{iПДК(ОДК)вал.}$, мг/кг). Использовали значения ПДК (ОДК) для валового содержания по СанПиН 1.2.3685-21 и Инструктивному письму..., 1990]. Коэффициент опасности элемента относительно содержания его легкоподвижной формы ($K_{оп}$) высчитывался как отношение содержания легкоподвижной формы элемента, экстрагированной с помощью 1 н. ацетатно-аммонийного буфера (C_i , мг/кг), к его ПДК (ОДК) для подвижных форм ($C_{iПДК(ОДК)подв.}$, мг/кг). Использовали значения ПДК (ОДК) по СанПиН 1.2.3685-21. Категорию загрязнения почв по валовому содержанию и по легкоподвижным формам ТМ устанавливали в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21; МУ 2.1.7.730-99. Подвижность ТМ оценивали по показателю K_M – доля легкоподвижных и потенциально подвижных форм от валового содержания, %.

Угрозу загрязнения техногенными элементами (ТЭ) или техногенными магнитными частицами оценивали, используя фактор обогащения (EF), нормированный по железу [Kobierski, 2015; Marković, 2018; Faměra, 2018].

Интегральные значения суммарного показателя загрязнения Z , относительно фона рассчитывали по СанПиН 1.2.3685-21; МУ 2.1.7.730-99. Полиэлементные природно-антропогенные геохимические аномалии почв выявляли и оценивали с помощью коэффициентов N_x (число присутствующих химических элементов) и R_x (среднее арифметическое суммы значений K_K) по методике Янина [2013]. Обработка результатов исследований выполнена с помощью стандартных статистических методов. Использовался ранговый коэффициент корреляции Спирмена, многомерный кластерный анализ. Обработку данных вели в пакете StatSoft STATISTICA 10. Рассматривались статистически значимые значения ($p < 0,05$).

Глава 3. Оценка условий трансформации, миграции и аккумуляции химических элементов в почвах пойм

3.1 Морфологические свойства

Морфологические свойства почв пойм в нижнем течении рек свидетельствуют о неоднородности ОВ-условий почвообразования. Микролокальность ОВ-условий проявляется в формировании трубчатых новообразований – роренштейнов. Глеевые горизонты на фоне сизой окраски имеют охристые примазки, потёки и пятна. Грязно-сизая и сизая окраска глеевых горизонтов G^{\sim} , отражает доминирование анаэробных ОВ-условий почвообразования (рисунок 2).

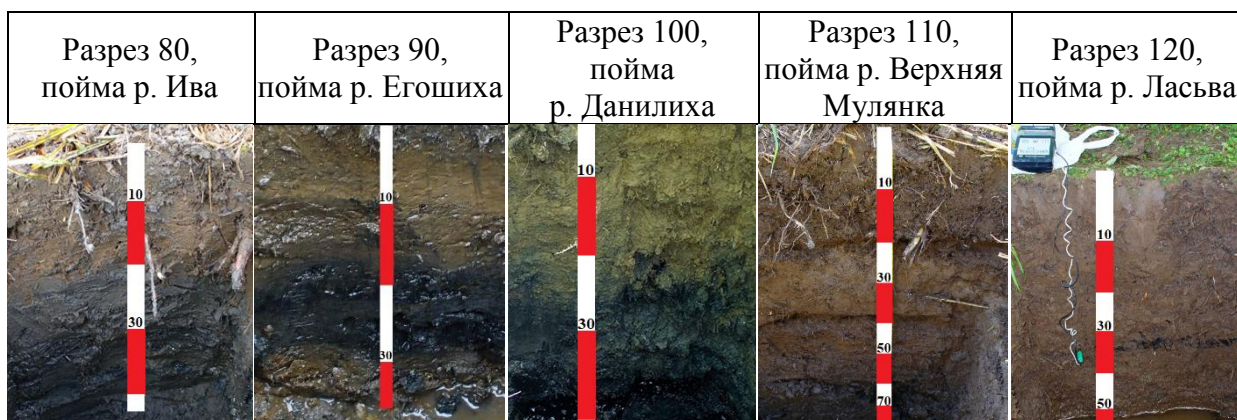


Рисунок 2 – Строение профилей почв пойм нижних течений малых рек: Ива, Егошиха, Данилиха, Верхняя Мулянка и Ласьва г. Перми.

3.2 Гранулометрический состав почв, общие физические свойства, почвенно-гидрологические константы и физико-химические свойства почв

В гумусовых горизонтах почв пойм нижних течений содержание гумуса варьирует от 3,1 до 4,5%. Реакция среды преимущественно нейтральная. Ёмкость катионного обмена в супесчаных почвах поймы р. Егошиха низкая (14,5 мг-экв/100 г); в среднесуглинистых почвах пойм малых рек Ива, Верхняя Мулянка и Данилиха – умеренно низкая (19,2-23,3 мг-экв/100 г), а в легкоглинистых почвах поймы р. Ласьва – высокая (45,5 мг-экв/100 г.). В составе физической глины доля ила превышает 50 %. Изученные почвы имеют низкую плотность и высокую общую пористость, и влагоемкость.

Преимущественно нейтральная реакция среды и относительно высокое содержание ила, способствуют закреплению в почвах ТМ.

3.3 Окислительно-восстановительное состояние почв

Динамика влажности. Влажность гумусовых горизонтов почв пойм рек Ива, Егошиха, Данилиха и Верхняя Мулянка преимущественно находилась в диапазоне ППВ-ПВ, а глеевых горизонтов – на уровне близком к ПВ. Влажность урбо-серогумусового горизонта почвы поймы р. Ласьва несколько ниже и варьировала

в диапазоне ВРК-ППВ, а в слое аллювия $C1g^{X}$ изменялась в интервале от ППВ до ПВ. Максимальные значения полевой влажности почвы отмечались в периоды дождей и при подъеме уровня грунтовых вод.

Динамика редокс потенциала E_H , рН и температуры. В гумусовых горизонтах почв значения E_H варьировали в очень широком диапазоне ОВ-условий: от интенсивно восстановительных (-174 мВ в почве поймы р. Ива) до умеренно окислительных условий (532 мВ в почве поймы р. Данилиха). В глеевых горизонтах ОВ-условия изменялись от интенсивно восстановительных (-111 мВ в почве поймы р. Ива) до слабо восстановительных условий (396 мВ в почве поймы р. Егошиха). В целом за периоды наблюдений преобладали восстановительные условия. Реакция почвенных растворов была преимущественно нейтральная. Значения рН варьировали от сильнокислых условий (5,8 единиц в гумусовых и глеевых горизонтах почвы поймы р. Ива) до слабощелочных значений (8,1 единиц в глеевых горизонтах почвы поймы р. Данилиха). Температура почв пойм за периоды наблюдений варьировала в гумусовых горизонтах от 6 до 23° С, а в глеевых горизонтах от 7 до 17° С.

Динамика rH. В почвах пойм формировались преимущественно устойчивые восстановительные условия (рисунок 3). Периоды с окислительными процессами, при rH более 28 единиц, были кратковременны. В гумусовых горизонтах величина rH изменялась в интервале от интенсивно-восстановительных условий (7,3 единиц в почве поймы р. Ива) до окислительных (32,8 единиц в почве поймы р. Данилиха).

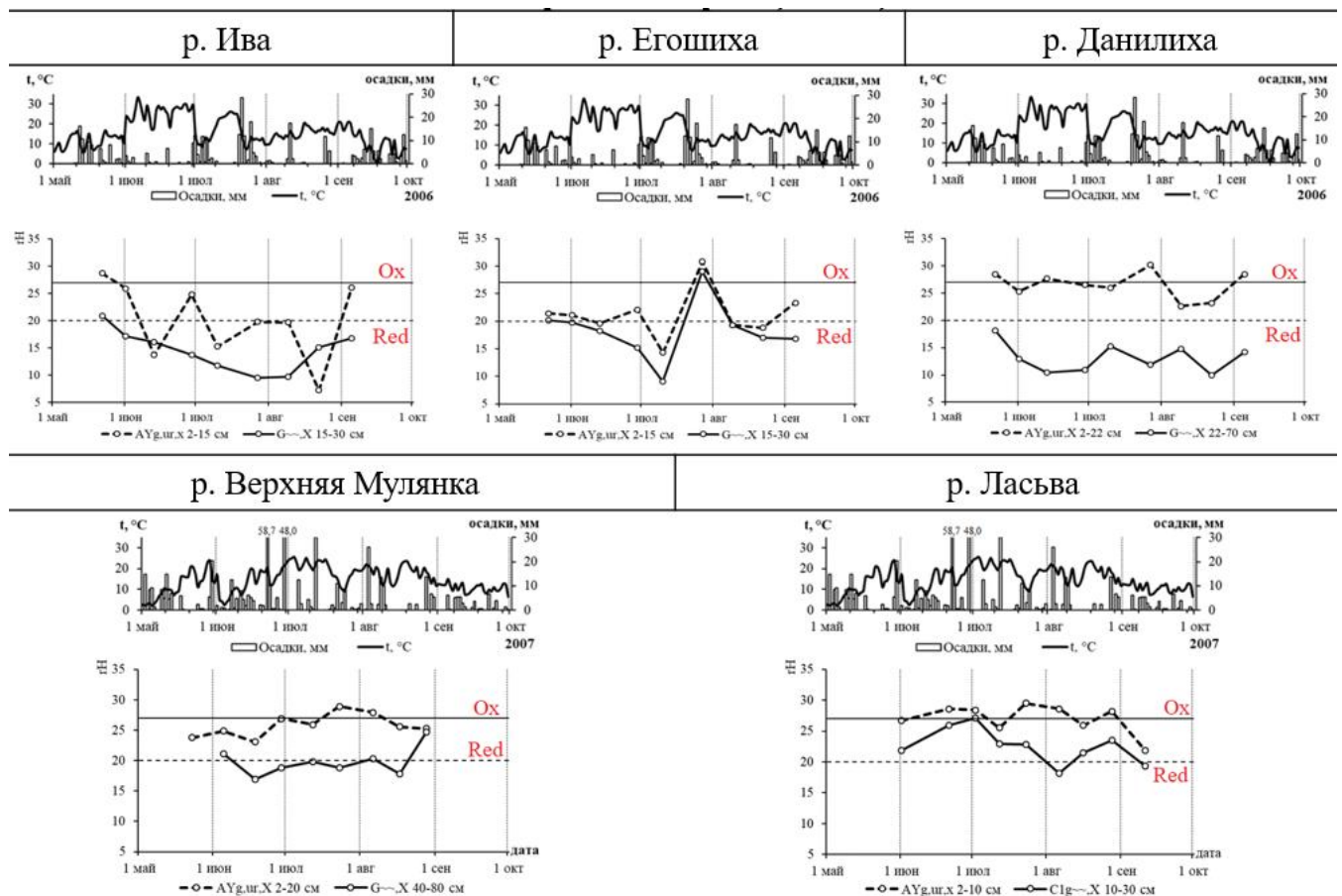


Рисунок 3 – Динамика парциального давления водорода rH в почвах пойм малых рек г. Перми, 2006, 2007 гг.

В глеевых горизонтах величина rH соответствовала интенсивно-восстановительным условиям. В подповерхностном глееватом горизонте почвы поймы р. Ласва преобладали умеренно восстановительные условия. Относительно стабильное ОВ-состояние в интервале от интенсивно восстановительных до умеренно восстановительных условий и нейтральная реакция среды способствует закреплению в почвах пойм нижних течений рек катионогенных элементов (Pb, Ni, Zn и др.).

Таким образом, гранулометрический состав, физико-химические свойства и режимы почв пойм малых рек г. Перми обуславливают формирование в их профилях геохимических барьеров различной природы.

Глава 4. Минералы железа в почвах пойм

4.1 Фазовый состав минералов железа и тяжелые металлы

Химическое экстрагирование показало, что доля дитиониторастворимого железа ($Fe_{д}$) варьирует от высокого уровня – 35 % (от валового Fe) в горизонте AУg,ur,X почвы поймы р. Егoшixa, до очень высокого уровня – 42 % в слое аллювия C2g,h~,X почвы поймы р. Ласва. В наилках и поверхностных горизонтах почв преобладают слабоокристаллизованные фазы Fe, критерий Швертмана K_{III} ($Fe_{O} / Fe_{д}$) составляет соответственно 0,5 и 0,4 единиц. В глеевых горизонтах значения K_{III} снижаются до 0,3, так как в анаэробных условиях доля аморфных гидроксидов железа понижается, а доля окристаллизованных соединений Fe(III) увеличивается. Доля окристаллизованного железа от валового в гумусовых горизонтах почв варьирует от 14% (р. Верхняя Мулянка) до 32% (р. Ива). В роренштейнах содержание дитиониторастворимого железа ($Fe_{д}$), высокое (24% от валового Fe) в почве поймы р. Данилиха, и очень высокое 71% в почве поймы р. Верхняя Мулянка. Доля аморфных и слабоокристаллизованных соединений Fe, в роренштейнах почв пойм высокая, $K_{III\text{ ср}} = 0,7$. Содержание окристаллизованного железа значительно ниже и варьирует от 5% до 24% от валового Fe.

Установлены сильные достоверные связи между содержанием Fe_{O} и концентрацией Mn_{O} , Zn_{O} , Ni_{O} ($r = 0,6-0,7$).

Магнитная восприимчивость наилок и почв изменяется от очень низких ($26 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) до умеренно высоких значений ($629 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Наилки в верхнем течении рек содержат мало магнетиков. Исключение составляют наилки в верхнем течении р. Данилиха, где их магнитная восприимчивость достигает свыше $600 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ($EF_{\chi/Fe} = 6,1$ – значительное обогащение магнетиками). Источниками магнитных частиц здесь являются Транссибирская железнодорожная магистраль и улица Куйбышева, расположенные в пределах водосборной территории верховьев этой реки. В нижнем течении рек значительно обогащены магнитными частицами наилки пойм р. Данилиха ($EF_{\chi/Fe} = 6,1$) и р. Егoшixa ($EF_{\chi/Fe} = 5,7$). Почвы пойм верхних течений рек Егoшixa, Данилиха и почвы нижних течений рек Ива и Верхняя Мулянка незначительно и умеренно обогащены магнетиками. Диапазон максимальных значений коэффициентов $EF_{\chi/Fe}$ составляет от 1,4 до 2 единиц. В почвах пойм нижних течений рек Егoшixa и Данилиха, значения $EF_{\chi/Fe}$ варьируют

в широком оценочном интервале: от незначительного до значительного обогащения. В глеевых горизонтах почв пойм рек Егошиха и Данилиха магнитные частицы разрушаются. Магнитная восприимчивость снижается до $140 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\text{EF}_{\chi/\text{Fe}}$ до 2,8 и 2,4 единиц.

Электронно-микронзондовый и энергодисперсионный анализы показали, что магнитная фаза содержит разнообразные по морфологии и составу частицы: магнетит неправильной формы с примесями Mn и Cr; магнетит сферической формы; интерметаллические сплавы Fe и Sn и другие (рисунок 4). В магнитных фракциях, валовое содержание Fe, Mn, Cr, Ni, Cu и Zn в несколько раз выше, чем в образцах почв до проведения магнитной сепарации.

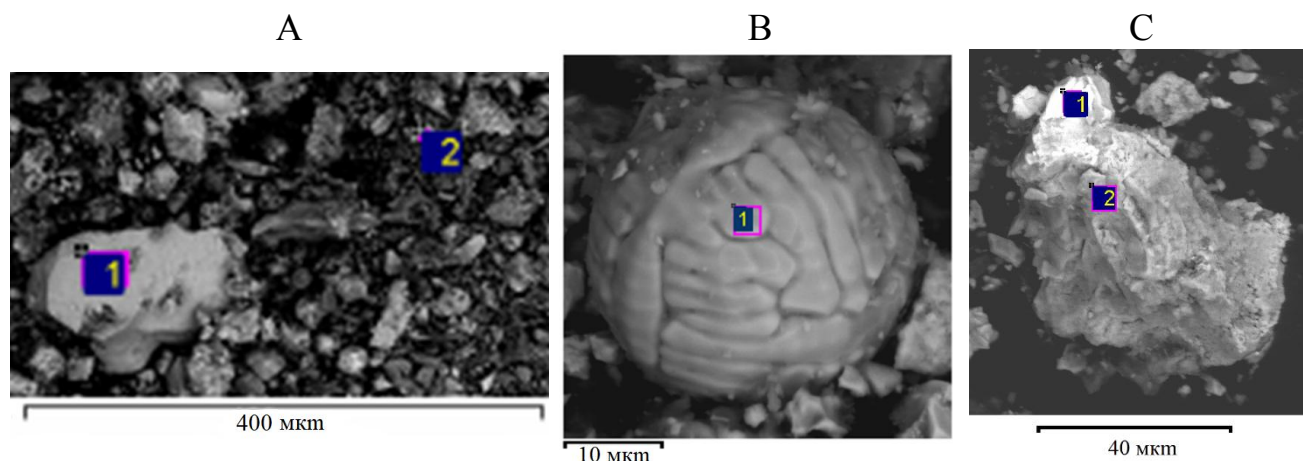


Рисунок 4 – Электронно-микроскопические снимки магнитных частиц: магнетит неправильной (А) и сферической (В) формы; интерметаллический сплав (С). Поверхностный горизонт (АУg,ur,X, 2-15 см) почвы поймы р. Егошиха. Цифры в квадратах – точки проведения энергодисперсионного анализа.

Мессбауэровская спектроскопия показала, что в почве и наилках поймы р. Егошиха преобладают аморфные тонкодисперсные гидроксиды железа. Их доля от валового содержания железа достигает 60 %. Среди оксидов железа на гематит приходится до 21 %, а на нестехиометрический магнетит до 11 % от общего железа. В роренштейнах почв пойм параметры секстеты С2 мессбауэровских спектров характеризуют магнитоупорядоченные фазы маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и фероксигита ($\delta\text{-FeOOH}$). Содержание маггемита в роренштейнах достигает 3,6 %, а фероксигита – от 12 до 40 %. Волокнистые частицы фероксигита в составе роренштейнов обладают высокой геохимической активностью относительно закрепления ТЭ. В магнитной фазе почв пойм преобладает нестехиометрический магнетит.

4.2 Минералы железа и оптические свойства почв

Периодическое формирование в почвах восстановительных ОВ-условий подтверждают параметры *оптических свойств почв*. В глеевых горизонтах почв, по сравнению с гумусовыми, наблюдается снижение значений красноты – a^* (до 2,6 в почве поймы р. Данилиха) и желтизны – b^* (до 9 единиц в почве поймы р. Верхняя Мулянка). Исключением является почва поймы р. Егошиха, где весомый вклад в оптические свойства вносят микрочастицы красноцветных пермских глин,

обогащенные гематитом. Холодный тон, глеевых горизонтов, характеризующийся пониженными значениями красноты a^* , объясняется тем, что частицы гематита, с краснотой a^* около 16 единиц, в восстановительных условиях маскируется синими плёнками (гидр)оксидов Fe(II). В почве поймы р. Ласьва значения красноты a^* достигают 6,0 единиц, так как значения гН, здесь выше. Накопление тёмноцветных сульфидов железа в глеевых горизонтах почв пойм рек Ива, Данилиха и Верхняя Мулянка сопровождается снижением значения показателя светлоты L^* . Оглеение в почвах пойм также диагностируется по пониженным отношениям значений красноты к значениям желтизны a^*/b^* .

Глава 5. Геохимическая оценка элементного состава почв пойм

5.1 Валовое содержание химических элементов

Характеристика варьирования валового содержания химических элементов. В генеральной выборке образцов ($n = 80$) изученные химические элементы в составе почв разделяются на две условные группы (таблица 1). Первая группа – техногенные элементы (ТЭ). Варьирование концентрации Cr, Pb, Ni, Zn, Cu, As, Mn, а также S, P, Mg, Ca не подчиняется нормальному (гауссовскому) распределению. Это свидетельствует о разнообразии источников поступления данных элементов и о высокой техногенной нагрузке, оказываемой данными элементами на аллювиальные почвы. Для Si, Al, Fe, K, Ti, а также Sr, Ga, Zr, Rb, Y медианные и средние арифметические значения их валового содержания близки и подчиняются нормальному (гауссовскому) распределению. Следовательно, химические элементы, отнесенные ко второй условной группе, поступают в поймы преимущественно из естественных источников.

Коэффициенты вариации и стандартные отклонения значений концентрации Cr, Pb, Ni, Zn, Mn, Cu, As, S, P, Mg, Ca высокие, что характерно для техногенных химических аномалий [Сагт, 1990; Алексеенко, 2013].

Коэффициенты концентрации (K_K). Валовое содержание значительной части изученных химических элементов выше кларков (таблица 1). Средние арифметические ($K_{K \text{ средние}}$) и усреднённые максимальные значения ($K_{K \text{ max средние}}$) коэффициентов концентрации химических элементов в почвах пойм промышленно-коммунальной зоны г. Перми образуют следующие геохимические ряды:

$$K_{K \text{ среднее}} (n = 44) \text{ Cu } 3,9 > \text{ Zn } 3,5 > \text{ Pb } 3,2 > \text{ Ni } 3,1 > \text{ S } 2,4 > \text{ Ca } 2,0 > (\text{Mg, As}) 1,3 > \text{ Mn } 1,1$$

$$K_{K \text{ max среднее}} \text{ Cu } 4,2 > \text{ Zn } 3,8 > \text{ Pb } 3,6 > (\text{Ni, S}) 3,5 > \text{ Cr } 3,1 > \text{ Ca } 2,2 > \text{ P } 2,0 > \text{ As } 1,9 > (\text{Mn, Mg}) 1,8 > (\text{Sr, Fe}) 1,1$$

в почвах поймы р. Ласьва агропоселковой зоны геохимические ряды, следующие:

$$K_{K \text{ среднее}} (n = 13) \text{ Pb } 6,4 > \text{ Zn } 2,9 > \text{ Cu } 2,3 > \text{ Ca } 1,8 > \text{ As } 1,6 > \text{ Ni } 1,5 > \text{ Mn } 1,4 > \text{ P } 1,2 > (\text{Fe, Ti, K}) 1,1$$

$$K_{K \text{ max среднее}} \text{ Pb } 10,8 > \text{ Zn } 7,4 > \text{ Ca } 4,1 > (\text{Cu, Mn}) 3,1 > \text{ As } 3,0 > \text{ Ni } 2,3 > \text{ P } 1,9 > \text{ Mg } 1,5 > \text{ S } 1,3 > (\text{Fe, Ti, K}) 1,2 > \text{ Sr } 1,1.$$

Таблица 1 – Валовой химический состав почв пойм малых рек г. Перми

Горизонт	мг/кг																%					
	Zn	Pb	Cr	As	Ni	Cu	Sr	Mn	Fe	Y	Rb	Ga	Ti	Zr	S	P	Ca	Mg	Al	Si	K	
разрез 85. Аллювиальная серогумусовая глееватая почва поймы верхнего течения р. Малая Ива, условный фон																						
наилки	98	27	157	3	75	152	281	1238	35894	22	48	14	4391	286	792	454	2,21	0,90	6,30	29,66	1,36	
AY _{g,x}	115	21	150	5	53	85	251	1440	37613	22	55	16	5229	292	624	480	1,15	1,18	6,53	30,24	1,40	
Cl _{g[~],x}	67	11	192	6	70	70	309	828	38536	22	46	13	5331	246	496	275	1,33	0,45	7,04	30,57	1,43	
разрезы 80-84. Урбо-аллювиальные серогумусовые глеевые химически загрязнённые почвы поймы нижнего течения р. Ива, n = 5																						
наилки	x	144	30	162	8	103	78	296	1816	41170	26	60	15	4739	260	1034	504	3,45	0,75	5,97	28,93	1,47
	max	165	43	233	11	120	104	311	2051	43967	28	62	19	4942	279	1200	785	3,71	1,10	6,32	29,91	1,51
AY _{g,ur,x}	x	152	31	146	7	87	80	278	1296	40777	26	61	15	4751	274	688	520	2,76	0,93	6,27	29,60	1,48
	max	179	43	219	11	109	95	294	1509	44184	28	66	22	4906	298	996	720	3,04	1,24	6,74	31,17	1,54
G [~] , X	x	85	22	119	6	64	55	314	622	35051	23	54	17	4345	265	770	359	2,17	0,75	6,50	30,89	1,43
	max	91	44	192	13	85	62	326	751	36956	25	60	29	4690	283	1928	619	2,28	0,96	7,10	33,29	1,44
разрез 95. Хемозём по аллювиальной серогумусовой глееватой почве поймы верхнего течения р. Егошиха																						
наилки	288	57	424	9	167	89	287	4466	54145	27	60	3	4858	221	1104	2041	4,39	0,38	5,40	24,39	1,29	
AY _{g,X}	86	17	75	3	65	56	298	1927	40402	26	54	12	4433	215	1084	929	2,01	0,56	6,03	27,90	1,38	
Cl _{g[~],x}	82	12	130	9	53	29	317	1533	39682	23	52	23	4768	243	568	-	1,92	0,33	6,08	27,75	1,25	
разрезы 90-94. Хемозёмы по урбо-аллювиальным серогумусовым глеевым почвам поймы нижнего течения р. Егошиха, n = 5																						
наилки	x	240	42	271	5	229	112	271	992	38284	19	41	15	3521	181	2293	1223	4,81	1,47	5,00	27,08	1,10
	max	318	53	513	9	291	129	284	1207	41017	20	46	24	3786	204	4168	2616	5,40	3,51	6,79	28,34	1,13
AY _{g,ur,X}	x	299	50	296	6	220	120	274	1183	41143	19	43	11	3944	197	1106	919	4,03	0,96	5,27	28,00	1,25
	max	458	60	527	9	338	143	286	1540	45274	20	47	18	4223	230	1200	1980	4,63	1,68	6,19	32,69	1,34
G [~] , X	x	315	47	280	9	249	103	277	491	38772	23	47	14	4126	224	6330	954	3,60	0,97	5,76	28,29	1,29
	max	376	62	417	14	312	146	285	635	41192	24	52	19	4600	263	9652	1352	4,13	1,22	6,80	31,35	1,45
разрез 105. Хемозём по аллювиальной серогумусовой глееватой почве поймы верхнего течения р. Данилиха																						
наилки	469	87	424	8	515	361	214	1734	53145	18	30	12	3055	81	1688	297	7,82	4,60	3,10	20,34	0,74	
AY _{g,X}	138	31	144	4	115	54	214	782	34964	25	62	26	4696	286	868	406	1,54	0,87	6,00	30,24	1,49	
Cl _{g[~],x}	67	15	109	4	52	34	216	472	33412	25	65	8	5145	323	396	92	1,03	0,86	6,61	32,97	1,61	
разрезы 100-104. Хемозёмы по урбо-аллювиальным серогумусовым глеевым почвам поймы нижнего течения р. Данилиха, n = 5																						
наилки	x	365	59	216	8	240	177	257	1339	44659	20	47	11	3623	155	2100	1115	6,20	0,97	4,61	26,51	1,16
	max	436	68	253	13	280	220	275	1687	51195	24	53	15	4241	174	2424	2106	7,52	1,56	5,22	35,74	1,30
AY _{g,ur,X}	x	168	38	200	6	95	73	253	752	27741	16	43	13	3450	161	1298	809	3,09	0,50	4,82	28,53	1,17
	max	349	90	629	7	262	121	267	851	36027	17	55	17	4510	241	1516	1596	3,88	0,95	6,48	31,20	1,39
G [~] , X	x	176	39	367	7	132	83	257	825	27791	17	45	11	3481	184	4158	1120	2,05	0,57	5,35	24,68	1,27
	max	401	57	1436	13	480	245	278	1022	33769	19	49	16	4200	229	10672	3104	3,23	0,86	5,83	30,52	1,34
разрезы 110-111. Хемозёмы по урбо-аллювиальным серогумусовым глеевым почвам поймы р. Верхняя Мулянка, n = 2																						
AY _{g,ur,X}	x	106	24	69	4	80	55	310	1552	41496	23	57	6	4418	268	916	1574	3,26	1,13	6,44	30,65	1,30
	max	109	25	82	4	81	56	325	2276	43498	24	61	7	4576	299	1104	2206	3,60	1,18	6,76	31,27	1,36
Cl _{g[~],X}	x	143	18	69	6	70	59	279	937	38477	24	56	14	4172	256	2560	1550	3,37	0,98	6,81	31,03	1,35
	max	144	20	75	9	77	65	282	1068	40871	25	56	16	4307	282	3452	2406	3,48	0,98	6,86	31,77	1,36
G [~] , X	x	125	18	175	6	94	62	284	867	36980	23	55	13	4577	264	1114	730	2,23	0,82	6,71	31,04	1,42
	max	114	21	75	8	79	70	298	1146	39885	26	54	18	4199	301	1616	1666	3,63	1,29	6,90	31,92	1,37
разрезы 120-124. Урбо-аллювиальные серогумусовые глееватые химически загрязнённые почвы поймы р. Ласьва, n = 5																						
наилки	x	538	19	78	7	66	47	318	3415	44705	24	72	13	4424	176	1210	1491	6,24	0,54	5,11	23,22	1,36
	max	814	20	96	10	70	60	407	4420	47623	29	76	28	4882	288	1428	3423	9,43	0,93	6,75	29,88	1,56
AY _{g,ur,x}	x	174	15	94	5	69	53	256	1427	42502	27	68	13	4853	246	750	605	2,53	0,64	6,58	28,87	1,48
	max	549	20	116	7	85	68	335	3947	45281	29	72	17	5289	286	1332	1033	7,36	0,96	7,18	31,84	1,59
Cl _{g[~],X}	x	127	94	91	10	56	41	283	1051	40991	29	60	15	4905	302	544	1163	2,34	0,56	6,42	30,29	1,41
	max	183	196	109	23	97	53	337	1393	44687	32	65	21	5613	295	732	1936	3,71	0,94	7,03	31,35	1,51

Примечание. x – среднее; max – максимальное значение

Почвы пойм малых рек г. Перми можно рассматривать как региональные полиэлементные геохимические аномалии ТЭ. Повышенные концентрации Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, As, Mn, S и P в аллювиальных почвах по сравнению с эталонами сравнения объясняются прежде всего антропогенным воздействием на пойменные

экосистемы. Наиболее высокие значения K_K в ассоциациях имеют халькофильные элементы с высокой технофильностью и токсичностью. Строительный мусор, антигололедные средства и др., а также карбонатность коренных пород в долинах рек оказывают влияние на накопление в почвах пойм Ca и Mg.

В аллювиальных почвах пойм верхних течений рек Малая Ива, Егошиха, Данилиха и нижних течений рек Ива и Верхняя Мулянка, выявлены узкие и широкие полиэлементные геохимические аномалии $K_{K_{max}}$ с числом присутствующих элементов N_{Σ} от 7 до 13. Интенсивность аномалий в почвах R_X слабая от 1,3 до 2,3 единиц, а в наилках высокая и достигает 6,5 единиц.

В почвах пойм нижних течений рек Егошиха и Данилиха в центре города, формируются широкие полиэлементные аномалии $K_{K_{max}}$ со средней (от 4,0 до 4,5) и высокой (6,3) интенсивностью R_X . Концентрации Rb, Ga, Y, Zr и Al, а также локально Si и Ti, ниже кларков.

В почвах поймы р. Ласьва на территории агропоселковой зоны города формируются широкие полиэлементные аномалии $K_{K_{max}}$ со средней интенсивностью R_X . Концентрации Rb, Ga, Y и Al не превышают кларки.

В почвах пойм верхних течений рек ТЭ преимущественно сосредоточены в поверхностных горизонтах, а в нижнем течении ещё и в глеевых.

Оценка загрязнения. Для оценки загрязнения использовались следующие показатели: фоновый геохимический уровень, индекс загрязнения ($K_{УФ}$), суммарный показатель загрязнения (Z), коэффициенты обогащения, нормированные по железу (EF), коэффициенты опасности превышения ПДК (K_O).

По сравнению с *фоновой* аллювиальной почвой поймы в верхнем течении р. Малая Ива, почвы пойм нижних течений рек Верхняя Мулянка, Ива и Ласьва загрязнены ТЭ. Почвы пойм рек Егошиха и Данилиха загрязнены еще сильнее (таблица 1).

Индекс загрязнения ($K_{УФ}$). Фоновые концентрации химических элементов были использованы для расчёта контрастности геохимических аномалий. Средние арифметические ($K_{УФ \text{ средние}}$) и усреднённые максимальные значения индексов загрязнения ТЭ ($K_{УФ \text{ max средние}}$) в почвах пойм рек промышленно-коммунальной зоны на территории левобережной части г. Перми образуют следующие геохимические ряды:

$K_{УФ \text{ средние}}$ (n = 42): S 3,5 > (Zn, Ni, P, Ca) 2,3 > Pb 2,1 > As 1,5 > (Cr, Mg) 1,3 > (Cu, Sr, Mn, Fe, Y, Rb) 1,0

$K_{УФ \text{ max средние}}$: S 5,3 > P 4,4 > Cr 3,5 > Ni 3,1 > Pb 2,8 > Zn 2,7 > Ca 2,4 > Mg 2,1 > Cu 1,9 > As 1,8 > (Mn, Ga) 1,4 > (Y, Rb, Zr) 1,2 > (Sr, Fe) 1,1

Суммарный показатель загрязнения (Z) был подсчитан относительно индексов загрязнения $K_{УФ \text{ max средние}}$. Для почв пойм верхних течений рек Егошиха, Данилиха и нижних течений рек Ива и Верхняя Мулянка на периферии города суммарные показатели загрязнения Z соответствуют допустимому уровню (3-14 единиц). Для глеевых горизонтов почвы поймы р. Верхняя Мулянка показатель Z умеренно опасный (21 единица).

В почвах пойм нижних течений рек Егошиха и Данилиха в центре города величины суммарного показателя загрязнения Z соответствуют умеренно опасному (21-23 единицы) и опасному уровню (44-60 единиц).

Коэффициенты (EF) обогащения, нормированные по железу. Средние арифметические и усреднённые максимальные значения коэффициентов EF

обогащения ТЭ, нормированных по железу, для почв пойм верхних и нижних течений рек промышленно-коммунальной зоны левобережной части города Перми составили следующие геохимические ряды:

$EF_{\text{средние}} (n = 42): S 3,7 > P 2,5 > (Zn, Ca) 2,3 > (Ni, Pb) 2,2 > (As, Mg) 1,4 > Cr 1,3 > (Cu, Sr, Y, Rb) 1,0.$

$EF_{\text{max средние}}: S 5,3 > P 3,9 > Ni 2,8 > (Pb, Zn) 2,6 > Ca 2,4 > Cr 1,9 > Mg 1,7 > As 1,5 > Ga 1,3 > (Cu, Rb) 1,2 > (Sr, Y, Zr, Mn, Si, K) 1,1.$

В почвах пойм верхних течений рек Егошиха, Данилиха и нижних течений рек Ива и Верхняя Мулянка на территории промышленно-коммунальной зоны периферии города максимальные значения EF находятся в диапазоне от незначительного до умеренного обогащения, что указывает на смешанное геогенное и антропогенное происхождение химических элементов. В глееватом слое аллювия почвы поймы нижнего течения р. Ива значительным диапазоном обогащения характеризуется только сера (6,0). Глеевые горизонты почв поймы нижнего течения р. Верхняя Мулянка значительно обогащены не только серой (6,6), но и фосфором (8,3).

В почвах пойм нижних течений рек Егошиха и Данилиха значения EF варьируют в интервале от незначительного до значительного обогащения. Очень высокий диапазон обогащения – 25, был установлен для единичного значения концентрации в почве серы.

Порядок расположения элементов, в геохимических рядах EF и $K_{уф}$, показывает, что: S, Zn, Ni, P, Ca, Pb, As, Cr и Mg имеют антропогенное происхождение, а Cu, Sr, Mn, Fe, Y, Rb, Ga и Zr – природно-антропогенное.

ПДК и $K_{ов}$. В почвах и наилках пойм общее содержание: Zn, Pb, As, Cr, Ni, Cu, Mn, S превышает значения ПДК. Оценка геохимического состояния почв пойм по средним арифметическим значениям коэффициентов опасности валового содержания ТЭ ($K_{ов \text{ среднее}}$) была дополнена оценкой критического уровня их загрязнения ($K_{ов \text{ max среднее}}$). Средние арифметические и усреднённые максимальные значения коэффициентов опасности валового содержания ТЭ в почвах пойм образуют следующие геохимические ряды:

$K_{ов \text{ среднее}} (n = 57): S 10,7 > As 4,1 > Cr 1,8 > Zn 1,7 > (Ni, Cu) 1,3 > Pb 1,2$

$K_{ов \text{ max среднее}} (n = 19): S 13,8 > As 4,5 > Cr 2,9 > Zn 2,1 > Ni 1,7 > Cu 1,6 > Pb 1,3$

5.2 Содержание подвижных форм химических элементов

Содержание подвижных форм ТМ наиболее информативный показатель загрязнения почв [Мажайский, 2003; Сиромля, 2009; Du Laing, 2009; Сысо, 2018].

Концентрация легкоподвижных форм ТМ. Почвы и наилки пойм нижних течений рек загрязнены легкоподвижными формами ТМ, извлекаемых ААБ. Средние значения коэффициентов опасности концентрации легкоподвижных форм $K_{оп}$ ТМ в почвах пойм образуют следующий геохимический ряд:

$Cu 4,1 > Ni 4,0 > Cr 3,2 > Mn 1,8 > Zn 1,4.$

Категория загрязнения почв ТМ «чрезвычайно опасная и высокоопасная».

В почвах пойм нижних течений рек Ива, Егошиха и Данилиха среди легкоподвижных форм ТМ наибольшей подвижностью (средние - максимальные значения $K_{МА}$, %) обладает Mn 25-32%. Мобильность остальных исследованных

элементов ниже: Pb 17-34 % > Zn 16-31 % > Cu 11-23 % > Ni 6-15 % > Cr 3-6 % > Fe 1 % (рисунок 5).

Максимальная подвижность ТМ характерна для почв поймы р. Данилиха.

В профиле почвы поймы р. Ласьва средние значения K_{MA} , % сформировали следующий ряд: Mn 20 % > Pb 8 % > Zn 5 % > (Cu, Ni) 3 % > (Cr, Fe) 1 %.

Концентрация потенциально подвижных форм ТМ. Доля оксалаторастворимых соединений металлов K_{MO} в валовом содержании (средние и максимальные значения K_{MO} , %) высокая и составляет для Zn 38-72%, Cu 37-51%, Ni 27-47%, Mn 27-37%, Fe 11-16%. Доля потенциально подвижных дитиониторастворимых соединений металлов в валовом содержании (средние и максимальные значения K_{MD} , %) значительная и составляет для Cu 66-97%, Mn 57-68%, Fe 38-44%, Zn 28-73%, Ni 20-51% (рисунок 5).

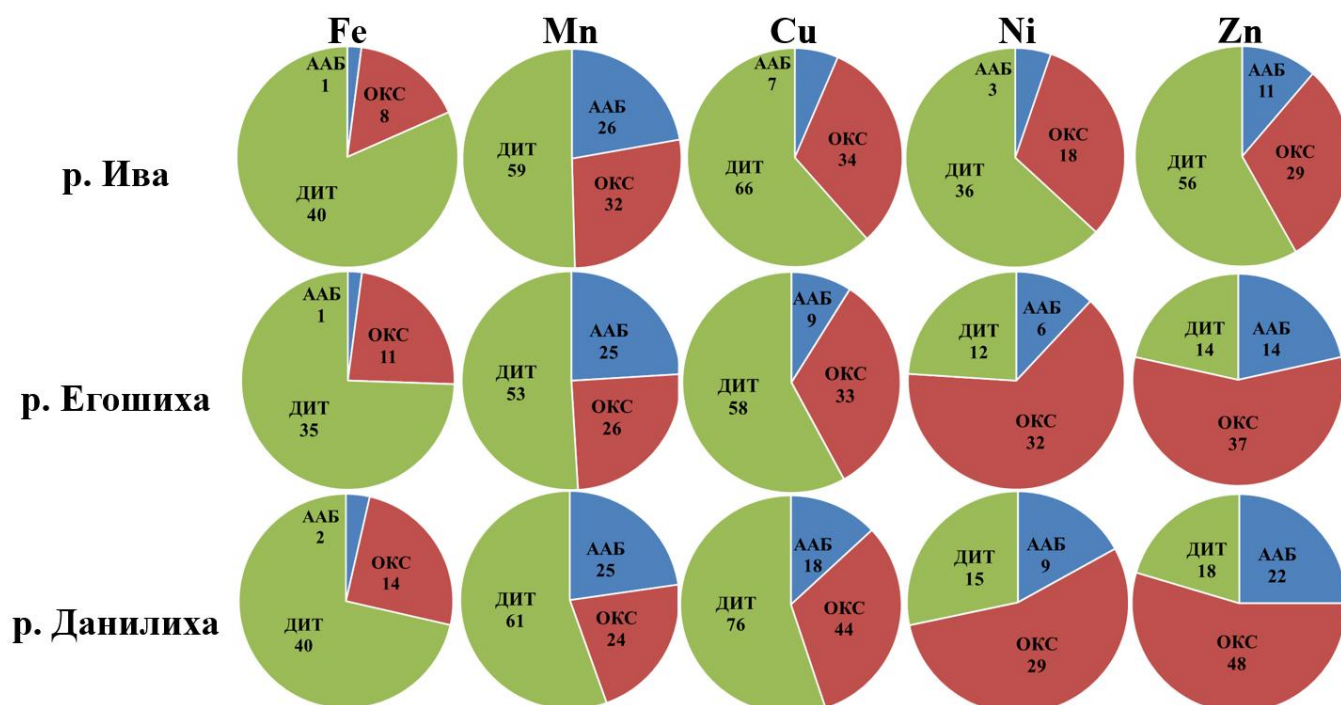


Рисунок 5 – Легкоподвижные и потенциально подвижные формы соединений Fe и ТМ (Mn, Zn, Ni и Cu) в почвах пойм малых рек г. Перми, фракционированные по сокращённой параллельной схеме, % от валового содержания. ААБ – растворимые в ацетатно-аммонийном буфере с рН 4,8; ОКС – оксалаторастворимые; ДИТ – дитиониторастворимые

Легкоподвижные формы (K_{MA} , %) металлов распределяются по профилям почв неоднородно. В глеевых горизонтах, по сравнению с поверхностными, их количество выше, так как в анаэробных условиях высвобождение металлов происходит более интенсивно.

Распределение по профилю почв металлов, извлекаемых вытяжками Тамма и Мера-Джексона, имеют свои особенности. В почвах пойм нижних течений рек Егошиха и Данилиха реактив Тамма извлекает большее количество Ni и Zn, чем реактив Мера-Джексона. Следовательно, Ni и Zn преимущественно связаны с аморфными слабокристаллизованными гидроксидами железа и техногенным

мелкодисперсным (менее 10 мкм) магнетитом. Доля потенциально подвижных соединений (% от валового содержания) меди и марганца выше, чем никеля и цинка.

Высокие концентрации легко- и потенциально подвижных форм ТМ в почвах пойм нижних течений рек представляет угрозу для вторичного загрязнения вод реки Кама в пределах Воткинского водохранилища – местного приёмника водных миграционных потоков металлов. Вторичное загрязнение речных вод металлами может быть вызвано увеличением их подвижности при изменении ОВ-условий в почвах пойм малых рек.

5.3 Оценка взаимосвязи концентрации химических элементов и экологических условий. Геохимические барьеры

Многомерный анализ взаимосвязей концентрации химических элементов и показателей ОВ-условий показал наличие двух кластеров.

В первом кластере с E_H тесно связаны редокс-зависимые элементы Fe и Mn. Во втором кластере с pH объединяются S, P и Ca.

Парный корреляционный анализ по Спирмену выявил, что на щелочном барьере с участием Ca аккумулируются P, S, Cu ($r = 0,6-0,8$).

Многомерный кластерный анализ взаимосвязи концентрации химических элементов, нормированных по железу, в почвах пойм верхних и нижних течений малых рек показал наличие двух кластеров (рисунок 6).

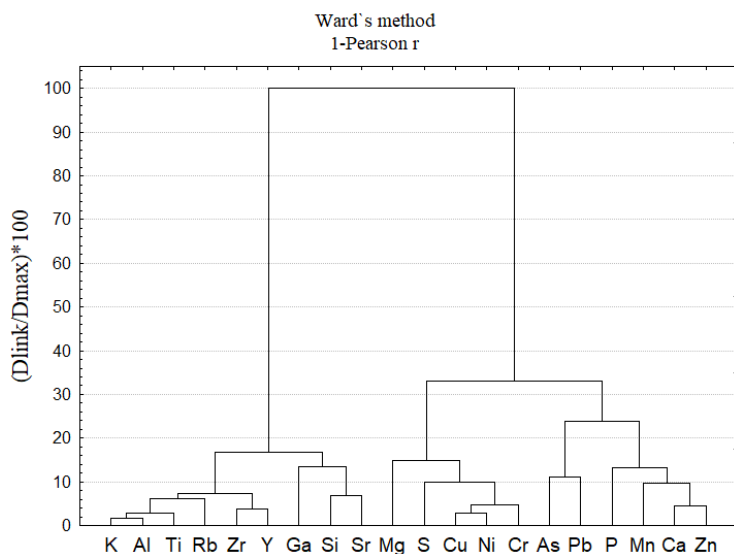


Рисунок 6 – Дендрограмма кластерного анализа взаимосвязи валового содержания химических элементов, нормированных по железу, в наилках и почвах пойм малых рек города Перми, n = 80.

В алюмосиликатном кластере объединяются Zr, Rb, Y, Ga, Sr с Si, Al, K и Ti. Элементы данного кластера в почвах пойм входят в состав глинистых минералов, калиевых полевых шпатов и гидрослюд. Во втором кластере связаны ТЭ: Cu, Ni, Cr, As, Pb, Zn, Mn, а также S, P, Mg, Ca.

Парный корреляционный анализ (r) по Спирмену данных о валовой концентрации ТЭ в профилях почв пойм верхних и нижних течений рек показал, что Ca, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, As достоверно связаны с Fe ($r = 0,3-0,5$ при $n = 80$), что говорит о формировании в почвах природно-техногенных сорбционных барьеров. Следовательно, в почвах пойм с восстановительными условиями аморфные и кристаллические формы железа имеют важное значение в сорбции ТЭ. Связи

между Zn, Cu, Pb и Fe для поверхностных горизонтов почв пойм также отмечала Dlouhá [2013]. Достоверные связи между общими концентрациями ТЭ, нормированных по железу: As и Pb; Pb и P; Zn, Ca с Mn и P ($r = 0,4-0,5$), Zn с Ca ($r = 0,7$); и Cr, Ni, Cu с Mg ($r = 0,3-0,4$), также указывают на формирование природно-техногенного сорбционного барьера.

Природно-техногенные сероводородные и глеевые барьеры формируются в глеевых горизонтах и глееватых слоях аллювия почв пойм нижних течений рек, а в глееватых слоях аллювия почв пойм верхних течений рек – глеевые барьеры. В кластере с участием ТЭ в глеевых горизонтах выявлены достоверные связи ($r = 0,6-0,8$) между содержанием Cu, Zn, Pb, Ni, Cr и концентрацией S.

Оценка взаимосвязи валового содержания и концентрации легкоподвижных форм химических элементов с величиной магнитной восприимчивости. Множественный кластерный анализ нормированных по железу УМВ, валового содержания и концентрации легкоподвижных форм химических элементов выявил группы элементов, как связанных, так и не связанных с величиной магнитной восприимчивости.

С величиной УМВ сильнее связана общая концентрация Mg, Cr, Ni, Cu и S и слабее Zn, Ca и Pb. Кластеры, в которых нет связи содержания химических элементов с УМВ, образуют K, Al, Ti, Rb, Zr, Y, Ga, Si и Sr, а также легкоподвижные формы Cu-Ni-Cr.

Аналогичные закономерности выявил парный корреляционный анализ по Спирмену. В почвах и наилках пойм связаны нормированные по железу значения УМВ и валовое содержание: Ni, Cu, Ca, Mg ($r = 0,5-0,6$), Zn ($r = 0,4$), Cr ($r = 0,3$) и Pb ($r = 0,2$). Данные связи объясняются изоморфным замещением Fe (II, III) в решётках техногенных магнетита/маггемита и гематита на Ni, Cu, Ca, Mg, а Zn, Cr и Pb у парамагнитных гидроксидов железа [Водяницкий, 1998; Савич, 2008; Плеханова, 2008].

Достоверная средняя связь между общим Fe и УМВ обнаружена в генеральной выборке ($r = 0,4$ при $n = 80$), в подповерхностных глеевых горизонтах ($r = 0,6$ при $n = 17$) и в аллювии ($r = 0,6$ при $n = 15$).

Рост содержания окристаллизованных соединений Fe в глеевых горизонтах и глееватых слоях аллювия объясняет усиление связи между УМВ и общим содержанием железа в почвах пойм. Роль глеегенеза была оценена с помощью критерия Швертмана (K_{III}). В выборке из наиболее загрязнённых почв пойм рек центра промышленно-коммунальной зоны г. Перми была выявлена достоверная положительная связь ($r = 0,8$) между значениями K_{III} и УМВ.

Геохимическая оценка роренштейнов. Роренштейны почв пойм малых рек г. Перми являются геохимическими барьерами для ТЭ. Средние значения ($n = 11$) коэффициентов накопления (K_x) химических элементов в составе роренштейнов образуют следующий ряд:

$P\ 6,4 > Fe\ 4,4 > Pb\ 3,9 > As\ 3,2 > Zn\ 2,9 > Mn\ 2,7 > Cu\ 1,8 > Ca\ 1,7 > Cr\ 1,6 > Ni\ 1,5$

Минералы железа, формирующие роренштейны, участвуют в фиксации ТЭ. Методом кластерного и корреляционного анализов в роренштейнах установлена достоверная связь содержания Fe с концентрацией Cu и Ni ($r = 0,7$).

Глава 6. Классификационное положение почв пойм малых рек г. Перми

Эколого-геохимическая оценка изученных почв позволила уточнить их классификационное положение. В соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [2004], рекомендациями Герасимовой [2003, 2017], Прокофьевой [2011, 2014], почвы пойм нижних течений малых рек г. Перми занимают следующее классификационное положение: **ствол** синлитогенные; **отдел** аллювиальные; **тип** антропогенно преобразованные; **подтипы** урбо-аллювиальные серогумусовые глеевые и глееватые; хемозёмы по урбо-аллювиальным серогумусовым глеевым почвам; **род** химически загрязнённые; **виды** слабо- (1-3 ПДК), мало- (3-5 ПДК) и среднезагрязнённые (5-10 ПДК); **разновидности** от супесчаных, среднесуглинистых до легкоглинистых; **разряд** на современных природно-техногенных аллювиальных отложениях.

В нижнем течении рек сформировались: в пойме р. Ива – урбо-аллювиальные серогумусовые глеевые, среднесуглинистые химически слабозагрязнённые Zn, Cu, Cr и S почвы; в пойме р. Ласьва – урбо-аллювиальные серогумусовые глееватые легкоглинистые химически слабозагрязнённые As и малозагрязнённые S почвы. В поймах нижних течений рек Егошиха, Данилиха и Верхняя Мулянка сформировались хемозёмы средне загрязнённые Cr и S по урбо-аллювиальным серогумусовым глеевым, супесчано-среднесуглинистым почвам.

В верхних течениях рек, сформировались: в пойме р. Малая Ива – слабонарушенная аллювиальная серогумусовая глееватая, среднесуглинистая почва, а в поймах рек Егошиха и Данилиха – хемозёмы среднезагрязнённые S по аллювиальным серогумусовым глееватым, легко- и тяжелосуглинистым почвам.

Заключение

1. Параметры физико-химической поглотительной способности почвы (S и ЕКО), преимущественно нейтральная реакция среды, высокое содержание фосфора, и преимущественно восстановительные ОВ-условия способствуют закреплению техногенных элементов в наилках и почвах пойм малых рек г. Перми. В профиле почв значения rН варьируют в интервале от интенсивно-восстановительных (7,3) до окислительных (32,8); формируются глеевые геохимические барьеры.

2. Валовое содержание ТМ (Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Mn), мышьяка и серы превышает кларки, фоновые концентрации и ПДК. В полиэлементных геохимических аномалиях металлополлютанты сочетаются с S, P, Mg и Ca. Интенсивность загрязнения варьирует от слабой до средней и высокой, а уровень загрязнения – от допустимого до умеренно опасного и опасного.

3. Содержание легкоподвижных форм ТМ (Cu, Ni, Cr, Mn, Zn) в почвах пойм на территории промышленно-коммунальной зоны г. Перми превышает ПДК. Коэффициенты опасности загрязнения ($K_{оп}$) подвижными формами ТМ составляют ряд: Cu 4,1 > Ni 4,0 > Cr 3,2 > Mn 1,8 > Zn 1,4, что соответствует чрезвычайно опасному и высокоопасному уровням загрязнения. Доля легкоподвижных форм ТМ от общего содержания ($K_{МА}$, %) отличается для разных ТМ. Средние и

максимальные значения K_{MA} составляют геохимический ряд: Mn 25-32 > Pb 17-34 > Zn 12-27 > Cu 11-23 > Ni 6-15 > Cr 3-6 > Fe 1%.

4. Гидроксиды и оксиды железа являются носителями и геохимически активными центрами аккумуляции ТЭ. В почвах пойм рек Егошиха и Данилиха значительная часть потенциально подвижных форм Mn, Zn, Ni и Cu сосредоточена в составе аморфных тонкодисперсных гидроксидов железа, гематита, литогенного и техногенного магнетита. Доля потенциально подвижных оксалаторастворимых соединений ТМ (K_{MO} , %) высокая. Средние и максимальные значения K_{MO} составляют для Zn 38-72%, Cu 37-51%, Ni 27-47%, Mn 27-37%, Fe 8-16% от общего содержания в почве.

Валовое содержание Ni и Cu, нормированное по железу, и величина удельной магнитной восприимчивости почв достоверно связаны ($r = 0,5-0,6$).

5. Локальными геохимическими аномалиями в почвах пойм являются роренштейны, для которых коэффициенты накопления (K_x) Pb, As, Zn, Cu, Cr, Ni составляют от 1,5 до 3,9 единиц. В составе роренштейнов Cu и Ni достоверно связаны с Fe (при $r = 0,7$).

6. В поймах нижних течений р. Егошиха и р. Данилиха сформировались супесчано-среднесуглинистые хемозёмы среднезагрязнённые Cr и S по урбо-аллювиальным серогумусовым глеевым почвам, а в поймах верхнего течения этих рек – хемозёмы среднезагрязнённые S по аллювиальным серогумусовым глееватым, легко- и тяжелосуглинистым почвам. В пойме нижнего течения р. Ива сформировались урбо-аллювиальные серогумусовые глеевые среднесуглинистые химически слабозагрязнённые Zn, Cr, Cu и S почвы. В пойме р. Верхняя Мулянка – хемозём среднезагрязнённый S по урбо-аллювиальной серогумусовой глеевой среднесуглинистой почве. В пойме р. Ласьва – урбо-аллювиальная серогумусовая глееватая легкоглинистая химически слабозагрязнённая As и малозагрязнённая S почва. В пойме р. Малая Ива – аллювиальная серогумусовая глееватая, среднесуглинистая почва.

Практические предложения

Рекомендовать природоохранным службам г. Перми предусмотреть размещение реперных участков в пределах пойменных ландшафтов малых рек. Контролировать содержание ТЭ необходимо по всему профилю почв пойм.

Список опубликованных работ по теме диссертации: в журналах из перечня ВАК РФ

1. Водяницкий, Ю.Н. Влияние железо-содержащих пигментов на цвет почв на аллювиальных отложениях средне-камской равнины / Ю.Н. Водяницкий, А.А. Васильев, А.В. Кожева, Э.Ф. Сатаев, **М.Н. Власов** // Почвоведение. – 2007. – № 3. – С. 318-330.
2. Водяницкий, Ю.Н. Гидрогенное загрязнение тяжёлыми металлами аллювиальных почв г. Пермь / Ю.Н. Водяницкий, А.А. Васильев, **М.Н. Власов** // Почвоведение. – 2008. – № 11. – С. 1399-1408.
3. Водяницкий, Ю.Н. Роль соединений железа в закреплении тяжёлых металлов и мышьяка в аллювиальных и дерново-подзолистых почвах в районе г.

Пермь / Ю.Н. Водяницкий, А.А. Васильев, **М.Н. Власов**, В.В. Коровушкин // Почвоведение. – 2009. – № 7. – С. 794-805.

4. Васильев, А.А. Власов М.Н. Оценка эколого-геохимического состояния аллювиальных почв пойм малых рек города Пермь / А.А. Васильев, **М.Н. Власов** // [Электрон. ресурс] АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – № 2. – Режим доступа:

http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2021/2/st_202.pdf.

публикации в других изданиях:

1. Водяницкий, Ю.Н. Оптические свойства гематит содержащих почв / Ю.Н. Водяницкий, А.А. Васильев, **М.Н. Власов**, В.Ю. Гилёв // Проблемы почвоведения: Науч. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева РАСХН. – М., 2006. – С. 325-345.

2. Водяницкий, Ю.Н. Магнитная восприимчивость аллювиальных почв Воткинского водохранилища в пределах города Перми / Ю.Н. Водяницкий, А.А. Васильев, **М.Н. Власов** // Известия СГСХА. – 2007. Выпуск 4. – С. 37-41.

3. Лубнина, Е.В. Окислительно-восстановительные условия почвообразования аллювиальных почв малых рек города Перми и их загрязнение тяжёлыми металлами / Е.В. Лубнина, **М.Н. Власов** // Материалы LXVI Всероссийской науч.-практической конф. молод. уч., аспирантов и студентов (г. Пермь, 10-12 апреля 2007 г.) / Пермский аграрный вестник. – Выпуск XVII. – в 3 ч. – Ч. 1. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2007. – С. 133-135.

4. **Власов, М.Н.** Окислительно-восстановительные условия аллювиальных почв малых рек г. Перми и их загрязнение тяжёлыми металлами / М.Н. Власов // Экология: проблемы и пути решения: материалы XVI Всероссийской науч.-прак. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (18-19 апр. 2008 г., Пермь) / Перм. Ун-т. Пермь, 2008. – С. 54-59.

5. **Власов, М.Н.** Химический состав железомарганцевых новообразований почв Пермской агломерации и загрязнение почв территории тяжёлыми металлами / М.Н. Власов // Материалы LXVIII Всероссийской науч.-практической конф. (г. Пермь, 16-17 апреля 2008 г.) / Пермский аграрный вестник. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2008. – С. 64-67.

6. **Власов, М.Н.** Загрязнённость тяжёлыми металлами аллювиальных почв малых рек города Перми / М.Н. Власов // Материалы LXVII Всероссийской науч.-практической конф. молод. уч., аспирантов и студентов (г. Пермь, 19-20 мар. 2008 г.) / Пермский аграрный вестник. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2008. – С. 61-63.

7. **Власов, М.Н.** Динамика окислительно-восстановительных условий в аллювиальных почвах пойм рек Мулянка и Ласьва / М.Н. Власов, А.Б. Афанасьев // Материалы LXVII Всероссийской науч.-практической конф. молод. уч., аспирантов и студентов (г. Пермь, 19-20 мар. 2008 г.) / Пермский аграрный вестник. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2008. – С. 57-59.

8. **Власов, М.Н.** Тяжёлые металлы в почвах пойм и на водоразделе верхних течений рек Ива, Егошиха и Данилиха / М.Н. Власов // Молодёжная наука: технологии, инновации: материалы LXIX Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов (г. Пермь, 10-11 марта 2009 г.). – в 3 ч. – Ч. 1 / Пермская государственная с.-х. академия. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА». 2009. – С. 81-83.

9. **Власов, М.Н.** Динамика окислительно-восстановительных условий почв пойм малых рек левобережной части города Перми / М.Н. Власов, Н.С. Грязнова // Молодёжная наука: технологии, инновации: материалы LХIХ Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов (г. Пермь, 10-11 марта 2009 г.). – в 3 ч. – Ч. 1 / Пермская государственная с.-х. академия. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА». 2009. – С. 78-80.
10. **Власов, М.Н.** Геохимические модули загрязнения тяжёлыми металлами аллювиальных почв малых рек города Пермь / Власов М.Н., Ходылина Я.О. // Молодёжная наука 2010: технологии, инновации: материалы LXX Всероссийской науч.-практич. конф. молод. уч., аспирантов и студентов (г. Пермь, 30-31 марта 2010 г.) – в 3 ч. – Ч. 1 / Пермская государственная с.-х. академия. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2010. – С. 110-112.
11. Васильев, А.А. Окислительно-восстановительное состояние и оптические свойства урбо-аллювиальных почв пойм малых рек Пермской агломерации / А.А. Васильев, **М.Н. Власов** // Инновации аграрной науки – предприятиям АПК»: материалы Международной науч. – практической конф. (Пермь, 24-25 апреля 2012 года) – в 3 ч. – Ч. 1 / Пермская государственная с.-х. академия. – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2012. – С. 166-172.
12. Васильев, А.А. Подвижные формы тяжёлых металлов в урбо-аллювиальных почвах пойм малых рек г. Перми / А.А. Васильев, **М.Н. Власов** // Устойчивое развитие территорий: теория и практика: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (г. Уфа, 18 мая 2012 г.). – Уфа: Зауральский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский ГАУ», 2012. – С. 186-189.
13. **Власов, М.Н.** Вклад магнитной фракции в содержание тяжёлых металлов в урбо-аллювиальных почвах пойм малых рек г. Перми / М.Н. Власов, А.А. Мартынова // Молодёжная наука 2015: технологии, инновации: материалы LXXIV Всероссийской научно-практической конференции (г. Пермь, 10-13 марта 2015 г.) – в 3 ч. – Ч. 1 / Пермская государственная с.-х. академия. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокростъ», 2015. – С. 155-158.
14. **Власов, М.Н.** Формы железа и содержание тяжёлых металлов (Mn, Zn, Ni, Cu) в почвах пойм малых рек г. Перми / М.Н. Власов, А.А. Васильев // Агротехнологии XXI века: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Пермь, 26-28 февраля 2019 г.). – в 3 ч. – Ч. 1. / Пермский государственный аграрно-технологический университет. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокростъ», 2019. – С. 146-150.
15. **Власов, М.Н.** Кластерный анализ в эколого-геохимической оценке почв пойм малых рек города Пермь / М.Н. Власов, А.А. Васильев // Информационные системы и коммуникативные технологии в современном образовательном процессе: материалы IV Международной научно-практической конференции (г. Пермь, 26-28 ноября 2020 г.) – Пермский гос. аграрно-технологич. ун-т. – Пермь : Изд-во ИПЦ «Прокростъ», 2020. – С 21-23.