

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 504.054;504.064.2.001.18

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА
г. ГУСИНООЗЕРСКА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ УГОЛЬНОЙ ГРЭС

© 2023 г. Д. Г. Сычева*, * (ORCID: 0000-0001-8952-5820), Н. Е. Кошелева*

а МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия**e-mail: l.msu@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 08.04.2023 г.

Принята к публикации 12.04.2023 г.

Изучено загрязнение верхних горизонтов почв г. Гусиноозерска (Республика Бурятия) под воздействием выбросов работающей на Окино-Ключевских бурых углях ГРЭС. Проанализировано содержание 14-ти элементов (Sr, As, Co, Mo, Sb, V, Cu, Ni, Cr, W, Zn, Bi, Cd, Pb) в валовых пробах, а также во фракции физической глины (частиц диаметром <10 мкм, PM_{10}) и в пробах бурых углей и золы ГРЭС. Приоритетными поллютантами почв (Urbic Technosols) Гусиноозерска являются Sr, As, Co, Mo, Sb, V с более высокими концентрациями большинства элементов во фракции PM_{10} . Наиболее загрязнены почвы и фракция PM_{10} промышленной действующей подзоны, где аккумулируются Sr, As, Co, V, Cu, Mo, Ni, Cr, содержащиеся в золе-уносе Гусиноозерской ГРЭС. Большая часть территории (57% для почв в целом и 47% для фракции PM_{10}) характеризуется низким уровнем загрязнения ($Z_c = 8-16$). Наибольшую экологическую опасность представляет As, во фракции PM_{10} его концентрации превысили ОДК в 90% исследуемых проб. Факторами накопления элементов в почвах и их фракции PM_{10} являются содержание Fe_2O_3 и MnO, органического вещества, гранулометрический состав, кислотно-щелочные условия, значение $EC_1:5$, а также принадлежность к функциональной зоне, обуславливающие формирование различных классов геохимических барьеров. Сравнение химического состава Окино-Ключевских бурых углей и золы Гусиноозерской ГРЭС и Канско-Ачинских углей и золы Центральной ТЭЦ г. Северобайкальска показало, что используемые в Северобайкальске Канско-Ачинские бурые угли и зола ТЭЦ незначительно обогащены металлами и металлоидами, что объясняет их слабую аккумуляцию в почвах.

Ключевые слова: тяжелые металлы, металлоиды, городские почвы, факторы аккумуляции поллютантов, бурый уголь, Urbic Technosols

DOI: 10.31857/S0032180X23600270, EDN: OJFDFW

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных экологических проблем городов является загрязнение атмосферного воздуха выбросами транспортных средств и объектов промышленности [2, 26, 29, 35]. В России в 2020 г. в атмосферу поступило более 22 млн т загрязняющих веществ, включая 17 млн т от стационарных источников [17]. Среди них выделяются предприятия топливно-энергетического комплекса, работающие на углях. В дымовых выбросах теплоэлектростанций (ТЭС) содержатся токсичные соединения тяжелых металлов и металлоидов (ТММ), представляющие значительную канцерогенную и мутагенную опасность [27, 32, 45].

Негативное влияние выбросов ТЭС обусловлено тем, что концентрации ТММ в золе-уносе могут быть в десятки раз выше, чем в угле, из которого она образована. По данным [41], в золе одной из ТЭЦ в Восточной Индии концентрации Cd, Cr и Mn были в 2 раза выше по сравнению с

исходным углем, Pb — в 2.5 раза, Ni — в 3 раза. В золе ТЭЦ в Нидерландах это соотношение для Cr и Cu составило 6–7 раз, для As в 12 раз, для Cd в 40 раз [36]. Химические характеристики летучей золы и шлаков могут значительно различаться в зависимости от происхождения угля, его предварительной подготовки и технологии сжигания. Так, в г. Кангал (Турция) отмечено обогащение золы-уноса ТЭЦ следующими ТММ: V, Cr, Mn, Co, Zn, As, Hg [21], на ТЭЦ в г. Костолац (Сербия) зола-уноса по сравнению с углем обогащена Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, Ni [43]. Эта проблема особенно актуальна для Республики Бурятия, где 94% электроэнергии вырабатывается угольными ТЭС, крупнейшая из которых — Гусиноозерская государственная районная электростанция (ГРЭС), являющаяся градообразующим предприятием в г. Гусиноозерске.

Основной депонирующей средой и индикатором многолетнего загрязнения городских ланд-

шафтов являются почвы. Особое внимание в настоящее время уделяется изучению наиболее опасных твердых частиц диаметром менее 10 мкм — фракции физической глины (PM_{10}), которая задерживается в органах дыхания человека и способствует развитию респираторных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний [37, 39, 45]. Тонкие частицы, как правило, наиболее интенсивно накапливают ТММ, что связано с большей удельной площадью поверхности, доступной для адсорбции поллютантов [44]. Обогащенные ТММ почвенные частицы PM_{10} , выдуваемые воздушным потоком, значительно усиливают загрязнение атмосферного воздуха [3, 28] и являются одним из источников дорожной пыли, наряду с промышленными и транспортными выбросами и противогололедными реагентами в зимний период [13].

Цель работы — оценить уровень загрязнения ТММ почвенного покрова г. Гусиноозерска с крупнейшей в регионе ГРЭС. Решались следующие задачи: 1) определить валовое содержание ТММ и содержание во фракции PM_{10} верхнего горизонта почв в функциональных зонах города; 2) оценить экологическую опасность загрязнения почв ТММ; 3) выявить физико-химические свойства городских почв и другие факторы, влияющие на аккумуляцию ТММ; 4) оценить вклад основных источников ТММ в загрязнение почв и их фракции PM_{10} в Гусиноозерске.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучаемая территория. Гусиноозерск находится в центральной части Гусиноозерской межгорной котловины, на северо-восточном берегу оз. Гусиное. Климат города резко континентальный восточно-сибирского типа, преобладают северные и северо-западные ветры. Вследствие слабой продуваемости Гусиноозерской котловины воздух в ней застаивается и охлаждается, с чем связаны штили и температурные инверсии в зимний период, способствующие накоплению воздушных загрязнителей в нижних слоях атмосферы. Гусиноозерская котловина сложена архейскими, протерозойскими, палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими изверженными, осадочно-метаморфическими образованиями. Почвообразующие породы в Гусиноозерской котловине представлены четвертичными отложениями разной мощности и генезиса. В течение всего четвертичного периода в депрессии происходило накопление разновозрастных, преимущественно галечно-валунных отложений [6].

Территория Гусиноозерской котловины относится к зоне каштановых почв сухой степи, Тувинско-Южно-Забайкальской провинции. На большей части территории Гусиноозерска рас-

пространены каштановые типичные суглинистые почвы (*Haplic Kastanozems (Loamic)*), в понижениях в местах с повышенным увлажнением формируются лугово-каштановые почвы (*Gleyic Kastanozems*) — это терраса р. Загустай и локальные понижения рельефа. На пойме р. Загустай в условиях устойчиво-избыточного (преимущественно грунтового) увлажнения и достаточно частого затопления паводковыми водами формируются аллювиальные дерново-луговые почвы (*Gleyic Fluvisols*), переходящие в аллювиально-болотные (*Fluvisols*) по мере приближения к устью реки [6].

Ведущую роль в формировании техногенных аномалий ТММ в почвах играет функциональная структура города. В Гусиноозерске выделены следующие функциональные зоны: промышленная с действующей и недействующей подзонами, селитебная с многоэтажной и малоэтажной застройкой, постагрогенная и пустыри (рис. 1). Промышленная действующая подзона включает Гусиноозерскую ГРЭС и транспортные предприятия с железнодорожной станцией Загустай, станцию биологической очистки, кирпичный завод и глиняный карьер. Установленная электрическая мощность ГРЭС составляет 1190 МВт, тепловая мощность — 224.5 Гкал/ч. В 2021 г. станция выработала 3668 млрд кВт/ч электрической энергии. Недействующая промзона представляет собой обширную территорию с недостроенными или закрывшимися предприятиями, где источником загрязняющих веществ являются продукты разрушения зданий и других строительных конструкций. Под воздействием антропогенной деятельности и техногенного загрязнения в промышленной зоне формируются поверхностно-преобразованные антропогенные почвы, представленные урбо-каштановыми почвами (*Urbic Technosols*) [5]. Данные почвы сочетают горизонт урбик мощностью менее 0.5 м и ненарушенную срединную и нижнюю части почвенного профиля.

Многоэтажная селитебная подзона образована 3–4-этажными жилыми домами, административной застройкой, зданиями торгового, культурно-просветительного, учебного и медицинского назначения. В пределах данной зоны за счет привносимого на поверхность и в верхние горизонты урботехногенного материала формируются урбо-каштановые почвы (*Urbic Technosols*). Селитебная подзона с малоэтажной застройкой и приусадебными участками относится к частному сектору, в функциональной зоне представлены поверхностно-преобразованные каштановые почвы (*Hortic Kastanozems*) огородов и садов с высоким содержанием органического вещества (4.3%) в верхнем горизонте, обусловленного внесением органических удобрений. Постагрогенная зона представляет собой земли бывшего сельскохозяйственного назначения — пашни и пастбища.

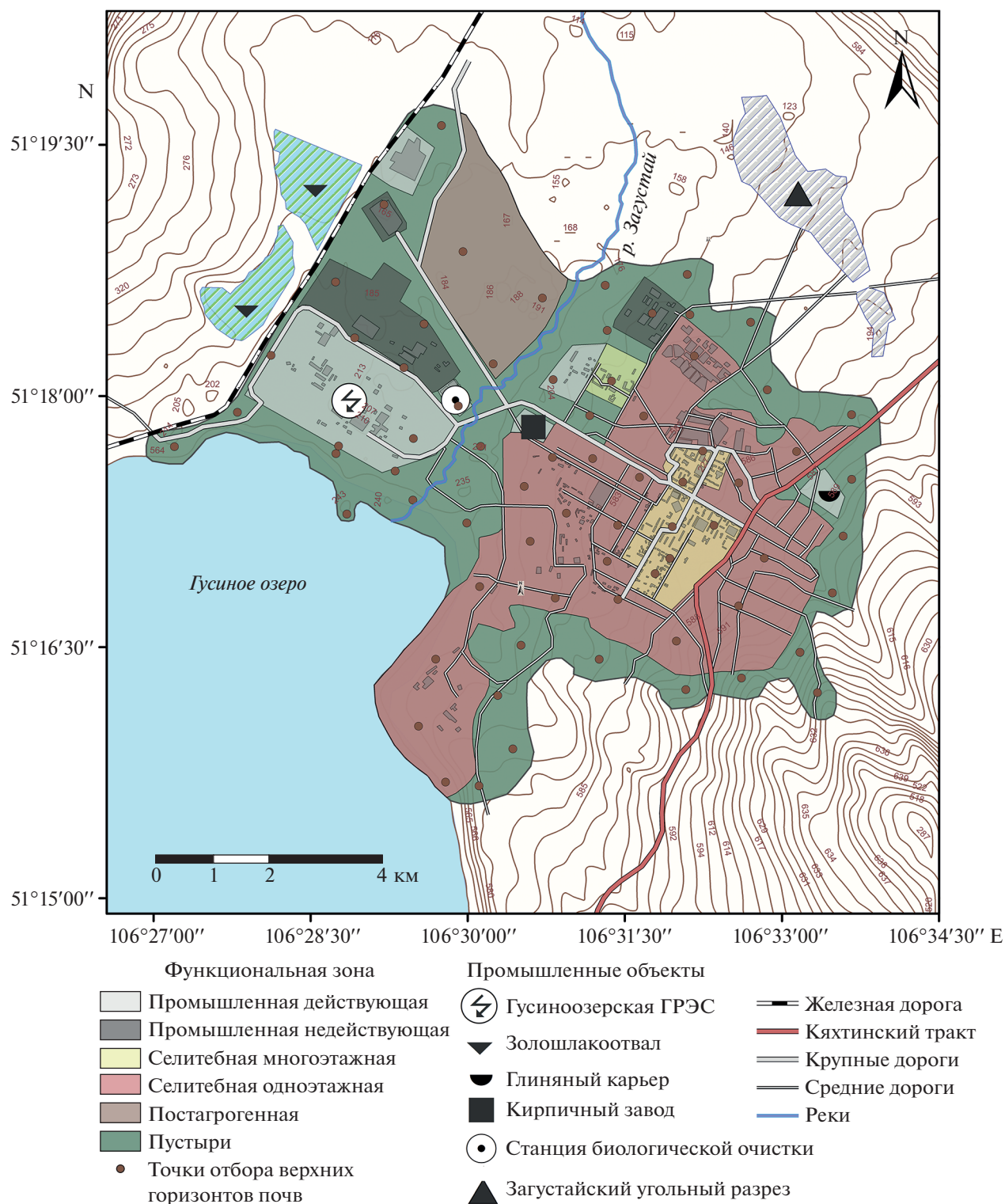


Рис. 1. Функциональное зонирование и точки отбора проб из верхних (0–10 см) горизонтов почв в Гусиноозерске.

В пределах данной зоны опробованы агро-каштановые почвы с пахотным горизонтом (Terric Kastanozems). Пустыри — это заброшенные земли, которые не используются в хозяйственной дея-

тельности, в функциональной структуре города они занимают наибольшую площадь, на территории представлены естественные ненарушенные каштановые почвы (Haplic Kastanozems (Loamic)),

аллювиальные дерново-луговые (Gleyic Fluvisols) и аллювиально-болотные почвы (Fluvic Gleysols) поймы р. Загустай.

Материалы и методы исследования. Летом 2019 г. в Гусиноозерске из верхнего (0–10 см) горизонта отобрано 72 смешанные (в трех повторностях) пробы почв по сетке с шагом 500–600 м [24]. Фоновые каштановые супесчаные почвы (Haplic Kastanozems (Arenic)) (7 образцов) опробованы в 2–2.5 км к западу и северо-западу от города на слабонаклонном участке предгорной сухостепной денудационной равнины. Администрацией Гусиноозерской ГРЭС предоставлены образцы угля и зола 6-го энергоблока.

Физико-химические свойства почв определяли в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ: рН водной вытяжки – потенциометрическим методом, удельную электропроводность – кондуктометрическим методом, гранулометрический состав – на лазерном гранулометре Fritsch (Германия), содержание органического углерода ($C_{орг}$) – методом Тюрина с титриметрическим окончанием. Фракцию PM_{10} почв выделяли методом центрифугирования. Валовое содержание ТММ в пробах почв, угля и золы определяли масс-спектральными и атомно-эмиссионными методами с индуктивно-связанной плазмой в сертифицированной лаборатории ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского. Для подробного анализа выбрано 14 элементов: Zn, As, Cd, Pb (I класс опасности), Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo (II класс), V, W, Sr (III класс), а также Bi.

Особенности микроэлементного состава углей и золы Гусиноозерской ГРЭС выявляли путем сравнения с мировыми кларками углей K_u и золы K_z и расчета кларков концентрации

$$KK_u = C_u/K_u \text{ и } KK_z = C_z/K_z,$$

где C_u , C_z – содержание ТММ в углях и золе соответственно [20]. Коэффициент выноса ТММ в атмосферу при сжигании угля вычисляли как

$$K_{атм} = C_t/C_p,$$

где C_t – теоретическое содержание элемента в золе, мг/кг, которое рассчитывали по формуле $C_t = C_u \cdot 3/100$, 3 – зольность, %, C_p – реальное содержание элемента в золе, мг/кг.

Содержание ТММ в фоновых почвах C_f сравнивали с кларками K_1 верхней части континентальной коры [12], а также с региональным средним значением K_2 для Центральной Бурятии [1]: вычисляли кларки концентрации $KK = C_f/K_1(2)$ при $C_f \geq K_1(2)$ или рассеяния $KP = K_1(2)/C_f$ при $C_f < K_1(2)$. Интенсивность накопления ТММ в городских почвах и фракции PM_{10} разных функциональных зон оценивали с помощью коэффи-

циентов концентрации относительно фоновых почв:

$$K_c = C/C_f \text{ при } C_i \geq C_f$$

или рассеяния

$$K_p = C_f/C_i \text{ при } C_i < C_f,$$

где C_i , C_f – содержание ТММ в городских и фоновых почвах в целом или фракции PM_{10} , мг/кг. Общее загрязнение почв ТММ определяли по суммарному показателю загрязнения

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где n – число химических элементов с $K_c > 1.0$. Показатель Z_c имеет 5 градаций: <16 – низкое, неопасное, 16–32 – среднее, умеренно опасное, 32–64 – высокое, опасное, 64–128 – очень высокое, очень опасное, >128 – максимальное, чрезвычайно опасное загрязнение [14]. Степень экологической опасности ТММ в почвах оценивали путем расчета коэффициента экологической опасности

$$K_o = C_i/ПДК_i,$$

где $ПДК_i$ – предельно допустимая (или ориентировочно допустимая, ОДК) концентрация i -го загрязняющего вещества, мг/кг (СанПиН 1.2.3685-21). Взяты значения ПДК для V, Sb и ОДК As, Cd, Ni, Pb, Cu, Zn в суглинистых нейтральных почвах с $pH > 5.5$.

Факторы, влияющие на накопление ТММ в верхних горизонтах почв Гусиноозерска, выявляли с помощью многофакторного регрессионного анализа методом регрессионных деревьев [15] с построением дендрограмм в пакете SPLUS. Дендрограммы строили в зависимости от свойств почв (pH , удельная электропроводность $EC_{1:5}$, содержание физической глины PM_{10} , $C_{орг}$) и функционального назначения территории, которое определяет геохимическую нагрузку и специфику загрязнения каждой функциональной зоны. Основные источники поллютантов и их вклад в загрязнение верхних горизонтов почв и фракции PM_{10} определяли путем анализа главных компонент (principal component analysis) в пакете Statistica 12.0. Данный метод позволяет сократить количество факторов, необходимых для интерпретации, путем свертки массивов многомерных данных в несколько линейных комбинаций главных компонент. Почвенно-геохимические карты составляли в пакете ArcGis 10.1 методом интерполяции сплайн.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Источники техногенного воздействия. Загрязнение почвенного покрова Гусиноозерска обусловлено в основном предприятиями топливно-энергетического комплекса, автомобильным и же-

железнодорожным транспортом, складированием коммунально-бытовых отходов, а также отходами и сточными водами очистных сооружений. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Гусиноозерска от стационарных источников в 2020 г. составили 37,2 тыс. т [7]. На юге Гусиноозерска расположен нерекультивируемый угольный отвал, вблизи которого концентрируются многие типоморфные элементы углей. Из-за высокого содержания сульфатной серы в отвале протекает сернокислотное выщелачивание ТММ, приводящее к образованию “оторванных” полиэлементных аномалий на щелочных и сорбционных геохимических барьерах в почвах [11].

Основным топливом на Гусиноозерской ГРЭС являются бурые угли Окино-Ключевского месторождения со средней теплотой сгорания 6800–7200 ккал/кг и зольностью 20–21%. Особенности химического состава Окино-Ключевских углей определяются накоплением в них $\text{Mo}_{2,9}\text{W}_{2,3}\text{Sr}_{2,0}\text{Zn}_{1,9}\text{V}_{1,5}$ (нижние индексы – значения ККу). В золе Гусиноозерской ГРЭС концентрируются V, Sr и Mo, где их содержание в 6,4–9,4 раза больше, чем в угле. По сравнению с кларками Кз зола обогащена $\text{Mo}_{2,6}\text{Sr}_{2,1}\text{V}_{2,0}\text{Cu}_{1,3}\text{Co}_{1,2}$.

При высокотемпературном сжигании угля на ГРЭС происходит испарение металлов, содержащихся в органической части топлива, часть ТММ выбрасывается с дымовыми газами, другая часть концентрируется в субмикронной фракции летучей золы. Мелкие частицы имеют большую удельную площадь, в результате чего содержание поллютантов в золе превышает их содержание в исходном угле [20]. Сравнение фактического и рассчитанного по составу углей с учетом их зольности состава золы показало, что больше половины изучаемых ТММ способны конденсироваться на аэрозолях и улетучиваться с дымовыми газами ГРЭС. Наибольшей летучестью обладают Sb ($K_{\text{атм}} = 13$) и As (9,4).

Воздействие автотранспорта обусловлено эмиссией выхлопных газов и моторного масла, содержащих Pb, Cu, Sr, Fe, Mg, Zn, истиранием шин (Cd, Mn, Zn, Pb, Cr, Cu, Sb), износом тормозных колодок (Cu, Sb, Zn, Pb) и абразией дорожного покрытия (Ag, Zn, As, W, Cr, V, Co) [14]. Отходы и стоки очистных сооружений, как правило, обогащены широким спектром токсичных элементов: Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Zn [24]. Источниками загрязнения почв Zn, Cu, Sn, Ag, Pb Cr являются также свалки бытовых и промышленных отходов, характеризующихся полиэлементным составом загрязнителей [11].

Железнодорожная инфраструктура Гусиноозерска включает участок Восточно-Сибирской железной дороги, используемый для перевозки угля для ГРЭС, железнодорожную станцию Загустай, а также площадки разгрузки и хранения уг-

ля. Загрязняющие вещества попадают в почву с выхлопными газами двигателей тепловозов, при торможении подвижных составов в результате изнашивания бандажа колес при трении о рельс и истирании тормозных колодок [9, 10]. Значительный вклад в загрязнение почв вносит рассыпание перевозимого угля из грузовых вагонов. Выбросы железнодорожного транспорта содержат пыль, сажу, углеводороды и ТММ (Ni, Cr, Cu, Cd, Pb, Sb, Zn) [18].

Таким образом, Гусиноозерская ГРЭС является крупнейшим промышленным объектом, выступающим главным источником загрязнения окружающей среды города. Локальное воздействие оказывают бытовые и промышленные отходы, транспорт, перевозка и хранение угля.

Уровни содержания ТММ в фоновых и городских почвах и их фракции PM_{10} . Геохимическая специализация фоновых почв в районе г. Гусиноозерска определяется повышенным относительно мировых кларков ТММ в верхней части континентальной земной коры содержанием $\text{Cd}_{2,2}\text{Mo}_{1,6}\text{Bi}_{1,3}$ и рассеянием $\text{Cr}^{5,1}\text{Ni}^{4,6}\text{V}^{2,9}\text{Co}^{2,8}\text{Cu}^{2,5}\text{Sr}^{1,9}\text{As}^{1,5}$ (нижние и верхние индексы – величины КК и КР соответственно). В почвенных частицах PM_{10} слабо накапливаются $\text{Cd}_{1,6}\text{Pb}_{1,4}$ и рассеивается большинство элементов – $\text{Ni}^{5,1}\text{Cr}^{4,8}\text{Co}^{4,6}\text{Sr}^{4,5}\text{V}^{4,5}\text{Cu}^{2,3}\text{As}^{2,1}\text{Sb}^{1,6}$. По сравнению с региональным фоном в почвах повышено содержание $\text{Cd}_{2,0}\text{As}_{1,9}\text{Mo}_{1,8}$, фракция PM_{10} обогащена $\text{Cd}_{1,4}\text{Zn}_{1,3}\text{As}_{1,3}$. Концентрации остальных ТММ ниже регионального фона (табл. 1).

В верхних горизонтах городских почв Гусиноозерска относительного местного фона накапливаются $\text{Sr}_{4,1}\text{As}_{2,2}\text{Mo}_{1,9}\text{Cu}_{1,9}\text{Zn}_{1,9}\text{Pb}_{1,7}\text{V}_{1,7}\text{Co}_{1,6}\text{Sb}_{1,6}\text{Ni}_{1,4}\text{W}_{1,3}\text{Cr}_{1,3}$, концентрация Cd равна кларковому значению, а Bi рассеивается. Во фракции PM_{10} городских почв концентрируются $\text{Sr}_{3,9}\text{As}_{2,6}\text{Co}_{2,2}\text{Mo}_{2,2}\text{Sb}_{2,0}\text{V}_{2,0}$. В целом для тонкой фракции характерно более интенсивное накопление As, Co, Mo, Sb, V, Ni и пониженное Pb и Zn.

Наиболее загрязненными ТММ являются почвы всей промышленной зоны и селитебной одноэтажной подзоны. Максимальные значения с $K_c > 3$ наблюдаются у Sr, что связано с воздействием золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС и влиянием железнодорожного транспорта, доставляющего уголь для электростанции (табл. 2). Накопление Pb, Sb и Zn в почвах жилой зоны объясняется воздействием автомобильного транспорта: Sb содержится в тормозной смазке в виде сульфида Sb_2S_3 [34], Zn в виде ZnS и ZnO поступает при истирании шин [22]. Цинк может поступать в почвы с органическими удобрениями [11]. Кроме того, данные поллютанты поступают от стихийных свалок промышленных и бытовых отходов, расположенных на заброшенных жилых участках.

Таблица 1. Содержание ТММ (C_{ϕ}) в фоновых почвах Гусиноозерска по сравнению с региональными средними [1] и глобальными кларками верхней части континентальной земной коры. КК – кларки концентрации, КР – кларки рассеяния

Элемент	Глобальный кларк, мг/кг	Региональный кларк, мг/кг	Фоновые почвы			PM ₁₀ фоновых почв		
			C_{ϕ} , мг/кг	КК/КР глобальные	КК/КР региональные	C_{ϕ} , мг/кг	КК/КР глобальные	КК/КР региональные
Sr	270	300	140	–/1.9	–/2.1	61	4.5	4.9
As	5.6	2	3.8	–/1.5	1.9/–	2.7	2.1	1.3
Co	15	10	5.3	–/2.8	–/1.9	3.3	4.6	3.1
Mo	1.1	1	1.8	1.6/–	1.8/–	1.1	1	1.1
Sb	0.8	–	0.7	–/1.2	–	0.51	1.6	–
V	106	60	36	–/2.9	–/1.7	24	4.5	2.5
Cu	27	15	11	–/2.5	–/1.4	12	2.3	1.3
Ni	50	20	10.8	–/4.6	–/1.9	9.8	5.1	2
Cr	92	40	18	–/5.1	–/2.2	19	4.8	2.1
W	2.1	–	2.5	1.2/–	–	2.3	1.1	–
Zn	75	70	62	1.2/–	–/1.1	91	1.2	1.3
Bi	0.2	–	0.3	1.3/–	–	0.19	1.2	–
Cd	0.1	0.1	0.2	2.2/–	2.0/–	0.14	1.6	1.4
Pb	17	20	18	1.1/–	1.1	24	1.4	1.2

Примечание. Использовались кларки элементов следующих авторов, рекомендованных в [12]: Be, Cr, Ni, Zn, Pb, Sr, Sb, As – по [8], V, Cu, Co, Bi – по [31], Mo, Ag, Cd – по [40].

Таблица 2. Среднее содержание ТММ в почвах функциональных зон г. Гусиноозерска, мг/кг

Объект и функциональная зона		As	Pb	Bi	W	Sb	Cd	Mo	Sr	Co	Ni	Cu	Zn	V	Cr
Почвы в целом	Промышленная действующая	10	31	0.31	4.5	1.2	0.17	3.9	502	9.8	20	25	113	65	28
	Промышленная недействующая	9.1	34	0.25	3.6	1.0	0.17	3.0	456	9.7	18	23	127	74	27
	Селитебная многоэтажная	6.9	32	0.18	2.4	0.88	0.20	1.7	416	7.2	12	15	111	57	17
	Селитебная одноэтажная	7.3	44	0.22	3.2	1.6	0.30	3.3	474	8.1	14	24	136	60	23
	Постагrogenная	6.1	20	0.22	2.4	0.67	0.16	2.5	675	6.4	12	13	64	45	19
	Пустыри	8.8	26	0.24	3.5	0.92	0.14	3.9	675	8.4	15	19	110	65	25
	В целом по городу	8.2	32	0.2	3.3	1.1	0.20	3.4	568	8.3	15	21	115	62	24
Фракция PM ₁₀ почв	Промышленная действующая	8.8	29	0.28	4.2	1.02	0.13	2.5	206	9.0	21	30	156	62	40
	Промышленная недействующая	8.5	23	0.28	4.3	0.91	0.11	1.6	143	8.3	18	21	122	69	35
	Селитебная многоэтажная	6.6	17	0.15	2.9	0.68	0.14	0.9	114	6.9	14	19	126	44	26
	Селитебная одноэтажная	7.2	26	0.18	3.9	1.79	0.21	2.8	197	8.3	18	25	151	48	33
	Постагrogenная	3.0	9	0.14	2.1	0.37	0.08	0.8	178	4.2	10	12	59	35	21
	Пустыри	7.0	16	0.19	3.1	0.66	0.09	2.8	370	6.6	14	22	133	47	27
	В целом по городу	7.0	20	0.19	3.4	1.0	0.14	2.3	239	7.2	16	22	132	49	30

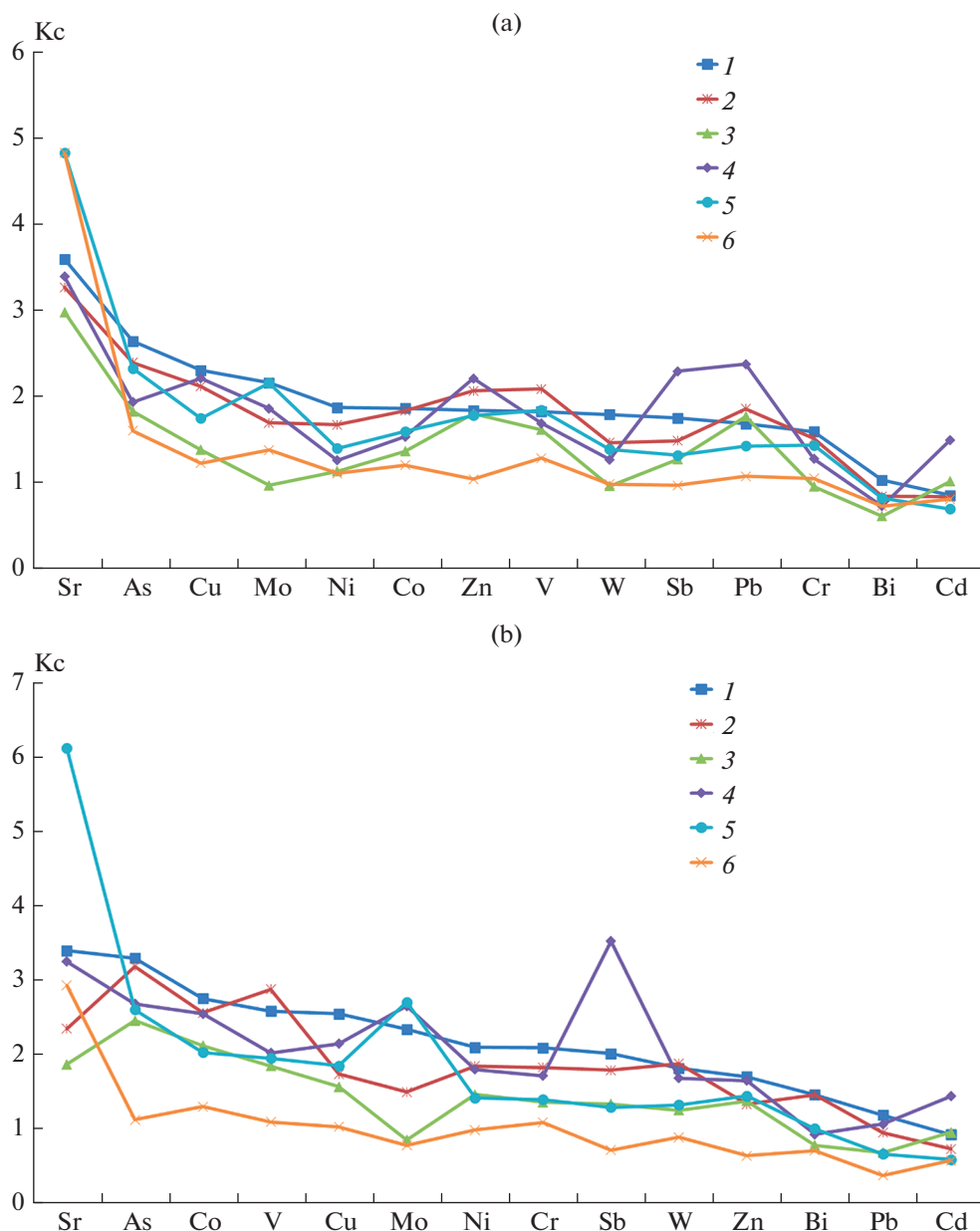


Рис. 2. Геохимические спектры почв (а) и фракции PM_{10} почв (б) в функциональных зонах Гусиноозерска: 1 – промышленной действующей, 2 – промышленной недействующей, 3 – селитебной многоэтажной, 4 – селитебной одноэтажной, 5 – пустырях, 6 – постагрогенной.

Фракция PM_{10} почв наиболее загрязнена $Sr_{3.4}As_{3.3}Co_{2.8}V_{2.6}Cu_{2.5}Mo_{2.3}Ni_{2.1}Cr_{2.1}$ в промышленной действующей подзоне, что обусловлено осаждением тонкодисперсной золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС, угольной пыли, поступающей с площадки, где разгружается уголь из вагонов, и из открытого угольного хранилища на территории электростанции. Источниками Cu и Cr в почве являются частицы, образующиеся при истирании шин и тормозных колодок, около 60–85% которых имеют размер <10 мкм [42]. Наименьший уровень загрязнения характерен для почв в целом

и для фракции PM_{10} постагрогенной зоны, где накапливается лишь Sr, содержащийся в виде примеси в фосфорных удобрениях (рис. 2).

Экологическая опасность загрязнения почв ТММ. Наибольшую экологическую опасность для почв Гусиноозерска представляет As, превышение норматива которого обнаружено в 15% исследуемых проб со средним $Ko = 1.6$. Загрязнение почвенного покрова Zn обнаружено лишь на 2%, а Sb и Pb – на 1% территории. Во фракции PM_{10} городских почв концентрация As превысила нор-

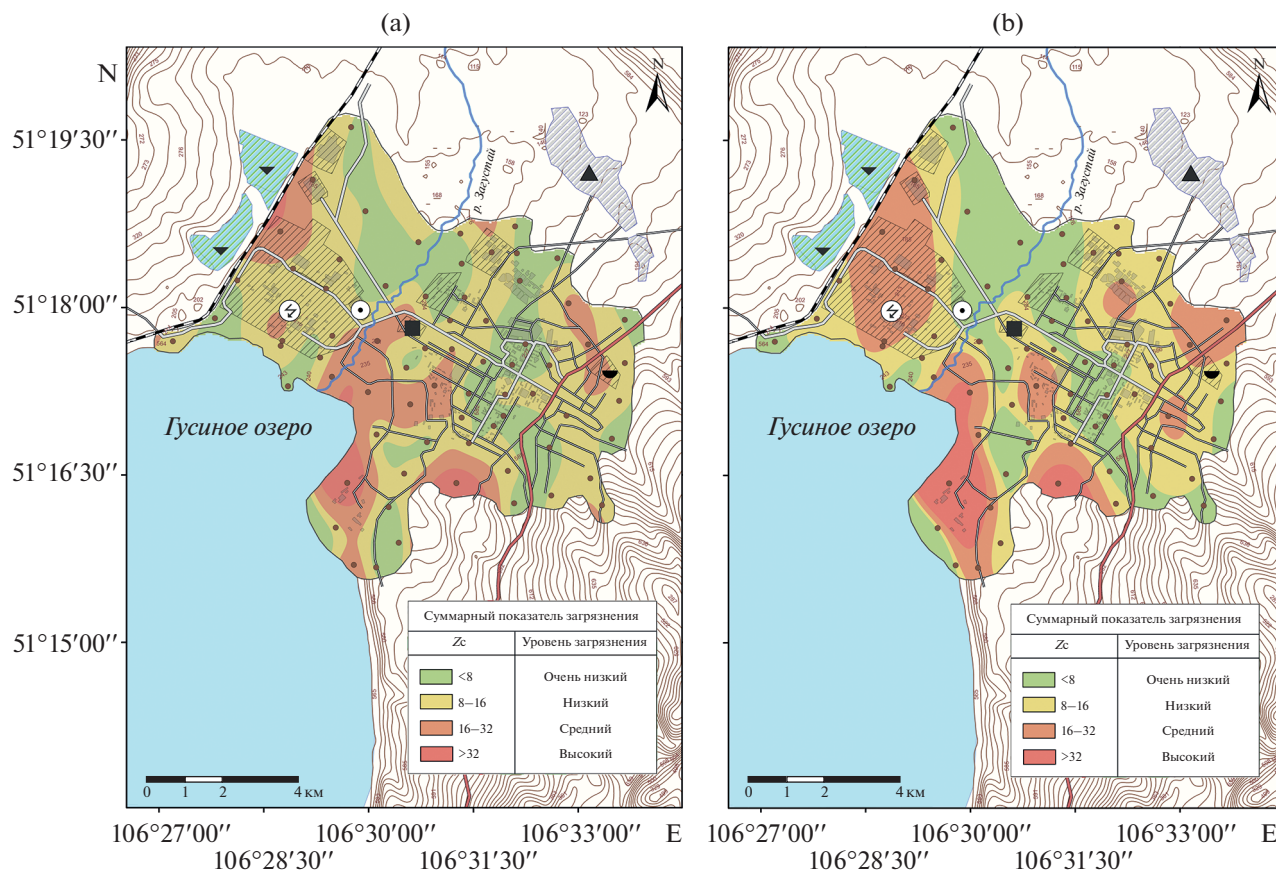


Рис. 3. Распределение суммарного показателя загрязнения верхних горизонтов почв (а) и фракции PM_{10} почв (б) Гусиноозерска.

матив практически повсеместно (90% проб) с максимальным значением $K_0 = 4.5$ в промышленной действующей подзоне. На 8% территории превышены ПДК Zn, на 2% – ОДК Sb.

Средний суммарный показатель загрязнения почв Гусиноозерска составил $Z_c = 12$, для фракции PM_{10} – $Z_c = 14$, что соответствует низкому уровню загрязнения ($Z_c < 16$). Минимальный уровень загрязнения ($Z_c < 8$) почв в целом и фракции PM_{10} выявлен на 28 и 30% территории соответственно, это почти вся постагрогенная зона, часть селитебной одноэтажной подзоны и зоны пустырей. Большая часть городской территории (57% для почв в целом и 47% для фракции PM_{10}) характеризуется низким уровнем загрязнения ($Z_c = 8–16$) – это почвы всей промышленной недействующей подзоны и преобладающая часть частного сектора и зоны пустырей. Среднее загрязнение почв ($Z_c = 16–32$) установлено на 13%, а фракции PM_{10} – на 17% территории. Лишь 2 и 6% территории города отличается высоким уровнем загрязнения ($Z_c > 32$) почв и частиц PM_{10} соответственно (рис. 3).

Средние значения суммарного показателя загрязнения ТММ почв в целом уменьшаются в ря-

ду функциональных зон: промышленная действующая ($Z_c = 14$) > селитебная одноэтажная (13) > пустыри (13) > промышленная недействующая (12) > селитебная многоэтажная (11) > постагрогенная (7.8). Для фракции PM_{10} почв порядок функциональных зон в ряду сохраняется, но увеличивается контрастность значений Z_c : промышленная действующая (18) > селитебная одноэтажная (17) > пустыри (15) > промышленная недействующая (14) > селитебная многоэтажная (7.8) > постагрогенная (4.8).

Высокий уровень загрязнения верхних горизонтов почв характерен для полиэлементных геохимических аномалий. Наиболее высокое значение суммарного показателя $Z_c = 48$ зафиксировано в частной жилой застройке на ул. Мичурина, где аккумуляция $Sb_{29}Mo_{17}As_{10}W_{10}Sr_{8.0}Co_{7.0}Cu_{5.8}V_{4.5}Cd_{4.4}Zn_{4.1}Ni_{3.5}Cr_{3.0}$ обусловлена сжиганием бытового мусора и использованием нестандартизированных удобрений. Другая аномалия с $Z_c = 47$ и приоритетными поллютантами $Mo_{25}Cu_{7.1}As_{4.2}Pb_{4.0}W_{3.7}Sr_{2.7}Sb_{2.6}V_{2.3}Cr_{2.1}$ сформировалась вблизи отвала вскрышных бурогоугольных пород на юге города.

Таблица 3. Основные физические и химические свойства верхних (0–10 см) горизонтов почв Гусиноозерска

Функциональная зона (количество проб)	pH	Удельная электропроводность $EC_{1:5}$, мкСм/см	$C_{орг}$, %	Содержание физической глины, %
Промышленная действующая (8)	7.6 (4.5–8.6)	766 (137–990)	2.7 (1.1–4.3)	29 (16–47)
Промышленная недействующая (4)	8.1 (7.7–8.7)	295 (178–411)	3.0 (1.8–4.4)	31 (18–39)
Селитебная многоэтажная (7)	8.4 (8.1–8.7)	257 (112–448)	1.8 (1.0–2.6)	31 (23–48)
Селитебная одноэтажная (19)	8.0 (7.0–9.1)	527 (95–2320)	4.3 (1.1–7.5)	27 (19–39)
Постагрогенная (5)	8.2 (7.0–8.9)	595 (95–906)	3.6 (1.9–5.4)	22 (13–46)
Пустыри (27)	8.2 (6.2–10.4)	671 (58–4880)	2.6 (0.9–6.0)	32 (19–56)
Среднее по городу (79)	8.1 (4.5–10.4)	676 (58–4880)	2.7 (0.9–6.0)	30 (13–56)
Фоновая территория (7)	7.3 (6.7–8.9)	192 (121–292)	2.0 (0.6–3.4)	26 (16–30)

Примечание. Даны средние значения, в скобках – минимальные и максимальные значения.

Локализация геохимических аномалий, сформировавшихся во фракции PM_{10} почв Гусиноозерска, совпадает с аномалиями в почвах в целом, однако они имеют большую контрастность (рис. 3). Максимальный уровень загрязнения фракции PM_{10} почв с $Zc = 33–96$ и аккумуляцией $Sr_{32}Sb_{29}Mo_{17}As_{10}W_{10}Co_{6.5}Cu_{5.9}V_{4.5}Zn_{4.1}Ni_{3.5}Cr_{3.0}$ установлен на участке в частном секторе. Другая аномалия во фракции PM_{10} $Mo_{27}As_{5.2}Cu_{4.4}Sr_{4.4}V_{3.3}W_{3.1}Sb_{2.8}Pb_{2.3}$ с высоким уровнем загрязнения ($Zc = 48$) приурочена к угольному отвалу на юге города. Интенсивное накопление Mo и As связано с осаждением анионогенных элементов на кислом геохимическом барьере при выносе поллютантов из автономного ландшафта со щелочной реакцией среды в днище балки, где pH почв составляет всего 4.5.

Факторы аккумуляции ТММ. Поступающие из атмосферы техногенные ТММ, взаимодействуя с компонентами почв, частично закрепляются, а частично вымываются из почвенного профиля. Степень накопления ТММ зависит от фиксирующей способности почв, которая определяется окислительно-восстановительными и кислотнo-щелочными условиями, гранулометрическим составом, оксидами Fe , Al , Mn .

При нейтральной реакции (pH 7.3) в фоновых почвах верхние горизонты почв Гусиноозерска отличаются слабощелочной реакцией (7.6) в промышленной действующей подзоне, которая становится щелочной (8.4) в селитебной подзоне с многоэтажной застройкой. Удельная электропроводность водной вытяжки $EC_{1:5}$ из городских почв повышена по сравнению с фоновыми условиями, что указывает на засоление верхних горизонтов. Если на фоне $EC_{1:5}$ составляет в среднем 192 мкСм/см, то в городе $EC_{1:5}$ изменяется от 58 до 7920 мкСм/см при среднем значении 676 мкСм/см (табл. 3).

В городе преобладают среднесуглинистые почвы со средним содержанием физической глины около 30%, что несколько больше, чем в фоновых почвах. Наиболее высокое содержание (56%) тонкодисперсной фракции PM_{10} отмечено в почве вблизи глиняного карьера, наименьшее – в постагрогенной зоне (22%). Содержание $C_{орг}$ в верхних горизонтах почв Гусиноозерска практически не отличается от фонового и составляет в среднем 2.7%, варьируя от 0.9 до 6.0% в почвах пустырей. Наибольшее среднее содержание $C_{орг}$ 4.3% выявлено в почвах селитебной одноэтажной подзоны из-за внесения органических удобрений на приусадебных участках и осаждения сажи при сжигании угля.

Эти почвенные свойства учитывали в многомерном регрессионном анализе при определении факторов, контролирующих уровни накопления поллютантов в почвах Гусиноозерска. Среди факторов накопления ТММ учитывали также функциональное назначение той или иной территории (табл. 4).

Как показал анализ дендрограмм, ведущим фактором аккумуляции W , Sb , Co , Ni , V и Cr в почвах Гусиноозерска является содержание оксидов железа, выполняющих роль хемосорбционного барьера в почвах. Так, при увеличении содержания оксидов железа ($Fe_2O_3 > 4.3$) концентрации Co и V возрастают в 1.3–1.4 раза, Cr и Ni в 1.5 раза ($Fe_2O_3 > 5.3$), W в 1.9 раз ($Fe_2O_3 > 5.7$), Sb в 2.6 раз ($Fe_2O_3 > 5.9$).

Мышьяк преимущественно адсорбируется илом и минералами, содержащими оксиды Fe и Mn [19]. В глинистой фракции может сорбироваться 27–90% от валового содержания As . В Гусиноозерске накопление As связано в первую очередь с гранулометрическим составом почв, при содержании тонкой фракции PM_{10} свыше 39.5% концентрация As возрастает почти в 2 раза. Выявлена положительная связь между аккумуля-

Таблица 4. Факторы накопления ТММ и их значимость в почвах Гусиноозерска

Фактор накопления ТММ	As	Pb	Bi	W	Sb	Cd	Mo	Sr	Co	Ni	Cu	Zn	V	Cr
Функциональная зона	4	2		2	2	1	3	4	2	2	2	2		3
Почвенные свойства														
$C_{орг}$		1+				4-	3+				1+			
pH		3+	3-				1-	3+						3-
$EC_{1:5}$	4-		2+	4+	4+	4+		1+	4+		3+	1+	4-	2+
PM_{10}	1+	3+	1+	3+	3+	2- 3-	2-	2-	2+	4+		4+	2+	4+
	3+		3+											
Fe_2O_3	2+			1+	1+				1+	1+			1+	1+
									3+	3+			3+	
MnO						2+	4-		3+	4+		3+	3+	

Примечание. Ранги от 1 до 4 показывают уменьшение значимости фактора: “+” — рост показателя способствует увеличению концентрации элемента, “-” — уменьшению.

цией As и содержанием в почвах оксидов железа — при концентрации $Fe_2O_3 > 5.4\%$ содержание As увеличиваются в 1.6 раза. Отсюда следует, что As аккумулируется в основном на комплексном сорбционно-седиментационном и хемосорбционном геохимическом барьере.

В почвах Гусиноозерска Bi накапливается преимущественно в физической глине. При содержании фракции $PM_{10} > 39.5$ концентрации Bi увеличиваются в 1.5 раза, что обусловлено накоплением поллютанта на сорбционно-седиментационном геохимическом барьере.

Основные компоненты почвы, связывающие Pb и Cu — карбонаты, глинистые минералы, органическое вещество. В почвах Гусиноозерска наибольшее влияние на аккумуляцию поллютантов оказывает $C_{орг}$. Концентрации Pb и Cu увеличиваются в 2.3 и 2.4 раза соответственно при содержании $C_{орг} > 5.7\%$, что связано с наличием биогеохимического органо-минерального барьера в верхних горизонтах почв.

Величина pH является ведущим фактором только для анионогенного Mo, который осаждается при увеличении кислотности среды. Анализ дендрограммы с дифференциацией содержания Mo в зависимости от почвенных свойств (рис. 4а) показал, что в нейтральных и щелочных почвах концентрации Mo уменьшаются в 4.4 раза, что свидетельствует о миграции и выносе поллютанта из верхних горизонтов. При содержании физической глины менее 22% содержание Mo увеличивается, что объясняется преобладанием поллютанта в более крупных фракциях. Третьим по значимости фактором накопления Mo в почвах является содержание $C_{орг}$, при увеличении которого свыше 2.1% концентрация Mo увеличивается на 1.2 мг/кг. Таким образом, Mo аккумулируется в основном на комплексном кислотном и биогеохимическом органо-минеральном барьере, хоро-

шо выраженном при значении $pH < 7.1$ и при содержании органического вещества $> 2.1\%$.

Удельная электропроводность водной вытяжки EC выступает наиболее значимым фактором для Sr и Zn, положительная корреляция халькофильного Zn с $EC_{1:5}$ обусловлена его миграцией преимущественно в виде сульфидов и сульфатов.

Источники некоторых элементов приурочены к отдельным функциональным зонам, вызывая в них формирование техногенных аномалий высокой контрастности. Так, на дендрограмме, показывающей дифференциацию содержания Cd при разных сочетаниях влияющих факторов (рис. 4б), выделяется селитебная одноэтажная зона, в которой концентрации Cd по сравнению с другими зонами увеличиваются в 3 раза. В других функциональных зонах основными факторами выступают содержание MnO, либо PM_{10} . При содержании фракции PM_{10} более 24% и при росте содержания оксидов марганца ($MnO > 0.07$) в почвах концентрация Cd возрастает почти в 1.7–2 раза, что связано с его осаждением на комплексном хемосорбционном и сорбционно-седиментационном геохимическом барьере.

Вклад природных и антропогенных источников в загрязнение городских почв. Основные источники ТММ и их воздействие на верхний горизонт почв и фракцию PM_{10} Гусиноозерска определяли с помощью метода главных компонент. При интерпретации факторов использовали геохимические профили наиболее характерных источников тех или иных поллютантов, описанные в [22, 24, 29, 32, 40].

Для городских почв выявлено три основных фактора, объясняющих в сумме 73% общей дисперсии (рис. 5).

Первый фактор (PC1) составляет около 46% общей дисперсии и включает элементы As, Bi, Co, Ni, V и Cr с наиболее высокими факторными

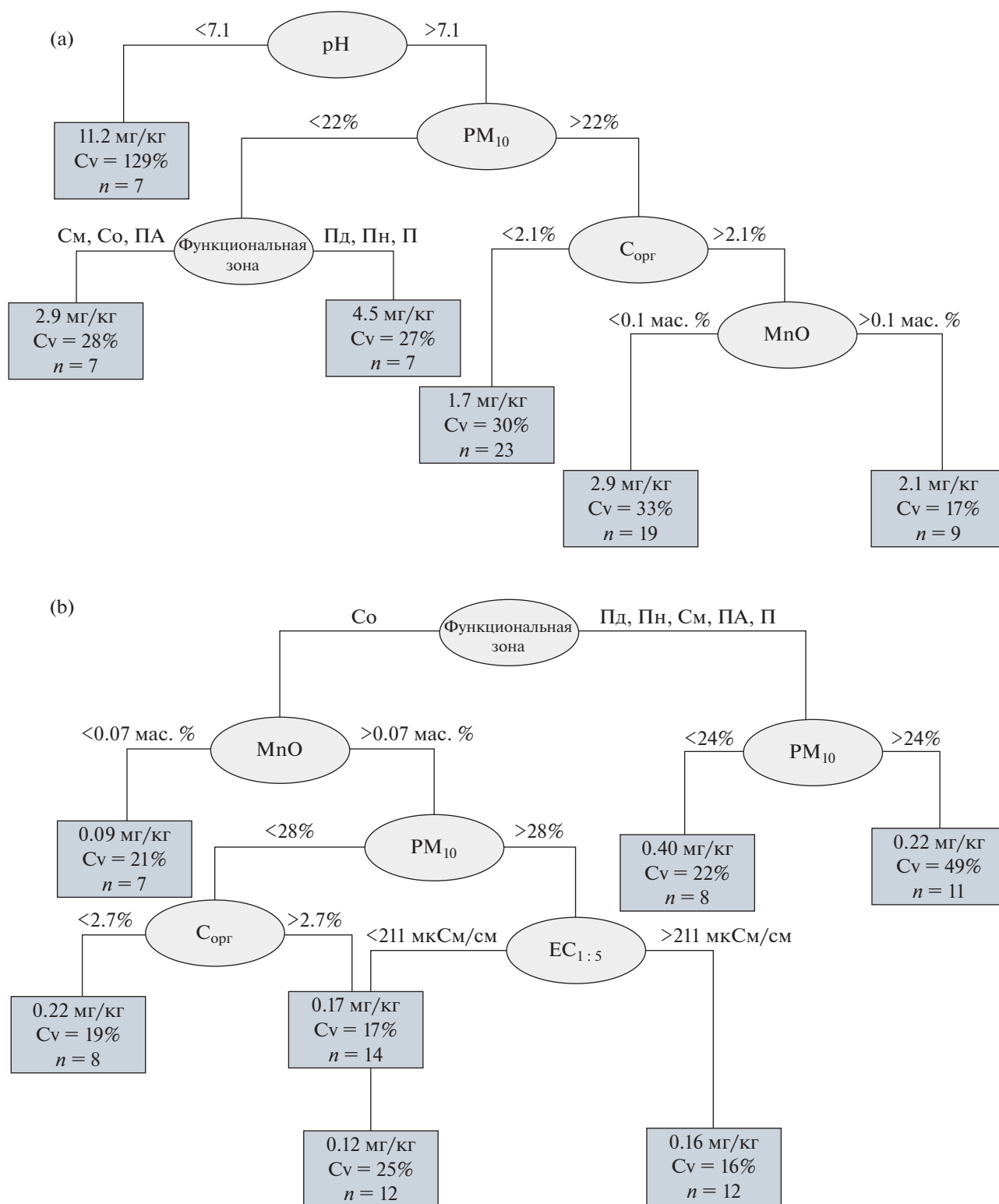


Рис. 4. Факторы накопления (в овалах) Mo (a) и Cd (b) в верхнем горизонте почв Гусиноозерска. Для каждого сочетания факторов приводится среднее содержание ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования n . Функциональные зоны: Пд – промышленная действующая, Пн – промышленная недействующая, См – селитебная многоэтажная, Со – селитебная одноэтажная, ПА – построгоенная, П – пустыри.

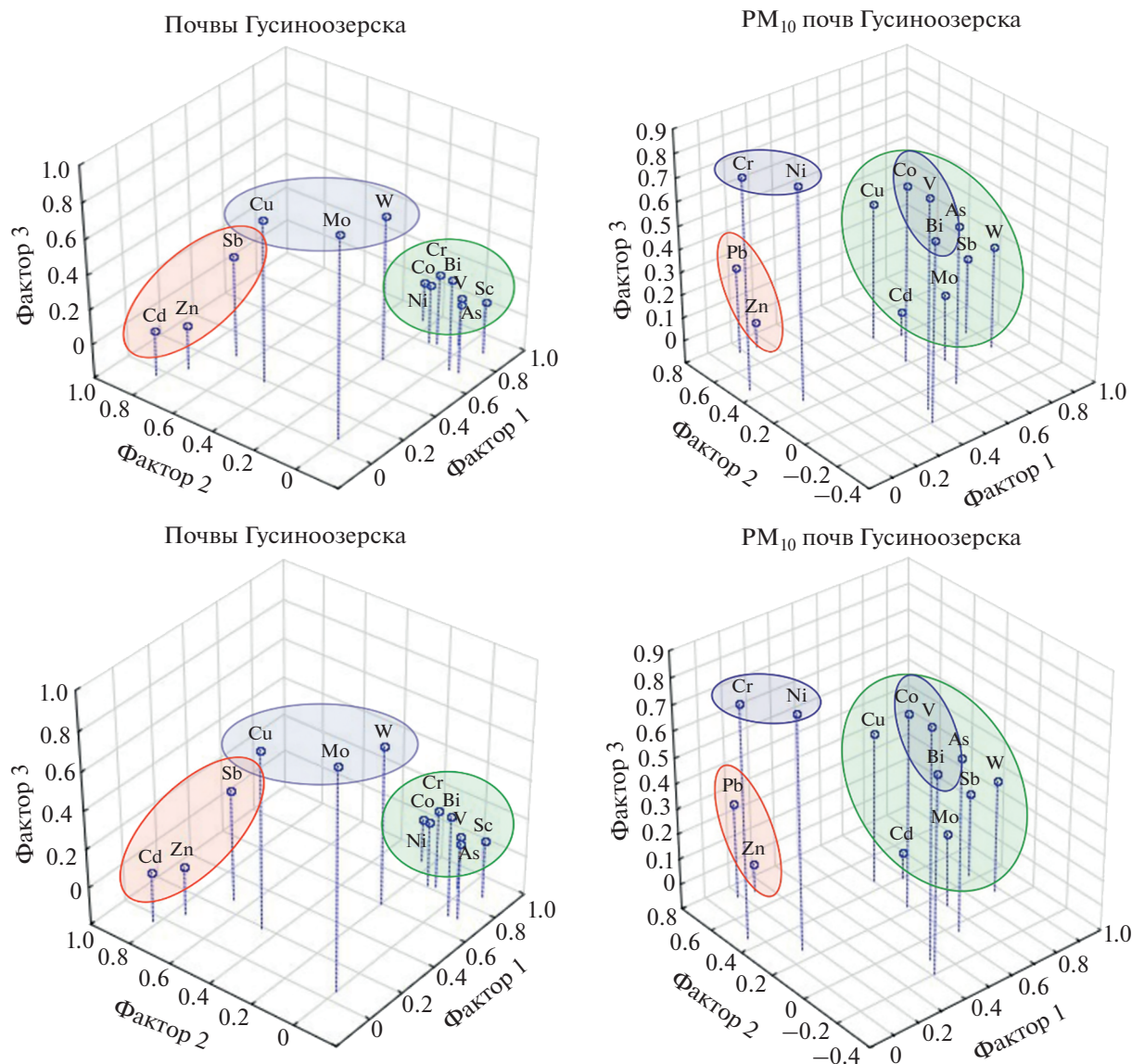


Рис. 5. Факторные нагрузки для концентраций ТММ в почвах и их фракции PM_{10} Гусиноозерска.

нагрузками (0.70–0.93). Этот фактор отражает вклад природно-техногенных и техногенных источников: продуктов разрушения строительных материалов, сжигания угля при печном отоплении и на ГРЭС [41]. Во многих исследованиях, включая [25, 33], указывают в качестве источника Cr, Ni и Co материнские породы. Однако в почвах Гусиноозерска вклад литогенного источника незначителен, эти элементы накапливаются слабо, средние $K_c = 1.3–1.6$.

Второй фактор (PC2), вероятно, характеризует вклад автомобильного транспорта. На PC2 приходится 17% дисперсии, он связан с накоплением Sb, Cd, Pb и Zn, значения факторных нагрузок – 0.66–0.82. Поступление этих ТММ из одного ис-

точника подтверждается высокими положительными коэффициентами корреляции $r = 0.56–0.84$ между их концентрациями.

Вклад *третьего фактора* (PC3) в общую дисперсию составляет 9.3%, он объясняет накопление Mo, Cu и W с факторными нагрузками 0.63–0.95. Этот фактор характеризуется влиянием отвала вскрышных пород на юге Гусиноозерска, а также складирования и сжигания бытового мусора.

Во фракции PM_{10} почв Гусиноозерска также выделяются 3 фактора, объясняющие в сумме 74% общей дисперсии, однако ТММ распределены по компонентам иначе. Первый фактор (PC1) отражает накопление обширного перечня контролируемых им элементов – As, W, Sb, Cd, Mo,

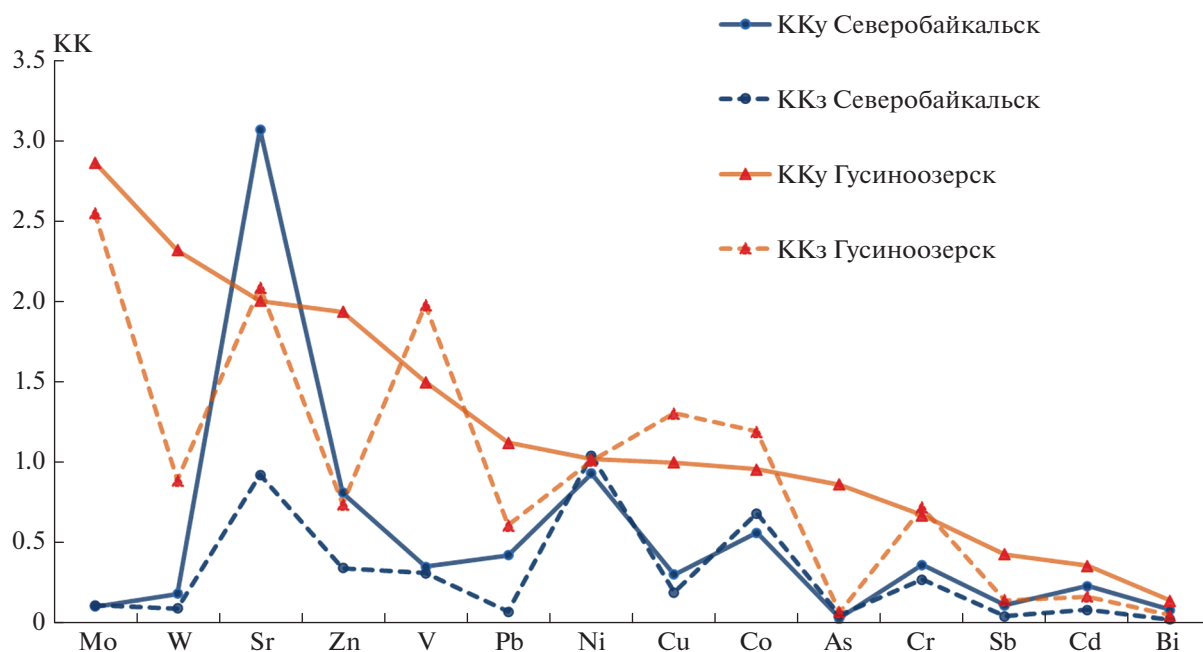


Рис. 6. Кларки концентрации углей и золы Центральной ТЭЦ г. Северобайкальска и Гусиноозерской ГРЭС.

Cu — из различных техногенных источников. PC1 объясняет 54% общей дисперсии, факторные нагрузки — 0.60–0.88. Источником Mo и Cu является отвал вскрышных бурогоугольных пород, между элементами установлена сильная корреляция $r = 0.71$. С дымовыми выбросами Гусиноозерской ГРЭС поступают As, W, Sb ($r = 0.70$ – 0.94), с выбросами автомобильного транспорта — Cd и Sb ($r = 0.68$), источниками Cd являются частицы дорожного полотна, шин и металлических деталей автомобиля, Sb содержится в тормозной смазке [30]. Кроме того, общим источником данных элементов могут быть стихийные свалки коммунально-бытовых отходов.

На второй фактор (PC2) приходится 11% общей дисперсии, он характеризует воздействие автотранспорта. Для Pb и Zn факторные нагрузки составляют 0.71–0.72 при невысоком коэффициенте корреляции $r = 0.39$. Цинк и Pb поступают в окружающую среду в результате истирания шин, тормозных колодок и асфальтового покрытия. Кроме того, Pb в виде $Pb(CH_3CH_2)_4$ использовали в качестве антидетонирующей присадки к моторному топливу [25]. В настоящее время этилированный бензин в России запрещен, загрязнение может иметь реликтовый характер. Вклад третьего фактора (PC3) в общую дисперсию составляет 9.5%, он связан с накоплением Bi, Co, Ni, V, Cr, факторные нагрузки равны 0.59–0.81. Он отражает вклад смешанных (природно-техногенных) и техногенных источников — продуктов разрушения строительных материалов и угольной пыли.

Значение ГРЭС как источника загрязнения почвенного покрова Гусиноозерска становится более ясным при сравнении полученных данных с результатами оценки состояния почв другого города Бурятии — Северобайкальска. Он расположен на северо-восточном берегу оз. Байкал и является крупным транспортным узлом и промышленным центром на Байкало-Амурской магистрали (БАМ). Потребность города в электроэнергии обеспечивает Центральная ТЭЦ и четыре муниципальных котельные, использующие в качестве топлива Канско-Ачинские бурые угли. Они менее зольные (6–12%), чем Окино-Ключевские, сжигаемые на Гусиноозерской ГРЭС, теплотворная способность ниже и составляет 2800–3800 ккал/кг. Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Северобайкальска от стационарных источников в 2019 г. составил 0.314 тыс. т, что почти в 120 раз ниже, чем в Гусиноозерске.

Канско-Ачинские угли по сравнению с мировыми кларками обогащены лишь $Sr_{3.1}$, обладающим высокой углефилностью; содержание остальных ТММ ниже кларковых значений. Зола Центральной ТЭЦ по сравнению со среднемировыми значениями обеднена ТММ, за исключением Ni с $KKz = 1.0$ (рис. 6). Содержание Sr, Zn, Cr, As, Mo, Co, Sb, Bi и Cd в золе Центральной ТЭЦ Северобайкальска ниже, чем в золе Гусиноозерской ГРЭС в 1.3–2.6 раза, V и Cu — в 5.4–5.7 раза, Pb и W — в 6.7–8.7 раза.

На загрязнение почв Северобайкальска ТММ заметное влияние оказывает железнодорожная инфраструктура БАМ, проходящей вблизи бере-

говой линии оз. Байкал [17]. В верхних горизонтах городских почв концентрации большинства ТММ близки к фоновым, для V, Co, Cr, Ni, Mo, Sn, Zn, As, Cd средние значения Кс составляют 1.1–1.2. Максимально относительно местного фона накапливаются $Sb_{2.4}Cu_{1.6}Pb_{1.6}W_{1.4}$, Bi рассеивается. Более интенсивная аккумуляция во фракции PM_{10} по сравнению с почвами в целом характерна для Mo, Sn, Cr, Ni, Co и Bi. Наибольшее превышение над фоном установлено для $Sn_{1.7}Mo_{1.5}Cu_{1.4}Cr_{1.3}$, концентрации остальных ТММ близки к фоновым (Кс = 1.0–1.2), As во фракции PM_{10} рассеивается. Источниками Sb в почвах Северобайкальска могут быть выбросы предприятий по переработке цветных металлов, железнодорожного и автомобильного транспорта [10]. Mo и Cu поступают в почву при сжигании угля в котельных, а также при обработке черных и цветных металлов [19].

Наиболее загрязнены ТММ почвы промышленной и транспортной зон Северобайкальска. Приоритетным поллютантом является Sb (Кс = 3.1–4.2), она поступает при истирании тормозных колодок и металлических частей автотранспорта, при торможении и истирании рельс и ходовой части подвижного состава [34]. Накопление $Pb_{1.9}$ в промышленной зоне связано с работой станций технического обслуживания автомобилей, предприятий, перерабатывающих металлолом [19]. Выбросы предприятий железнодорожной инфраструктуры, включая обслуживание железнодорожных составов и разгрузку угля для котельных, дают высокое загрязнение фракции PM_{10} почв $Sb_{2.3}Cu_{1.9}Pb_{1.8}Co_{1.7}V_{1.6}W_{1.6}Ni_{1.5}$. Наименьшее загрязнение свойственно почвам рекреационной зоны, где накапливается лишь $W_{1.7}$.

Таким образом, объем поступающих в атмосферный воздух Северобайкальска загрязняющих веществ на два порядка меньше по сравнению с Гусиноозерском, что объясняется также более низким содержанием ТММ в сжигаемых Канско-Ачинских углях и золе Центральной ТЭЦ и меньшей мощностью котельных. Почвы в целом и фракция PM_{10} в Гусиноозерске и Северобайкальске имеют близкие спектры накапливаемых элементов, однако в Гусиноозерске аккумуляция ТММ выражена интенсивнее, ГРЭС является основным источником ТММ. В Северобайкальске при незначительных выбросах ТММ Центральной ТЭЦ и котельных загрязнение городских почв в основном обусловлено влиянием БАМ. Следовательно, вклад ТЭС в загрязнение почв ТММ зависит от их мощности, а также от состава бурых углей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными источниками загрязнения почвенного покрова Гусиноозерска являются

транспортировка, хранение и сжигание бурого угля на Гусиноозерской ГРЭС и в частном секторе при отоплении домов. Геохимическая специализация сжигаемых на Гусиноозерской ГРЭС Окино-Ключевских бурых углей определяется обогащением по сравнению с мировыми кларками $Mo_{2.9}W_{2.3}Sr_{2.0}Zn_{1.9}V_{1.5}$, зола ГРЭС обогащена $Mo_{2.6}Sr_{2.1}V_{2.0}Cu_{1.3}Co_{1.2}$. Приоритетными поллютантами верхних горизонтов почв и их фракции PM_{10} являются Sr, As, Co, Mo, Sb, V, при этом в тонкой фракции PM_{10} концентрации большинства этих элементов заметно выше из-за большей удельной поверхности.

Наибольшее загрязнение ТММ почв и фракции PM_{10} Гусиноозерска приурочено к промышленной действующей подзоне, в почвах в целом аккумулируются $Sr_{3.6}As_{2.6}Cu_{2.3}Mo_{2.2}Co_{2.0}Ni_{2.0}$, во фракции PM_{10} $Sr_{3.4}As_{3.3}Co_{2.8}V_{2.6}Cu_{2.5}Mo_{2.3}Ni_{2.1}Cr_{2.1}Sb_{2.0}$, поступающие с выбросами Гусиноозерской ГРЭС, а также в процессе транспортировки и хранения угля. Наибольшую экологическую опасность представляет As, во фракции PM_{10} городских почв по сравнению с почвами в целом его коэффициент экологической опасности Ко и доля загрязненной территории увеличиваются в несколько раз — с 1.6 до 4.5 для Ко и с 15 до 90% проб. Средний суммарный уровень загрязнения городских почв и фракции PM_{10} соответствует низкому уровню с максимальным значением в промышленной действующей подзоне ($Zc = 14–18$). Формирование контрастных полиэлементных аномалий в почвах обусловлено преимущественно локальными факторами — воздействием стихийных свалок, сжиганием бытового мусора и выщелачиванием поллютантов из угольного отвала.

Накопление химических элементов в почвах Гусиноозерска контролируется целым рядом факторов, обуславливающих формирование различных классов геохимических барьеров: хемосорбционного (оксиды Fe — W, Sb, Co, Ni, V, Cr), кислотного (кислотно-основные свойства — Mo), сорбционно-седиментационного (гранулометрический состав — As, Bi), органо-минерального ($C_{орг}$ — Pb, Cu). Удельная электропроводность контролирует содержание Sr и Zn, для Cd ведущим фактором аккумуляции является принадлежность к функциональной зоне.

Ведущими факторами, оказывающими наибольшее влияние на химический состав почв и частиц PM_{10} , являются выбросы при сжигании угля на Гусиноозерской ГРЭС и при печном отоплении (46% для почв в целом и 54% для фракции PM_{10}) и выбросы автомобильного транспорта (17% для почв в целом и 11% для фракции PM_{10}).

Сравнение уровней загрязнения почвенного покрова Гусиноозерска и Северобайкальска показало, что негативное влияние угольной элек-

троэнергетики на окружающую среду зависит от мощности ТЭС и химического состава сжигаемых углей. При сопоставимой мощности ТЭС в Гусиноозерске и Северобайкальске (224.5 и 164 Гкал/ч) выбросы от сжигания угля в последнем на 2 порядка меньше, что обусловлено составом Канско-Ачинских бурых углей. В результате почвы Гусиноозерска в 2.2–3.0 раз сильнее загрязнены Sr и Mo, в 1.3–1.7 раз Sb и As, во фракции PM_{10} в 2.0–3.4 раза выше концентрации Mo, As, Sr и W, тогда как ведущую роль в загрязнении почвенного покрова Северобайкальска играет железнодорожная инфраструктура БАМ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарны директору Гусиноозерской ГРЭС М.Ю. Человечкину за содействие в проведении обследования территории Гусиноозерской ГРЭС и прилегающих участков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые и лабораторные работы выполнены по проекту РФФИ и РГО № 17-29-05055-офи_м, обработка данных – в рамках договора № 8/Д-2021 “Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал”, сравнительный анализ – по Программе развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоголовов В.Ф. Геохимический атлас Улан-Удэ. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1989. 52 с.
2. Битюкова В.Р. Экологический рейтинг регионов России // Ежегодник Русского географического общества / Под ред. Касимова Н.С. М.: Эксмо, 2021. 336 с.
3. Власов Д.В., Кукушкина О.В., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции PM_{10} в Западном округе Москвы // Почвоведение. 2022. № 5. С. 538–555. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050112>
4. Волошин А.Л. Причины и некоторые аспекты настоящего снижения водности рек Западного Забайкалья // Мат-лы IX Междунар. конф. “Реки Сибири и Дальнего Востока”. Улан-Удэ. 2015. С. 124–128.
5. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
6. Голубцов В.А., Рыжов Ю.В., Кобылкин Д.В. Почвообразование и осадконакопление в Селенгинском среднегорье в позднеледниковье и голоцене. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2017. 139 с.
7. Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2020 году”. Иркутск: ИНЦХТ, 2017. 374 с.
8. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
9. Журавлева М.А., Зубрев Н.И., Кокин С.М. Загрязнение полосы отвода // Мир транспорта. 2016. № 3. С. 112–118.
10. Казанцев И.В. Железнодорожный транспорт как источник загрязнения почв тяжелыми металлами // Самарский научный вестник. 2015. № 2. С. 94–96.
11. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
12. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Сер. география. 2015. № 2. С. 7–17.
13. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е. Химический состав дорожной пыли и ее фракции PM_{10} как индикатор загрязнения городской среды // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 10. С. 43–49.
14. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
15. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // Почвоведение. 2015. № 5. С. 536–553.
16. Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Тимофеев И.В. Загрязнение тяжелыми металлами и металлоидами и экологическое состояние почв г. Северобайкальска // Почвоведение. 2022. № 5. С. 571–585. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050045>
17. Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. Федеральная служба государственной статистики. 2021. 110 с.
18. Ратанова М.П. Экологические основы общественного производства. Смоленск: СГУ, 1999. 176 с.
19. Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич Е.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
20. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 655 с.
21. Altikulac A., Turhan S., Kurnaz A., Goren E., Duran C., Hancerliogullari A., Ugur F.A. Assessment of the Enrichment of Heavy Metals in Coal and Its Combustion Residues // ACS Omega. 2022. V. 7. P. 21239–21245. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02308>
22. Alves C.A., Vicente A.M.P., Calvo A.I., Baumgardner D., Amato F., Querol X., Pio C., Gustafsson M. Physical and

- chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres // *Atmos. Environ.* 2020. V. 224. P. 24–35.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117252>
23. *Anaman R., Peng C., Jiang Z., Liu X., Zhou Z., Guo Z., Xiao, X.* Identifying sources and transport routes of heavy metals in soil with different land uses around a smelting site by GIS based PCA and PMF // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 823. P. 153759.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153759>
 24. *Demetriades A., Birke M.* Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting // Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.024>
 25. *Facchinelli A., Sacchi E., Mallen L.* Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils // *Environ. Poll.* 2001. V. 114. P. 313–324.
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00243-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00243-8)
 26. *Fan H., Zhao C., Yang Y.* A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018 // *Atmospheric Environment.* 2020. V. 220. P. 117066.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066>
 27. *Fu B., Liu G., Mian M.M., Sun M., Wu D.* Characteristics and speciation of heavy metals in fly ash and FGD gypsum from Chinese coal-fired power plants // *Fuel.* 2019. V. 251. P. 593–602.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.055>
 28. *Ghosh S.P., Maiti S.K.* Evaluation of heavy metal contamination in roadside deposited sediments and road surface runoff: a case study // *Environmental earth sciences.* 2018. V. 77. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7370-1>
 29. *Gulia S., Nagendra S., Khare M., Khanna I.* Urban air quality management-A review // *Atmospheric Pollution Research.* 2015. V. 6. P. 286–304.
<https://doi.org/10.5094/APR.2015.033>
 30. *Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C.* Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. P. 63–79.
<https://doi.org/10.1021/es300894r>
 31. *Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geol.* 2008. V. 253. P. 205–221.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.010>
 32. *Huang X., Hu J., Qin F., Quan W., Cao R., Fan M., Wu X.* Heavy metal pollution and ecological assessment around the Jinsha Coal-Fired Power Plant (China) // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2017. V. 14. P. 15–23.
<https://doi.org/10.3390/ijerph14121589>
 33. *Kelepertzis E.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece // *Geoderma.* 2014. V. 221. P. 82–90.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.007>
 34. *Limbeck A., Puls C.* Particulate emissions from on-road vehicles // *Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts.* Heidelberg: Springer-Verlag Berlin. 2011. P. 63–76.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12278-1_4
 35. *Lin B., Zhu J.* Changes in urban air quality during urbanization in China // *J. Cleaner Production.* 2018. V. 188. P. 312–321.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.293>
 36. *Meij R., Te Winkel B.* The emissions and environmental impact of PM10 and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD // *Fuel Processing Technology.* 2004. V. 85 (6–7). P. 641–656.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.012>
 37. *Moses E.A., Orok U.B.* Contamination and health risk assessment of suspended particulate matter (SPM) in Uyo, Niger Delta, Nigeria // *J. Scientific Res. Rep.* 2015. P. 276–286.
<https://doi.org/10.9734/JSRR/2015/16296>
 38. *Nan J., Xiaohan L., Shanshan W., Xue Y., Shasha Y., Shiguang D., Shenbo W., Ruiqin Z., Shengli L.* Pollution characterization, source identification, and health risks of atmospheric-particle-bound heavy metals in PM10 and PM2.5 at multiple sites in an emerging megacity in the central region of China // *Aerosol and Air Quality Research.* 2019. V. 19. P. 247–271.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.07.0275>
 39. *Rovira J., Domingo J.L., Schuhmacher M.* Air quality, health impacts and burden of disease due to air pollution (PM10, PM2.5, NO2 and O3): Application of AirQ+ model to the Camp de Tarragona County (Catalonia, Spain) // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 703. P. 135538.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135538>
 40. *Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry.* 2014. P. 1–51.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
 41. *Saha D., Chatterje D., Chakravarty S., Roychowdhury T.* Investigation of environmental-concern trace elements in coal and their combustion residues from thermal power plants in Eastern India // *Natural Resources Research.* 2019. V. 28(4). P. 1505–1520.
<https://doi.org/10.1007/s11053-019-09451-2>
 42. *Sanders P.G., Xu N., Dalka T.M., Maricq M.M.* Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests // *Environ. Sci. Technol.* 2003. V. 37. P. 4060–4069.
<https://doi.org/10.1021/es034145s>
 43. *Savic D., Nisic D., Malic N., Dragosavljevic Z., Medenica D.* Research on power plant ash impact on the quality of soil in Kostolac and Gacko coal basins // *Minerals.* 2018. V. 8. P. 54–67.
<https://doi.org/10.3390/min8020054>
 44. *Truong M.T., Nguyen L.S.P., Hien T.T., Pham T.D.H., Do T.T.L.* Source Apportionment and Risk Estimation of Heavy Metals in PM10 at a Southern Vietnam Megacity // *Aerosol and Air Quality Research.* 2022. V. 22. P. 220094.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.220094>
 45. *Verma C., Madan S., Hussain A.* Heavy metal contamination of groundwater due to fly ash disposal of coal-fired thermal power plant, Parichha, Jhansi, India // *Cogent Eng.* 2016. V. 3. P. 112–125.
<https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1179243>

Ecological and Geochemical State of Soil Cover in Gusinoozersk in the Zone of Influence of Coal Thermal Power Plant

D. G. Sycheva^{1, *} and N. E. Kosheleva¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: l.msu@yandex.ru*

The pollution of the topsoils of the city of Gusinoozersk (Republic of Buryatia) under the influence of emissions from State District Power Plant (SDPP) which used the Okino-Klyuchevskiy brown coal as fuel was studied. The content of 14 elements (Sr, As, Co, Mo, Sb, V, Cu, Ni, Cr, W, Zn, Bi, Cd, Pb) in bulk samples, as well as in the fraction of physical clay (particles with a diameter $<10\ \mu\text{m}$, PM10) and in samples of brown coal and ash from the SDPP. Strontium, As, Co, Mo, Sb, V are the priority pollutants in the soils of Gusinoozersk with higher concentrations of most elements in the PM10 fraction. Soils and the PM10 fraction in the industrial operating subzone are the most polluted with Sr, As, Co, V, Cu, Mo, Ni, Cr, which are contained in the fly ash of the Gusinoozerskaya SDPP. Most of the territory (57% for soils in general and 47% for the PM10 fraction) is characterized by a low level of pollution ($Z_c = 8-16$). Arsenic poses the greatest environmental hazard; in the PM10 fraction, its concentrations exceeded the MPC in 90% of the studied samples. In soils and their PM10 fraction, the leading factors for the accumulation of elements are the content of Fe_2O_3 , organic matter, soil texture, alkaline-acid conditions, and belonging to a functional zone, which determine the formation of various classes of geochemical barriers. The polluting effect of brown coals depends on the content of heavy metals and metalloids in them. Comparison of the chemical composition of the Okino-Klyuchevskii brown coal and ash from the Gusinoozerskaya SDPP and the Kansk-Achinskii coal and ash from the Central Thermal Power Plant of Severobaikalsk showed that the brown coal and ash from Severobaikalsk were slightly enriched in metals and metalloids, which significantly reduced their accumulation in soils.

Keywords: heavy metals, metalloids, urban soils, accumulation factors, brown coals