

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 504.054:504.064

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ
ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА:
СОПРЯЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ОФИЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ

© 2023 г. Т. А. Парамонова^{a, b, *} (ORCID: 0000-0001-8179-8074),
Г. М. Черногаева^{a, c} (ORCID: 0000-0002-9071-3340), Н. Н. Лукьянова^d, М. С. Парамонов^e

^aИнститут глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
ул. Глебовская, 20Б, Москва, 107258 Россия

^bФакультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^cИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

^dНаучно-производственное объединение “Тайфун”, ул. Победы, 4, Обнинск, 249038 Россия

^eБиологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: tparamonova@soil.msu.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 30.06.2023 г.

Принята к публикации 01.07.2023 г.

На основании сопряженного анализа официальных данных Росгидромета по содержанию приоритетных тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni) в почвах 23 городов Приволжского Федерального округа, а также данных Росстата по социально-экономическим показателям муниципальных образований оценены эколого-геохимические характеристики городских почв (Urbic Technosols). С помощью многомерных статистических анализов (кластерного и факторного) были выявлены возможные связи параметров загрязнения почв с урбанистическими особенностями населенных пунктов. Для почв большинства городов региона со среднестатистическими социально-экономическими показателями установлены допустимые уровни накопления Cd, Pb, Zn и Cu, которые по средним значениям концентраций близки к кларкам городских почв России. В малых и средних городах Республики Башкортостан фиксируются превышения ОДК Ni в урбопочвах, что отражает наличие в восточной части Приволжского Федерального округа региональной геохимической аномалии природного и антропогенного характера, однако взаимосвязей никелевого загрязнения с социально-экономическими показателями населенных пунктов не выявляется. Умеренно-опасный уровень комплексного загрязнения урбопочв с доминирующим накоплением Cd и существенно меньшими коэффициентами концентрации других тяжелых металлов (города Белебей, Давлеканово, Дзержинск) не обнаруживает корреляций с демографическими показателями населенных пунктов. При более сложном профиле загрязнения урбопочв (Cd–Zn в Пензе или Cu–Cd–Zn в Медногорске) отмечаются меньшие значения общего коэффициента рождаемости и большие – коэффициента смертности населения (по сравнению со среднерегиональными показателями). На примере городов Приволжского Федерального округа показаны разнонаправленность градиентов увеличения концентраций в почвах Cd, Pb, Zn, Cu, а также суммарного показателя загрязнения почв Zc с индексами естественного прироста населения при отсутствии на ординационной диаграмме заметной связи эколого-геохимических характеристик почв с возрастом города, численностью и плотностью населения, плотностью уличной автодорожной сети.

Ключевые слова: загрязнение почв, урбопочвы (Urbic Technosols), эколого-геохимическая оценка, кластерный анализ, метод главных компонент

DOI: 10.31857/S0032180X23600300, **EDN:** MGZLIZ

ВВЕДЕНИЕ

В индустриальном и постиндустриальном обществе геохимической сущностью процесса техногенеза является глобальная металлизация биосферы, в которой с каждым годом все более заметную роль играют тяжелые металлы, в том числе

обладающие экотоксическими свойствами [14]. Главной депонирующей средой для тяжелых металлов в наземных ландшафтах служат почвы, а наиболее интенсивные и комплексные техногенные геохимические аномалии, как правило, формируются в почвах урбанизированных тер-

риторий, где сконцентрированы такие источники загрязнения, как промышленное производство, теплоэнергетика, транспорт, коммунальное хозяйство и др. [14, 24]. При этом благодаря прочной, в том числе необменной, сорбции многих тяжелых металлов минеральными и органическими компонентами мелкозема, ореолы техногенного загрязнения почв сохраняются в течение очень длительного времени и могут обнаруживаться спустя много лет после ликвидации источника поступления экотоксикантов в окружающую среду [25], создавая так называемый “накопленный вред” и высокие экологические риски для населения. Степень загрязнения почв тяжелыми металлами зависит как от природно-климатических особенностей местности, так и от социально-экономической и планировочной специфики городских поселений, включая исторический аспект их образования и региональную специфику урбанистики [20].

Одним из наиболее типичных по показателям урбанизации и промышленности регионов России является Приволжский федеральный округ (ФО), доля городского населения в котором составляет 72.3% при средних показателях для РФ 74.7%, а общий валовый региональный продукт достигает $\approx 15\%$ от общероссийского показателя [18]. Производственная специализация Приволжского ФО ориентирована на топливно-энергетический комплекс, химическую и нефтехимическую промышленность, машиностроение и металлообработку, легкую и пищевую промышленность [23]. В настоящее время в Приволжском ФО насчитывается 200 городов, а с учетом поселков городского типа их численность достигает 451 [17]. Более чем в 20 из них с середины прошлого века силами Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) проводится мониторинг среднего и максимального уровней накопления в почвах токсикантов промышленного происхождения, в том числе регулярный контроль уровней накопления тяжелых металлов.

Минерально-сырьевая база региона занимает заметное место в структуре разведанных запасов черных, цветных и редкоземельных металлов России. В частности, на территории республики Башкортостан и Оренбургской области расположено: 30 коренных медно-колчеданных и медно-кобальтовых месторождений, добыча Cu составляет $\approx 24\%$ от добычи в РФ; 32 месторождения Zn, ассоциированного с медно-колчеданными рудами, добыча которого составляет $\approx 22\%$ от добычи в РФ; 6 месторождений силикатного Ni, балансовые запасы металла в которых составляют $\approx 6\%$ от российских, однако добыча никелевых силикатных руд с 2013 г. приостановлена вследствие низкой рентабельности; попутные рудопроявления Cd встречаются на медных и цинковых место-

рождениях Приволжского ФО [5]. Вместе с тем Приволжский ФО занимает последнее место среди регионов по запасам и добыче свинцовых руд. Таким образом, для восточной части региона характерна халькофильно-сидерофильная геохимическая специализация, которая определяет относительное повышение в покровных отложениях и, соответственно, почвах региональных фоновых концентраций ряда тяжелых металлов.

При этом вследствие большой протяженности территории Приволжского ФО в широтном и меридиональном направлениях, а также благодаря длительной истории ее освоения человеком посты мониторинга состояния почв Росгидромета охватывают значительное разнообразие природно-географических условий местности и урбанистических особенностей населенных пунктов (табл. 1). В наблюдательную сеть входят: а) древние города, образовавшиеся в основном в периоды формирования централизованного Московского государства и Российской империи как укрепленные пункты-крепости, многие из которых в настоящее время превратились в города-миллионеры (Казань, Нижний Новгород, Самара, Уфа) или крупные города (Оренбург, Орск, Пенза), тогда как другие обладают меньшей численностью населения (Арзамас, Бирск); б) малые, средние и большие города, основанные в XVIII в. как транспортные узлы (Давлеканово, Дзержинск (бывш. Черное), Мелеуз, Стерлитамак) или центры добычи и переработки металлических руд (Белебей, Благовещенск); в) преимущественно средние города советского периода с доминирующей нефтехимической (Кстово, Новочебоксарск, Октябрьский, Салават), нефте- и угледобывающей (Ишимбай, Кумертау) или металлургической (Медногорск) промышленной специализацией. При этом согласно Распоряжению Правительства РФ от 29 июля 2014 г. № 1398-р “Об утверждении перечня монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации (моногородов)” (ред. от 21.01.2020), четыре поста мониторинга приурочены к моногородам, среди которых Белебей и Кумертау относятся к категории населенных пунктов с наиболее сложным социально-экономическим положением – в том числе создающимся за счет высоких экологических рисков для населения (в Медногорске имеются риски ухудшения социально-экономических условий, и только Благовещенск характеризуется стабильной социально-экономической ситуацией). Для улучшения условий жизни населения в городах Белебей, Кумертау и Благовещенск в 2016–2019 гг. были приняты Постановления Правительства РФ по отнесению их к территориям опережающего развития с особыми условиями для организации несырьевого производства, способствующими привлечению инвестиций и обеспечению ускоренного социально-экономического развития

Таблица 1. Природно-географическая и социально-экономическая характеристика городов Приволжского ФО, входящих в наблюдательную сеть Росгидромета

Субъект РФ	Город	Природная зона: зональные почвы ^a	Год основания поселения	Численность населения, тыс. чел. ^b (категория города) ^b	Плотность населения, тыс. чел.	Плотность автодорожной сети, км/км ²	Количество объектов, имеющих стационарные источники выбросов ^г	Объем выброшенных в атмосферный воздух загрязняющих веществ от стационарных источников, тыс. т/год ^г	Объем выброшенных в атмосферный воздух твердых веществ, тыс. т/год ^г	Общий коэффициент рождаемости, чел./млн чел.	Общий коэффициент смертности, чел./млн чел.	
Республика Башкортостан	<i>Белебей</i> ^е	Степь: черноземы выщелоченные (Luvic Chernozems)	1757	59.2 (с)	1345.2	215.0	н.д.	н.д.	н.д.	7.3	15.1	
	Бирск	Лесостепь: темно-серые лесные (Luvic Retic Greyzem Phaeozem)	1663	48.4 (м)	691.9	233.7	24	н.д.	н.д.	8.3	13.9	
	<i>Благовещенск</i>	Лесостепь: серые лесные (Luvic Phaeozems)	1756	34.8 (м)	537.8	136.6	н.д.	н.д.	н.д.	10.7	14.0	
	Давлеканово	Степь: черноземы остаточно-карбонатные (Haplic Chernozems)	1765	23.4 (м)	570.7	125.3	н.д.	н.д.	н.д.	10.1	18.9	
	Ишимбай	Степь: черноземы типичные (Haplic Chernozems)	1932	64.4 (с)	622.3	298.4	н.д.	н.д.	н.д.	9.4	17.9	
	<i>Кумертау</i>	Лесостепь: серые лесные (Eutric Retisol)	1947	59.5 (с)	350.7	192.3	19	13.05	6.73	9.0	15.8	
	Мелеуз	Степь: черноземы типичные (Haplic Chernozems)	1786	56.7 (с)	1581.4	182.0	н.д.	н.д.	н.д.	8.7	14.6	
	Октябрьский	Степь: черноземы типичные (Haplic Chernozems)	1937	114.1 (б)	1154.5	317.0	36	1.93	0.22	9.6	14.5	
	Салават	Степь: черноземы типичные (Haplic Chernozems)	1948	150.5 (б)	1416.7	126.0	44	43.65	1.25	7.5	16.5	
	Стерлитамак	Степь: черноземы выщелоченные (Luvic Chernozems)	1735	276.4 (к)	2505.8	324.4	46	39.22	1.97	9.1	14.5	
	Туймазы	Степь: черноземы типичные (Haplic Chernozems)	1912	68.2 (с)	1609.6	191.4	н.д.	н.д.	н.д.	11.1	14.1	
	<i>Уфа</i> ^ж	Степь: черноземы выщелоченные (Luvic Chernozems)	1574	1128.8 (К)	1594.3	1760.4	201	265.19	1.84	10	14.8	
	Республики Татарстан	<u>Казань</u>	Ташжно-лесная: дерново-подзолистые (Eutric Albic Retisol)	1004–1005	1257.4 (К)	2047.3	1965.0	239	32.47	1.02	12.6	14.5

Таблица 1. Окончание

Субъект РФ	Город	Природная зона: зональные почвы ^а	Год основания поселения	Численность населения, тыс. чел. ^б (категория города) ^в	Плотность населения, тыс. чел.	Плотность автомобильной сети, км/км ²	Количество объектов, имеющих стационарные источники выбросов ^г	Объем выброшенных в атмосферу воздух загрязняющих веществ от стационарных источников, тыс. т/год ^д	Объем выброшенных в атмосферу воздух твердых веществ, тыс. т/год ^е	Общий коэффициент рождаемости, чел./млн чел.	Общий коэффициент смертности, чел./млн чел.
Чувашская республика	Новочебоксарск	Лесостепь: светло-серые лесные (Luvisols)	1960	127.2 (б)	2487.8	100.1	36	4.06	0.52	9.1	15.0
Нижегородская область	Арзамас	Таежно-лесная: дерново-подзолистые иллювиально-железистые (Retic Albic Podzol)	1578	104.0 (б)	3029.7	206.0	31	н.д.	н.д.	8.3	15.7
	Держинск (бывш. Черное)	Таежно-лесная: дерново-подзолистые иллювиально-железистые (Retic Albic Podzol)	1606	229.0 (б)	543.3	220.0	67	н.д.	н.д.	7.3	20.8
	Кстово	Широколиственные леса: светло-серые лесные (Luvisols)	1957	67.8 (с)	1182.6	107.4	23	н.д.	н.д.	9.4	19.3
	Нижний Новгород	Лесостепь: светло-серые лесные (Luvisols)	1221	1252.2 (к)	3049.2	1636.9	223	н.д.	н.д.	8.8	19.1
Оренбургская область	Медногорск	Степь: черноземы остаточно-карбонатные (Haplic Chernozems и Calcic Phaeozems)	1933	24.6 (м)	69.7	133.2	8	7.32	н.д.	7.0	24.9
	Оренбург	Степь: черноземы обыкновенные (Haplic Chernozems)	1743	572.2 (к)	624.0	1017.4	94	16.24	0.45	9.7	16.4
	Орск	Степь: черноземы южные (Haplic Chernozems)	1735	226.5 (к)	158.8	619.6	49	16.25	н.д.	8.0	20.2
Пензенская область	Пенза	Степь: черноземы остаточно-карбонатные (Haplic Chernozems и Calcic Phaeozems)	1663	520.3 (к)	1791.8	713.0	112	7.72	0.76	7.9	18.3
Самарская область	Самара	Степь: черноземы обыкновенные (Haplic Chernozems)	1586	1156.7 (к)	2134.3	4053.6	203	26.94	1.34	9.5	19.1

^а По [18].^б По [22].^в По СП 42.13330.2016 "Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений": К – крупнейшие города (>1000 тыс. чел.), к – крупные города (250–1000 тыс. чел.), б – большие города (100–250 тыс. чел.), с – средние города (50–100 тыс. чел.), м – малые города (<50 тыс. чел.).^г По [2].^д По [18].^е Здесь и далее курсивом отмечены моногорода.^ж Здесь и далее республиканские и областные центры отмечены подчеркиванием.

(Федеральный закон “О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации” от 29.12.2014 N 473-ФЗ).

Целью настоящего исследования был сопряженный анализ официальных данных Росгидромета по текущим уровням загрязненности городских почв Приволжского ФО и сведений Федеральной службы государственной статистики (Росстат) по социально-экономическим характеристикам городов.

Именно на основании получаемых официальных данных органы исполнительной власти РФ принимают управленческие решения и разрабатывают программы комплексного развития территорий, включая меры по обеспечению экологической безопасности, в том числе по охране и рекультивации почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных использовали официальные сведения по эколого-геохимической характеристике городских почв Приволжского ФО, представленные в ежегодниках “Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения” за период 2017–2021 гг. по [9–13], а также агрегированные в базе данных НПО “Тайфун” (головная организация Росгидромета по мониторингу состояния и загрязнения почв тяжелыми металлами и пестицидами) показатели содержания тяжелых металлов в почвах городов Поволжья. Согласно разработанному Росгидрометом регламенту мониторинга, методической основой проведения исследований является руководящий документ (РД) 52.18.718-2008 “Организация и порядок проведения наблюдений за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения”, основанный, в свою очередь, на ГОСТ 17.4.3.01-2017 “Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб”. На территориях городов пробные площадки размерами от 10 × 10 до 20 × 20 м² (в зависимости от планировочных особенностей территории) располагаются по равномерной сетке с расстояниями между центрами ближайших пробных площадок примерно 1 км. На каждой пробной площадке методом конверта отбирается объединенная проба почвы, состоящая не менее чем из 5 индивидуальных поверхностных образцов, взятых с глубины 0–5 см (возможен также отбор дополнительной пробы с глубины 5–20 см). Анализ содержания тяжелых металлов в городских почвах проводится силами территориальных подразделений Росгидромета на основе требований РД 52.18.595-96 “Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды”, с определением валовых (кислоторастворимых)

подвижных и водорастворимых тяжелых металлов с помощью атомно-адсорбционного анализа.

В настоящем исследовании использовали сведения по содержанию валовых форм соединений тяжелых металлов, так как данные по подвижным и водорастворимым формам являются фрагментарными и не позволяют провести сравнительный анализ эколого-геохимического состояния почв отдельных городов Приволжского ФО. Поскольку в материалах Росгидромета не приводятся сведения о генезисе и морфологическом строении профилей опробованных почв и/или техногенных почвоподобных образований, все почвенные разности условно называли урбопочвами.

Выбор социально-экономических показателей, учтенных при анализе особенностей загрязнения почв городов Приволжского ФО, обуславливался их прямой или косвенной принадлежностью к потенциальным источникам загрязнения почв (численность и плотность населения города – коммунальная нагрузка; плотность автодорожной сети – приземные выбросы в атмосферу от передвижных источников; количество объектов, имеющих стационарные источники выбросов, объемы ежегодных выбросов в атмосферу, доля в них твердых веществ – выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников; год основания города – длительность антропогенной нагрузки), либо принадлежностью их к показателям, в некоторой мере зависимым от качества окружающей среды (естественный прирост населения). Значения учтенных показателей принимались на основе статистических данных, публикуемых в ежегодниках “Регионы России. Социально-экономические показатели” [18], “Регионы России. Социально-экономические показатели городов” [17], а также паспортов муниципальных образований за 2021 г., размещенных на официальном сайте Росстата (<https://www.gks.ru/dbscripts/munst/>).

Современные уровни накопления тяжелых металлов в урбопочвах исследуемых городов оценивались на основе критериев превышения ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) с учетом гранулометрического состава и кислотности почв, а также по величине показателя комплексного полиметаллического загрязнения почв Zc (СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2)). Предпочтительность использования величин ОДК по сравнению с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) определялась возможностью учета в этом случае типологических особенностей зональных почв, что важно для более точной оценки экологических рисков [21].

Показатель комплексного загрязнения почв тяжелыми металлами определялся несколькими способами:

а) стандартным методом, предложенным в работе [19] и включенным в нормативно-правовую документацию по оценке экологического состояния почв, с учетом кратности превышения наблюдаемых величин концентраций элементов в опробованных урбопочвах над ориентировочными фоновыми уровнями накопления тяжелых металлов в соответствующих зональных почвах по формуле:

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

где Kc_i – коэффициент концентрации i -того контролируемого элемента в урбопочвах по отношению к ориентировочному природному фону, определенному по СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2); n – количество элементов со значениями $Kc_i > 1$;

б) по модифицированной Ю.Н. Водяницким формуле [4] с учетом степени токсичности тяжелых металлов, для которых $Kc_i(\phi) > 2$, по ГОСТ 17.4.1.02-83 “Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения”:

$$Z_c(t) = \sum Kc_i \cdot Kt_i - (n - 1), \quad (2)$$

где Kt_i – поправочный коэффициент токсичности контролируемого элемента, который принимался как 1.5 для элементов 1 класса опасности (Cd, Pb и Zn) и как 1.0 для элементов 2 класса опасности (Cu и Ni);

в) на основе сравнения эколого-геохимических показателей накопления тяжелых металлов в урбопочвах Приволжского ФО с их кларковыми значениями в городских почвах РФ:

$$Z_c(u) = \sum Kc(u)_i - (n - 1), \quad (3)$$

где $Kc_i(u)$ – коэффициент концентрации i -того контролируемого элемента в урбопочвах Приволжского ФО по отношению к его кларку в почвах городов с разным количеством жителей, принятым согласно исследованию [1]; n – количество тяжелых металлов со значениями $Kc_i(u) > 1$.

При анализе комплексного загрязнения городских почв тяжелыми металлами дополнительные индексы $Z_c(t)$ и $Z_c(u)$ были введены наряду с нормативно закрепленным Z_c : а) для оценки количественного изменения значений показателя и ранжирования ведущих элементов загрязнения в случае введения в формулу расчета поправочных коэффициентов, учитывающих степень токсичности отдельных тяжелых металлов, б) для выяв-

ления особенностей аккумуляции тяжелых металлов в урбопочвах Приволжского ФО по сравнению с усредненными характеристиками городских почв России, соответственно. При этом эколого-геохимическую оценку с определением категорий загрязнения урбопочв Приволжского ФО тяжелыми металлами проводили только по утвержденному нормативному показателю Z_c на основе требований СанПиН 1.2.3685-21.

При вариационно-статистической обработке данных базовые описательные характеристики определяли в программе Microsoft Excel 2007. Многомерный статистический анализ данных и их визуализацию осуществляли на основе пакета прикладных программ Statistica 10.0.1011 (StatSoft). Иерархическую агломеративную кластеризацию выполняли с предварительной стандартизацией данных, не содержащих пропуски, и построением дендрограмм сходства методом взвешенного попарного среднего по метрике евклидова расстояния. Нумерацию кластеров по характерным уровням накопления тяжелых металлов в урбопочвах Приволжского ФО по сравнению с природным геохимическим фоном и кларками городских почв России производили в порядке возрастания средних величин показателей Z_c и $Z_c(u)$ соответственно. Факторный анализ осуществляли на основе метода главных компонент с выбором четырех значимых факторов нагрузки по критерию “каменистой осыпи” с объяснением 77% дисперсии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам, полученным наблюдательной сетью Росгидромета в период 2017–2021 гг., содержание тяжелых металлов в урбопочвах Приволжского ФО существенно варьирует по пунктам наблюдений (табл. 2). Размах величин средних концентраций составляет: Cd – 0.1–6.1 мг/кг, Pb – 5–93 мг/кг, Zn – 13–404 мг/кг, Cu – 5–200 мг/кг, Ni – 5–200 мг/кг; размах величин максимальных концентраций поллютантов, фиксируемых на отдельных мониторинговых постах, часто еще больше и составляет для Cd 0.1–27.4 мг/кг; для Pb – 33–383 мг/кг; для Zn – 54–1886 мг/кг; для Cu – 20–450 мг/кг; для Ni – 27–358 мг/кг. При этом наиболее контрастная эколого-геохимическая ситуация между уровнем накопления тяжелых металлов в почвах городов Приволжского ФО отмечается в отношении Cd (коэффициенты вариации показателя Cv для средних и максимальных значений концентраций элемента оцениваются как $\approx 140\%$ при $p = 0.95$), наименее различаются уровни накопления в почвах отдельных городов Pb и Ni (Cv 58–72% при $p = 0.95$).

Оценка текущих уровней аккумуляции тяжелых металлов в урбопочвах Приволжского региона с позиции санитарно-гигиенического норми-

Таблица 2. Средние и максимальные уровни содержания тяжелых металлов в почвах городов Приволжского ФО, входящих в наблюдательную сеть Росгидромета, мг/кг [9–13]

Субъект РФ	Город	Cd		Pb		Zn		Cu		Ni	
		среднее	максимум								
Республика Башкортостан	<i>Белебей</i>	6.1	27.4	52	263	83	144	22	61	35	87
	Бирск	1.3	7.4	32	144	37	71	29	121	90	104
	<i>Благовещенск</i>	1.0	3.5	32	144	44	96	31	107	43	82
	Давлеканово	5.9	25.0	58	108	132	204	56	97	128	198
	Ишимбай	0.2	0.5	19	89	68	119	25	47	87	156
	<i>Кумертау</i>	1.1	10.4	17	65	85	321	43	450	107	168
	Мелеуз	0.2	1.2	26	104	113	591	32	136	231	358
	Октябрьский	0.7	5.8	22	84	99	456	37	293	169	263
	Салават	0.3	0.5	19	144	81	201	24	56	91	150
	Стерлитамак	0.3	0.6	20	41	108	250	28	99	80	111
Республика Татарстан	Туймазы	1.3	17.2	30	110	49	79	19	26	91	123
	<i>Уфа</i>	0.3	1.2	28	73	104	265	39	79	57	87
Чувашская республика	<i>Казань</i>	0.7	2.2	16	92	54	230	18	99	15	57
	Новочебоксарск	0.1	0.1	51	71	38	54	38	54	39	55
Нижегородская область	Арзамас	0.1	0.1	20	81	64	117	13	20	15	27
	Дзержинск	1.5	2.7	5	33	30	75	5	26	5	41
	Кстово	0.1	0.1	33	63	115	355	33	58	15	45
	<i>Нижний Новгород</i>	0.1	4.6	23	119	56	179	29	101	26	52
	<i>Медногорск</i>	1.4	2.7	93	383	313	753	200	326	31	69
Оренбургская область	<i>Оренбург</i>	0.9	1.8	33	107	144	635	25	79	48	100
	Орск	0.7	1.9	49	140	209	583	62	170	57	162
Пензенская область	<i>Пенза</i>	2.0	6.1	64	190	404	1886	49	175	62	156
Самарская область	<i>Самара</i>	0.5	1.0	20	99	84	122	30	63	61	88

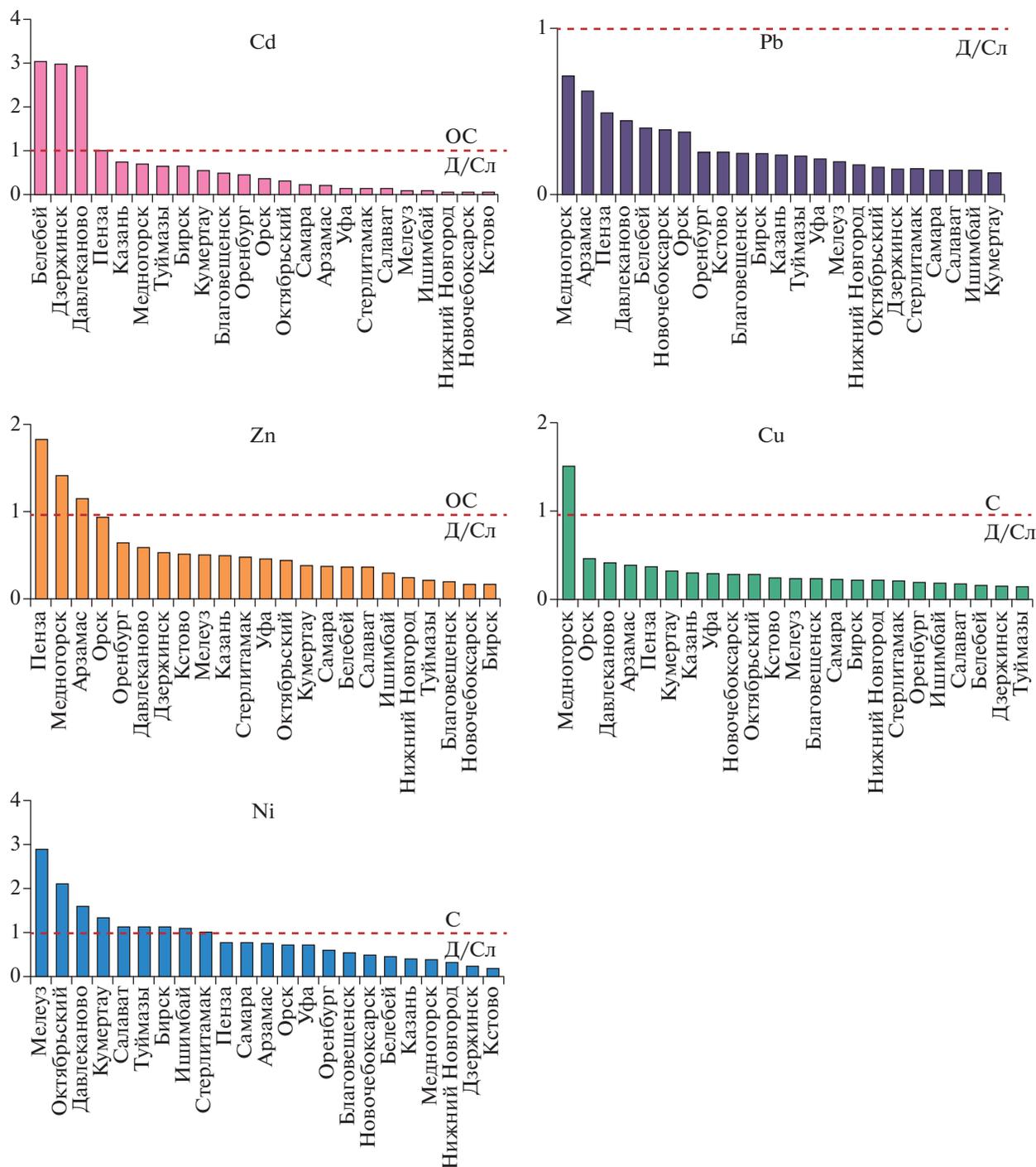


Рис. 1. Кратность превышения средних концентраций тяжелых металлов над соответствующими величинами ОДК в почвах городов Приволжского ФО, входящих в наблюдательную сеть Росгидромета. Пунктирная линия соответствует величине ОДК = 1 и является границей для категорий загрязнения почв: Д/Сл – допустимая/слабая, С – сильная, ОС – очень сильная.

рования (рис. 1) выявила определенные экологические риски в отношении накопленных в почвах количеств экотоксикантов I класса опасности для жителей таких городов, как Белебей, Давлеканово и Дзержинск (по средним концентрациям в

почвах Cd), а также Арзамаса, Медногорска и Пензы (по средним концентрациям в почвах Zn). Степень моноэлементного загрязнения почвенного покрова этих населенных пунктов – при кратности превышений величин ОДК в ≈ 3 и

≈ 1.2–2 раза, соответственно, – определяется как очень сильная из-за высокой токсичности соединений этих элементов для человека по ГОСТ 17.4.1.02-83 “Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения”. Большинство городов Приволжского ФО с повышенными концентрациями Cd и Zn в почвах имеет относительно небольшой возраст (100–300 лет), малую или среднюю численность населения, относится к моногородам, которые образовались вокруг одного или нескольких градообразующих предприятий машиностроительной или металлургической производственной направленности (Белебеевский завод “Автономаль”, Белебеевский машиностроительный завод, Медногорский медно-серный комбинат и др.). При этом средние концентрации такого распространенного поллютанта I класса опасности, как Pb, маркирующего разнообразные антропогенные источники загрязнения, включая автомобильный транспорт, в почвах всех городов Приволжского региона с действующими постами мониторинга Росгидромета не превышают величины ОДК.

Для поллютантов II класса опасности средние уровни накопления в урбопочвах Приволжского региона соединений Cu превышают ОДК ≈ в 1.5 раза лишь в единственном “профильном” по своей геохимической специализации моногороде Медногорск, что соответствует сильной степени загрязнения почв. В то же время средние концентрации Ni систематически возрастают до 1.1–2.9-кратной величины ОДК (сильная степень загрязнения) в почвах городов Республики Башкортостан: Мелеуз, Давлеканово, Кумертау, Ишимбай, Октябрьский, Салават, Туймазы, Бирск, подавляющая часть которых относится к малым или средним.

В целом наиболее удовлетворительное санитарно-гигиеническое состояние урбопочв фиксируется в крупнейших и крупных городах региона. За исключением Пензы все они входят в список населенных пунктов (Благовещенск, Казань, Кстово, Нижний Новгород, Новочебоксарск, Оренбург, Орск, Самара, Стерлитамак, Уфа), где текущие средние уровни накопления в почвах тяжелых металлов I и II классов опасности ниже величин ОДК по всем контролируемым показателям.

Одновременное повышение уровней содержания в почвах нескольких тяжелых металлов может создавать определенные экологические риски для здоровья населения даже при незначительных превышениях величин ОДК (ПДК), которые многократно возрастают при дальнейшем росте комплексного техногенного прессинга [19]. Оценка полиэлементного загрязнения урбоэкосистем Приволжского ФО приоритетными тяжелыми металлами по их среднему содержанию в почвах (табл. 3) показала, что по сравнению с

ориентировочным фоном в таких городах как Белебей (моногород), Давлеканово, Держинск, Медногорск (моногород) и Пенза сложилась умеренно опасная ситуация (Zc соответствует интервалу 16–32). В других городах Приволжского региона, где проводятся мониторинговые наблюдения Росгидромета, уровень полиэлементного загрязнения почв тяжелыми металлами в настоящее время определяется как допустимый ($Zc \leq 16$) (рис. 2).

При полиэлементном характере ореолов аккумуляции тяжелых металлов ведущим элементом загрязнения, как правило, служит Cd, реже – Ni, еще реже – Pb. Их содержание в почвах урбоэкосистем Приволжского региона с умеренно опасной категорией комплексного загрязнения возрастает по сравнению с ориентировочными фоновыми показателями в 5–25, 2–5 и 2–3 раза соответственно. В единичных случаях в городских почвах наиболее выражены антропогенные геохимические аномалии Cu (Медногорск, $Kc_{Cu} = 8$) или Zn (Орск, $Kc_{Zn} = 3$). Участие остальных тяжелых металлов в составе дополнительных элементов загрязнения (с $Kc_i > 2$) отражает геохимический спектр нагрузки на окружающую среду городов Приволжского региона, который в основном зависит от количества и специализации производственных предприятий. В частности, наиболее многокомпонентное полиметаллическое загрязнение почв формируется в городах с разными урбанистическими характеристиками – Давлеканово, Кумертау, Орск, Пенза и Уфа. В то же время для почв древних и густонаселенных Казани, Нижнего Новгорода, а также менее крупных Арзамаса, Ишимбая, Держинска характерны “короткие” спектры загрязнения, состоящие из 1–2 ведущих компонентов.

При оценке комплексного загрязнения урбопочв Приволжского ФО по показателю $Zc(t)$ с дифференцированным учетом токсичности тяжелых металлов численные значения параметра увеличиваются по сравнению со стандартным показателем Zc до 1.5 раз в случае ярко выраженного доминирования в геохимическом спектре загрязнения экотоксикантов I класса опасности с $Kc_i > 20$, но мало изменяются при меньшей степени концентрирования в городских почвах соединений Cd, Zn или Pb, или изначально преобладании в спектре загрязнения элементов II класса опасности. При этом в соответствии с методикой расчета показателя $Zc(t)$ элементы I класса опасности, как правило, приобретают ведущую роль, что акцентирует внимание на их аккумуляции в урбопочвах.

При сопоставлении характеристик урбопочв Приволжского ФО с соответствующими усредненными показателями накопления тяжелых металлов в почвах городов России с разным количе-

Таблица 3. Оценка комплексного загрязнения тяжелыми металлами городских почв Приволжского ФО, входящих в наблюдательную сеть Росгидромета, по показателям Z_c , $Z_c(t)$ и $Z_c(u)$

Субъект РФ	Город	Z_c (с учетом региональных природных характеристик)		$Z_c(t)$ (с учетом региональных природных характеристик и токсичности тяжелых металлов)		$Z_c(u)$ с учетом урбанистических характеристик		
		численный показатель	формула загрязнения ^a	численный показатель	формула загрязнения	численный показатель	формула загрязнения	
Республика Башкортостан	Белый	27.2 ^б	$Cd_{2.5,4} Pb_{2.6} Zn_{1.4}$ ^в	41.0	$Cd_{38.1} Pb_{3.9}$	5.5	$Cd_{4.3} Ni_{1.9} Pb_{1.3}$	
	Бирск	9.7	$Cd_{6.5} Ni_{2.6} Pb_{2.0} Cu_{1.6}$	13.3	$Cd_{9.8} Pb_{3.0} Ni_{2.6}$	4.9	$Ni_{4.9}$	
	Благовещенск	7.0	$Cd_{5.0} Pb_{2.0} Cu_{1.7} Ni_{1.2}$	9.5	$Cd_{7.5} Pb_{3.0}$	2.4	$Zn_{2.3} Cu_{1.1}$	
	Давлеканово	30.5	$Cd_{2.4,6} Pb_{2.9} Ni_{2.8} Cu_{2.2} Zn_{1.9}$	45.2	$Cd_{36.9} Pb_{4.4} Zn_{2.9} Ni_{2.8} Cu_{2.2}$	12.0	$Ni_{7.0} Cd_{4.2} Cu_{2.0} Pb_{1.5} Zn_{1.4}$	
	Ишимбай	1.9	$Ni_{1.9}$	—	—	4.7	$Ni_{4.7}$	
	Кумертау	9.4	$Cd_{5.5} Ni_{3.1} Cu_{2.4} Zn_{1.4} Pb_{1.1}$	12.8	$Cd_{8.3} Ni_{3.1} Cu_{2.4} Zn_{2.1}$	6.3	$Zn_{5.8} Cu_{1.5}$	
	Мелеуз	6.3	$Ni_{5.1} Zn_{1.7} Pb_{1.3} Cu_{1.3}$	6.6	$Ni_{5.1} Zn_{2.5}$	12.9	$Ni_{12.5} Zn_{1.2} Cu_{1.1}$	
	Октябрьский	6.5	$Ni_{3.8} Cd_{2.7} Zn_{1.5} Cu_{1.5} Pb_{1.1}$	8.0	$Cd_{4.1} Ni_{3.8} Zn_{2.2}$	7.7	$Ni_{7.1} Cd_{1.3} Cu_{1.3}$	
	Салават	2.5	$Ni_{2.0} Cd_{1.3} Zn_{1.2}$	4.1	—	3.8	$Ni_{3.8}$	
	Стерлитамак	2.7	$Ni_{1.8} Zn_{1.6} Cd_{1.3} Cu_{1.1}$	2.0	$Zn_{2.4}$	3.5	$Ni_{3.4} Zn_{1.1}$	
	Туймазы	6.9	$Cd_{5.4} Ni_{2.0} Pb_{1.5}$	10.4	$Cd_{8.1} Pb_{2.3}$	4.9	$Ni_{4.9}$	
	Уфа	3.0	$Cu_{1.6} Zn_{1.5} Pb_{1.4} Cd_{1.3} Ni_{1.3}$	3.4	$Zn_{2.3} Pb_{2.1}$	1.6	$Ni_{1.6}$	
	Республика Татарстан	Казань	6.6	$Cd_{6.2} Zn_{1.2} Cu_{1.2}$	9.3	$Cd_{9.3}$	1.0	—
	Чувашская республика	Новочебоксарск	4.4	$Pb_{3.2} Cu_{2.1} Ni_{1.1}$	5.9	$Pb_{4.8} Cu_{2.1}$	2.2	$Ni_{1.6} Cu_{1.4} Pb_{1.2}$
	Нижегородская область	Арзамас	5.4	$Ni_{2.5} Zn_{2.3} Cd_{2.0} Cu_{1.6}$	6.9	$Zn_{3.4} Cd_{3.0} Ni_{2.5}$	1.0	—
Дзержинск		30.1	$Cd_{30.0} Zn_{1.1}$	45.0	$Cd_{45.0}$	2.9	$Cd_{2.9}$	
Кстово		3.8	$Pb_{2.1} Cu_{1.9} Zn_{1.8}$	5.0	$Pb_{3.1} Zn_{2.9}$	1.4	$Pb_{2.1} Zn_{1.9} Cu_{1.8}$	
Нижний Новгород		2.0	$Cu_{1.6} Pb_{1.4}$	2.2	$Pb_{2.2}$	1.0	—	
Оренбургская область	Медногорск	20.1	$Cu_{8.0} Cd_{5.8} Pb_{4.7} Zn_{4.6}$	27.6	$Cd_{8.8} Cu_{8.0} Pb_{7.0} Zn_{6.9}$	11.5	$Cu_{7.1} Zn_{3.4} Pb_{2.4} Ni_{1.7}$	
	Оренбург	5.6	$Cd_{3.8} Zn_{2.1} Pb_{1.7} Ni_{1.1}$	9.3	$Cd_{5.6} Zn_{3.2} Pb_{2.5}$	1.8	$Ni_{1.7} Cd_{1.1}$	
	Орск	8.2	$Zn_{3.1} Cd_{2.9} Pb_{2.5} Cu_{2.5} Ni_{1.3}$	12.1	$Zn_{4.6} Cd_{4.4} Pb_{3.7} Cu_{2.5}$	5.2	$Ni_{2.4} Cu_{2.2} Zn_{2.1} Cd_{1.4} Pb_{1.1}$	
Пензенская область	Пенза	16.8	$Cd_{8.3} Zn_{5.9} Pb_{3.2} Cu_{2.0} Ni_{1.4}$	24.2	$Cd_{12.5} Zn_{8.9} Pb_{4.8}$	6.4	$Zn_{2.7} Cd_{2.5} Ni_{2.2} Cu_{1.6} Pb_{1.4}$	
Самарская область	Самара	2.6	$Cd_{1.9} Ni_{1.3} Zn_{1.2} Cu_{1.2}$	2.8	$Cd_{2.8}$	1.7	—	

^a Формула загрязнения почв тяжелыми металлами представляет ранжированную по убыванию показателей K_c последовательность перечисления элементов с $K_c > 1$ (формула загрязнения почв с учетом их региональных природных характеристик и токсичности тяжелых металлов показана для элементов с $K_c > 2$).

^б Жирным шрифтом выделены значения показателя Z_c , превышающие нормируемый допустимый уровень комплексного загрязнения почв тяжелыми металлами, согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

^в В формулах загрязнения почв жирным шрифтом выделены ведущие элементы с $K_c > 2$.

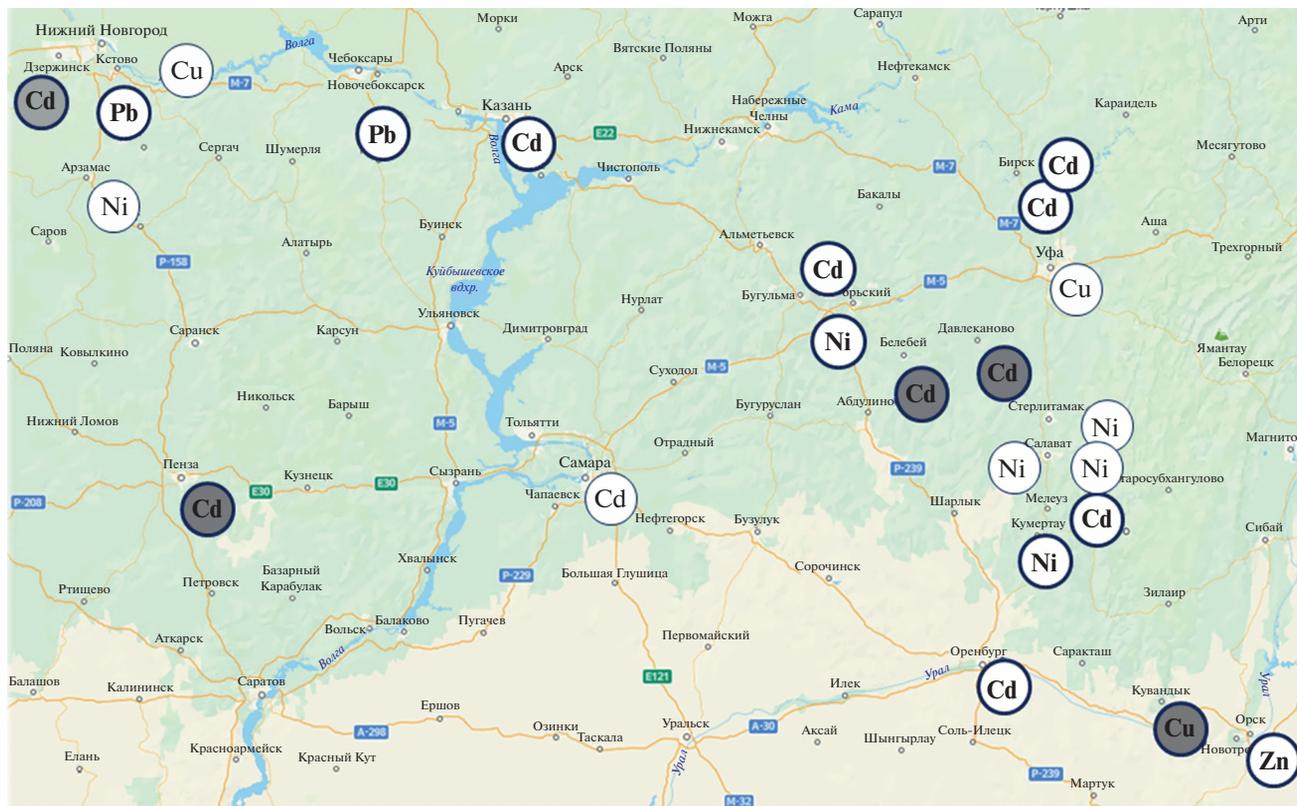


Рис. 2. Категория комплексного загрязнения почв городов Приволжского ФО, входящих в наблюдательную сеть Росгидромета, тяжелыми металлами по сравнению с природным фоном: маркер без заливки – допустимая, серый маркер – умеренно опасная; доминирующий элемент загрязнения указан жирным шрифтом и обведен жирным маркером при значении $Kc_i > 2$ и обычным при значении $1 < Kc_i \leq 2$.

ством жителей (критерий, положенный в основу расчета кларков городских почв В.А. Алексеенко и А.В. Алексеенко [1]) в ранге малых городов с населением до 100 тыс. жителей резкое возрастание показателя $Zc(u)$ отмечается в Мелеузе, Давлеканово и Медногорске (в 12–13 раз); в ранге городов с населением от 100 до 300 тыс. человек – в Октябрьском и Орске (в 5–8 раз); в ранге городов с населением от 300 до 700 тыс. человек – в Пензе (в 6 раз). Напротив, средние уровни содержания тяжелых металлов в почвах городов-миллионеров Приволжского ФО (Казань, Нижний Новгород, Уфа, Самара), менее заметно отклоняются от общероссийских показателей, что может определяться как современным трендом к выводу большинства экологически опасных производств за пределы крупнейших населенных пунктов, так и регулярно проводимыми в них мероприятиями по замене наиболее загрязненных поверхностных слоев почв “чистыми” массами торфосмесей и/или искусственных почвогрунтов. Среди крупных городов региона наиболее близкими к среднестатистическим для России параметрам накопления в почвах тяжелых металлов обладает Оренбург, среди средних – Арзамас, среди малых –

Благовещенск (моногород) и Кстово, в которых показатель $Zc(u)$ не превышает 2.

Формулы загрязнения городских почв Приволжского ФО, составленные на основе величин $Kc(u)_i$, как правило, отличаются присутствием Ni в качестве ведущего элемента. В частности, для урбопочв Бирска, Ишимбая, Оренбурга, Салавата, Стерлитамака, Туймаза и Уфы такое положение может определяться ростом контрастности региональной геохимической аномалии Ni за счет наличия производств по добыче и переработке цветных металлов, а также металлоносной нефти.

В целом пространственно-территориальные особенности ореолов загрязнения урбопочв Приволжского ФО тяжелыми металлами и доминирование в комплексе поллютантов тех или иных элементов определяются, скорее всего, не общим уровнем антропогенной нагрузки по показателю численности населения, но в большей степени – региональной геохимической обстановкой и спецификой предприятий, сосредоточенных в отдельных городах. В этой связи не обнаруживается четко детерминированных связей между концентрациями тяжелых металлов в почвах и

урбанистическими характеристиками населенных пунктов. Коэффициенты корреляции Стьюдента r^2 между показателями Z_c , $Z_c(t)$ и $Z_c(u)$, с одной стороны, и такими характеристиками, как возраст города, численность и плотность его населения, количество стационарных источников выбросов, общий объем выброшенных в атмосферный воздух загрязняющих веществ и количество твердых веществ в их составе, с другой стороны, колеблются в диапазоне от -0.42 до 0.19 при $p = 0.95$, что свидетельствует о слабой или умеренной тесноте парных связей.

В то же время использование многомерных статистических методов для сопряженного анализа данных по средним уровням накопления в урбопочвах тяжелых металлов и социально-экономическим показателям городов способствует выявлению ряда интересных закономерностей. Так, иерархическая агломеративная кластеризация, проведенная на основании величин Kc_i и Z_c , позволяет объединить почвы городов Приволжского ФО в 4 группы (рис. 3а).

Базовый I кластер характеризуется множественностью и объединяет урбопочвы 18 городов Приволжского региона (включая моногорода Благовещенск и Кумертау), в которых усредненное содержание тяжелых металлов в основном не превышает 2-кратной величины их ориентировочных фоновых концентраций, а суммарный показатель загрязнения соответствует допустимому уровню (рис. 3б). Существенное повышение содержания в почвах Пензы соединений Cd и Zn ($Kc_{Cd} \approx 8$, $Kc_{Zn} \approx 6$) при незначительно различающихся с почвами I кластера уровнях накопления Ni, Cu и Pb определяет выделение этих урбопочв в отдельный II кластер с переходной степенью их комплексного загрязнения тяжелыми металлами от допустимой до умеренно опасной. Аналогично, резкое возрастание концентраций в почвах содержания Cu ($Kc_{Cu} \approx 8$) и сопутствующих медно-колчеданным рудам Zn и Pb ($Kc_i \approx 5-6$) выделяет в отдельный III кластер почвы моногорода Медногорск с умеренно опасным уровнем комплексного загрязнения тяжелыми металлами. Наконец в почвах Дзержинска, Давлеканово и Белебей (моногород), вошедших в IV кластер, настолько резко повышены средние концентрации валового Cd ($Kc_{Cd} \approx 27$), что даже при близком к геохимическому фону содержании остальных контролируемых тяжелых металлов степень комплексного полиэлементного загрязнения городских почв по показателю Z_c оценивается как умеренно-опасная, приближающаяся к опасной.

Поиск причинно-следственных связей между накоплением в почвах городов тяжелых металлов и их усредненными по кластерам урбанистическими характеристиками (рис. 3е) выявляет, что, несмотря на существенные различия в численно-

сти и плотности населения городов I кластера, их нормализованные показатели близки к “центральному” образу. Вместе с тем Пенза (II кластер) характеризуется относительно меньшим значением общего коэффициента рождаемости и повышенным коэффициентом смертности. Молодой моногород Медногорск (III кластер) с наименьшей плотностью населения отличается более низкими значениями всех включенных в анализ показателей, кроме общего коэффициента смертности – самого высокого в регионе. Города IV кластера (Дзержинск, Белебей (моногород) и Давлеканово), в почвах которых доминирует высокотоксичный Cd, вопреки ожиданиям, характеризуются относительно низкими показателями смертности населения. Безусловно, показатели рождаемости и смертности городских жителей зависят от множества факторов различной природы (уровень здравоохранения, миграция населения, половозрастной состав, факторы образа жизни, состояние окружающей среды и др.). Их нельзя однозначно интерпретировать как следствие загрязнения почв и сопредельных сред. Однако общепризнано, что среди факторов среды обитания, влияющих на здоровье населения, показатели эколого-геохимического состояния окружающей среды играют чрезвычайно важную роль [15, 16].

Кластеризация урбопочв Приволжского ФО на основе сопоставления содержания в них тяжелых металлов с кларками городских почв России (рис. 3б, 3д) при одновременном учете социально-экономических факторов (рис. 3ф) выявила несущественные отличия эколого-геохимических показателей городских почв большинства населенных пунктов региона (17 городов) от усредненных характеристик, так как величины $Kc(u)_i$ для Cd, Pb, Zn и Cu близки к 1. Исключением является 3-кратное увеличение среднего уровня содержания в урбопочвах I кластера соединений Ni, по-видимому, связанное с наличием природной геохимической аномалии в Оренбургской области и на территории Республики Башкортостан (рис. 2). Во II кластер попадают моногород Белебей, а также Давлеканово, Орск и Пенза, в почвах которых несколько повышено среднее содержание всех тяжелых металлов ($Kc(u)_i \approx 1.5$) и особенно заметно – Cd и Ni ($Kc(u)_i \approx 3$). При близких к стандартным характеристикам численности и плотности населения, а также густоты дорожной сети, в городах II кластера отмечаются сравнительно меньшие значения коэффициента рождаемости и большие – общего коэффициента смертности. Эколого-геохимическая уникальность моногорода Медногорск (III кластер) выявляется не только при сравнении с типологическими характеристиками фоновых зональных почв, но и при сопоставлении его с другими малыми городами России, что сопровождается высоким уровнем накопления в почвах города соединений

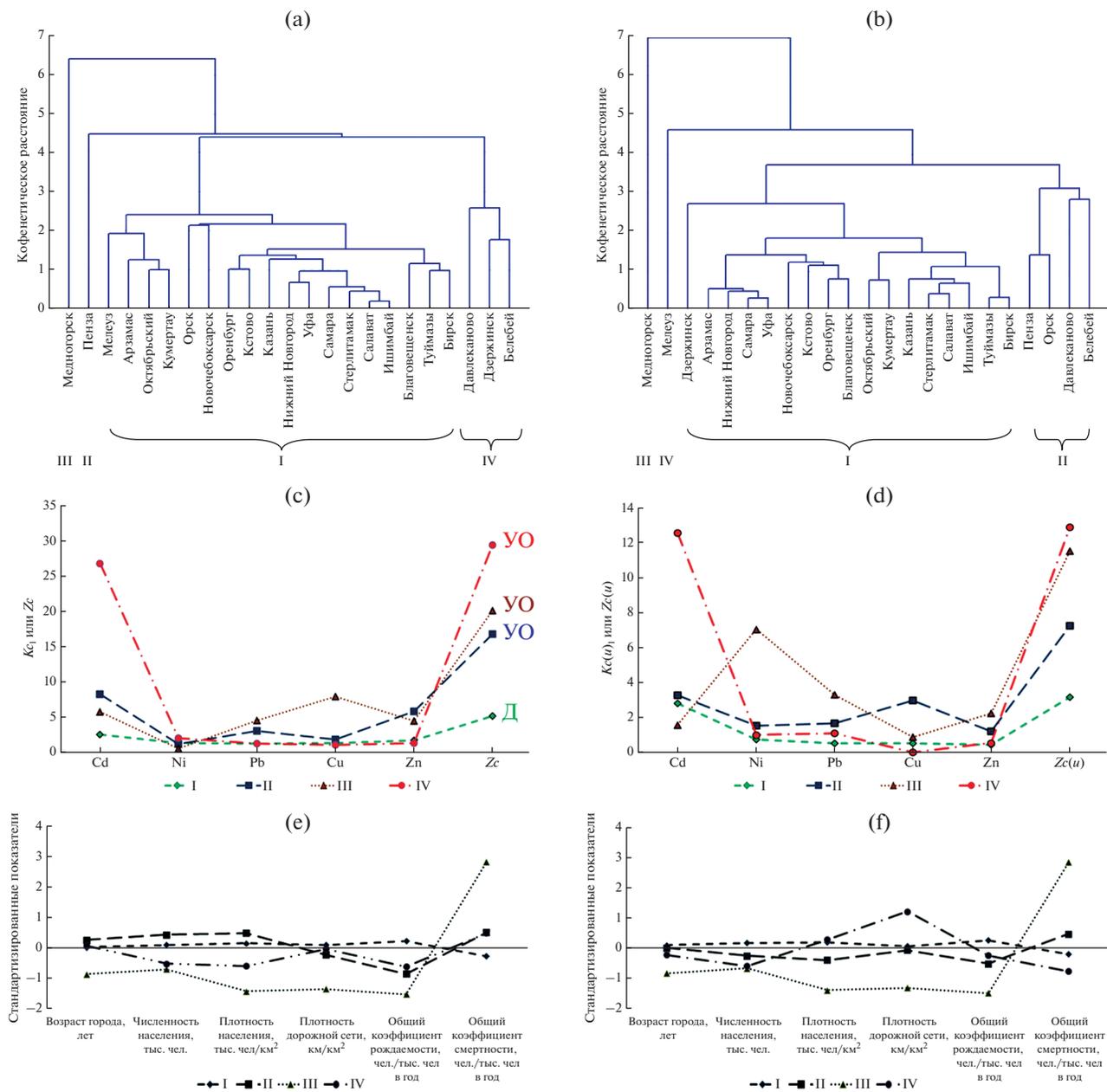


Рис. 3. Кластеризация городов Приволжского ФО, выполненная на основе анализа показателей загрязнения почв тяжелыми металлами сравнительно с типологическим природным фоном (а, b, e) и кларками городских почв России (b, d, f): дендрограммы иерархической кластеризации (а, b); усредненные геохимические спектры тяжелых металлов и комплексные показатели загрязнения урбопочв по выделенным кластерам (с и e); социально-экономические характеристики населенных пунктов по выделенным кластерам (e, f). I, II, III и IV – кластеры урбопочв. Категория комплексного загрязнения почв тяжелыми металлами (с): Д – допустимая ($Zc \leq 16$), УО – умеренно опасная ($16 < Zc < 32$).

Cu ($Kc(u)_{Cu} \approx 7$). Показатели рождаемости и смертности населения в этом кластере приобретают экстремальные значения среди городов, включенных в наблюдательную сеть Росгидромета. В свою очередь, Мелеуз (IV кластер) отличается от других средних по числу жителей городов России повышенными концентрациями в почвах соединений Ni ($Kc(u)_{Ni} \approx 13$), которые превосходят

уровни накопления элемента в урбопочвах других городов Башкортостана и могут отражать наложение антропогенной геохимической аномалии на расширенный природный фон. Социально-экономические характеристики при этом слегка отклоняются от общероссийских в части организации жизненного пространства города (компактность планировки, высокая плотность дорожной сети), но при показателе рождаемости,

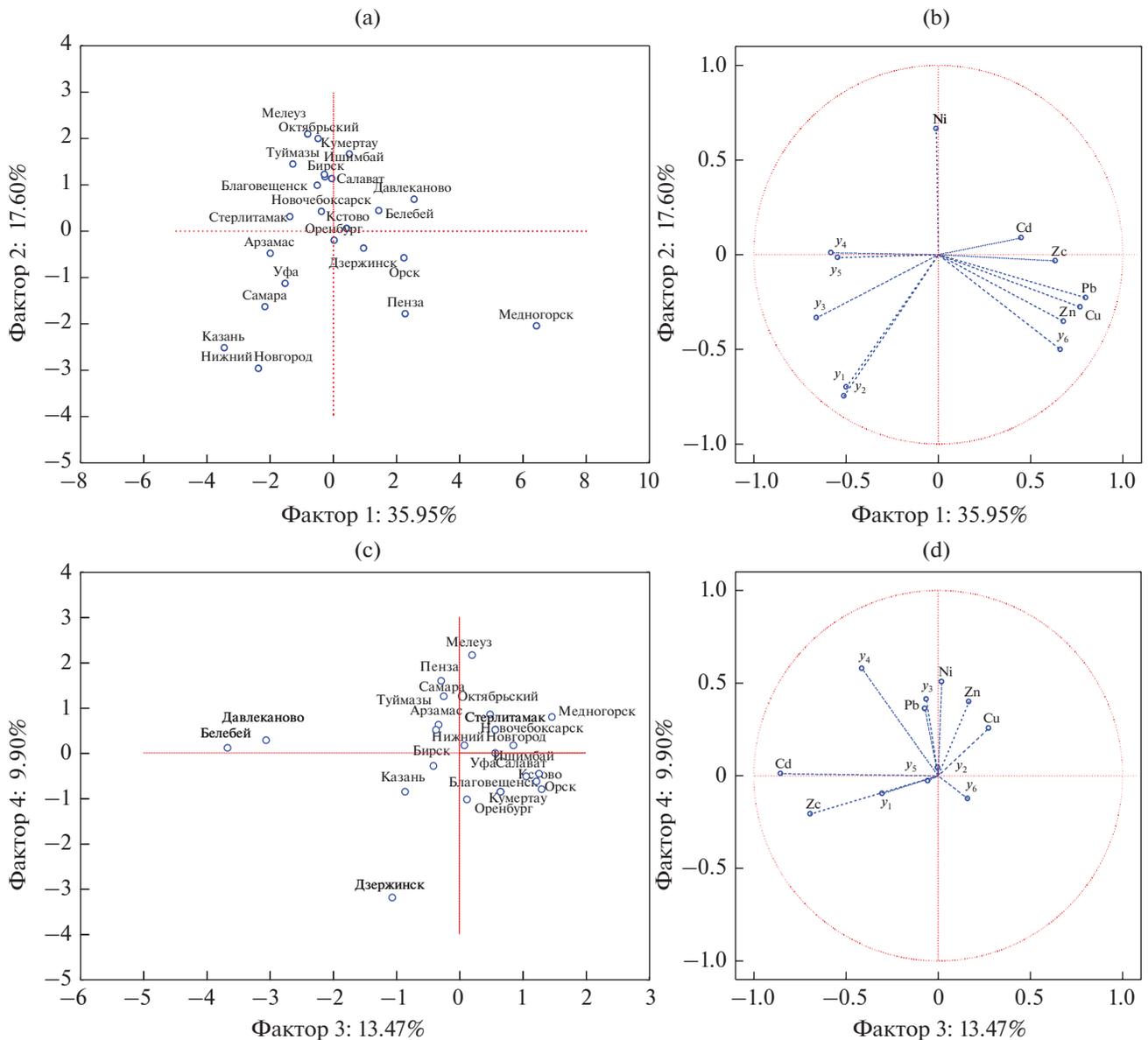


Рис. 4. Проекция эколого-геохимических (по средним концентрациям тяжелых металлов в урбопочвах и показателю Z_c) и социально-экономических характеристик городов Приволжского ФО, входящих в наблюдательную сеть Росгидромета, на плоскости: 1 и 2 главных компонент (а), 3 и 4 главных компонент (б). Урбанистические характеристики: y_1 – возраст города, лет; y_2 – численность населения, тыс. чел.; y_3 – плотность населения, тыс. чел./км²; y_4 – плотность дорожной сети, км/км²; y_5 – общий коэффициент рождаемости, чел./тыс. чел. в год; y_6 – общий коэффициент смертности, чел./тыс. чел. в год.

близкой к среднестатистической, общий коэффициент смертности населения в Мелеузе несколько меньше, чем в других кластерах городов.

Визуализация массива данных по эколого-геохимическим и социально-экономическим показателям городов Приволжского ФО на основе метода главных компонент выявляет схожую с полученной при кластеризации структуру распределения групп объектов по осям ординации (рис. 4а, 4б). При этом большинство накопленных в урбопочвах Приволжского ФО халькофильных тяжелых ме-

таллов (Pb, Zn, Cu, в меньшей степени Cd), как и показатель Z_c , обнаруживают тесную положительную связь между собой, а также с общим коэффициентом смертности населения по первой оси ординации. В то же время отмечается отрицательная корреляция между сонаправленными градиентами содержания в почвах Cd, величины Z_c и коэффициентом смертности населения, с одной стороны, и общим коэффициентом рождаемости, а также плотностью дорожной сети, с другой. Если при этом динамика числа жителей (по показа-

телям рождаемости и смертности) логично увязывается с эколого-геохимической характеристикой урбопочв, то обратные тренды между показателем комплексного загрязнения почв и плотностью дорожной сети могут определяться меньшей развитостью транспортной инфраструктуры промышленных городов. Характерно, что уровни содержания в городских почвах сидерофильного Ni не коррелируют ни с остальными халькофильными тяжелыми металлами, ни с каким-либо из учетных социально-экономических показателей городов, проецируясь непосредственно на вторую ординационную ось, по которой группируется большинство городов Республики Башкортостан и Оренбургской области, что подтверждает предположение о петрогенном характере повышения регионального фона Ni в почвах и породах данной территории.

Третий и четвертый основные компоненты позволяют разделить тяжелые металлы, контролируемые в урбопочвах Приволжского ФО, на группы Cu–Zn, Ni–Pb и Cd, формирование которых, по-видимому, определяется региональной металлургией, а также производственной геохимической специализацией городов (рис. 4d). Характерно, что по третьей главной ординате уровни накопления в городских почвах Cd отчетливо коррелируют с показателем комплексного загрязнения урбопочв Zc, но в данной проекции они меньше связаны с общим коэффициентом смертности населения, чем, например, показатели аккумуляции в почвах Cu и Zn. Необходимо отметить, что хотя согласно ГОСТ 17.4.1.02-83 “Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения” Cu относится к элементам II класса с умеренной опасностью накопления в почвах, на рубеже XX и XXI вв. в Программе ООН по окружающей среде (ЮНЕП) он был причислен к наиболее опасным экотоксикантам, требующим пристального внимания при проведении мониторинга состояния почв. Таким образом, можно согласиться с мнением Ю.Н. Водяницкого [3] о возможности пересмотра параметров токсичности для человека и биоты ряда тяжелых металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинговая сеть Росгидромета по контролю текущих уровней накопления тяжелых металлов в урбопочвах охватывает около 10% городов Приволжского ФО с различными социально-экономическими характеристиками. Согласно проанализированным официальным данным, эколого-геохимические показатели почв большинства городов региона близки к общероссийским кларкам для Cd, Pb, Zn и Cu, а по санитарно-гигиеническим нормативам степень моноэлементного и комплексного загрязнения почв этих

населенных пунктов в настоящее время оценивается как “допустимая”. “Умеренно опасная” степень комплексного загрязнения урбопочв тяжелыми металлами отмечается в городах Белебей (моногород), Давлеканово, Держинск, Медногорск (моногород) и Пенза. При этом доминантным элементом загрязнения почв в Белебее, Давлеканово и Держинске служит Cd, накопление которого явным образом не коррелирует с демографическими показателями; в Пензе – одновременная аккумуляция в почвах Cd и Zn сочетается с относительным снижением рождаемости и повышением смертности; а заметное накопление в урбопочвах Медногорска соединений Cd, Zn и особенно Cu сопровождается показателями минимальной в регионе рождаемости и максимальной смертности населения. В целом метод главных компонент выявляет сонаправленность градиентов увеличения концентраций в почвах городов Приволжского ФО Cd, Pb, Zn, Cu и суммарного показателя полиэлементного загрязнения Zc, с одной стороны, и снижения естественного прироста населения, с другой. Это актуализирует как разработку общих мер по охране окружающей среды от химического загрязнения, так и проведение непрерывных мониторинговых наблюдений за уровнем содержания в почвах токсикантов промышленного происхождения.

Для почв преимущественно малых и средних городов Республики Башкортостан и ряда городов Оренбургской области характерна Ni геохимическая специализация, которая может приводить к их моноэлементному загрязнению, но не сопровождается заметным влиянием на состояние здоровья населения.

Наиболее благоприятные показатели текущих уровней накопления тяжелых металлов I и II классов опасности, которые не создают масштабных экологических рисков, характерны для почв крупнейших и крупных городов Приволжского ФО, что, возможно, определяется повышенным вниманием к вопросам охраны окружающей среды в населенных пунктах с большим количеством жителей.

В целом комплексный учет эколого-геохимических и социально-экономических показателей урбанизированных территорий представляется перспективным как для оценки интенсивности антропогенного прессинга на почвы городов, так и для анализа возможных причинно-следственных связей между уровнями загрязнения почв и состоянием здоровья населения. При этом использование дополнительных показателей Zc(t) и/или Zc(u) наряду с нормативно закрепленным показателем Zc для интегральной оценки полиметаллического загрязнения городских почв позволяет сфокусировать внимание на наиболее токсичных элементах I класса опасности, а также выявить

эколого-геохимическую специфику накопления тяжелых металлов в почвах отдельного населенного пункта по сравнению с их кларковыми концентрациями в почвах городов России, что во многом способствует пониманию региональных особенностей антропогенной нагрузки на окружающую среду урбозкосистем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.А., Алексеев А.В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитренных ландшафтов: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. 380 с.
2. База данных показателей муниципальных образований. Росстат, 2022. <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/> (дата обращения 14.02.2022).
3. *Водяницкий Ю.Н.* Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881. <https://doi.org/10.1134/S1064229313050153>
4. *Водяницкий Ю.Н.* Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1276–1280. <https://doi.org/10.1134/S106422931010011X>
5. *Волчков А.Г., Никешин Ю.В., Конкина О.М., Ходина М.А., Чеботарева О.С.* Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы цветных, черных и редких металлов Приволжского Федерального округа // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 3. С. 36–47.
6. Города России: <https://города-россия.рф/alphabet.php> (дата обращения 22.08.2022)
7. *Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзанаров В.Х., Харбев Г.Х.* Минерально-сырьевая база цветной металлургии в России // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2. № 1. С. 9–18.
8. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Министерство сельского хозяйства РФ. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2019. <https://egrpr.esoil.ru/> (дата обращения 27.08.2022)
9. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2021 г. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2022. 131 с.
10. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 г. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2021. 128 с.
11. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2019 г. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2020. 129 с.
12. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2018 г. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2019. 121 с.
13. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2017 г. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2018. 96 с.
14. *Касимов Н.С.* Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В. 2013. 208 с.
15. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 340 с.
16. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год / Ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2022. 220 с.
17. *Регионы России.* Основные социально-экономические показатели городов. Статистический сборник. М.: Росстат, 2020. 458 с.
18. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2021. Статистический сборник. М.: Росстат, 2021. 1114 с. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.308>
19. *Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра М, 1990. 335 с.
20. *Семенов И.Н., Королева Т.В.* Нормативы содержания химических элементов в почвах функциональных зон городов (обзор) // Почвоведение. 2022. № 1. С. 96–105. <https://doi.org/10.1134/S1064229322010100>
21. *Чернова О.В., Безуглова О.С.* Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026. <https://doi.org/10.1134/S1064229319080040>
22. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. М., 2021. <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282?print=1> (дата обращения 05.08.2022).
23. Экономико-географическая характеристика Приволжского федерального округа. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2014. 71 с.
24. *Jiang Y., Chao S., Jianwei L., Yang Y.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China // Chemosphere. 2017. V. 168. P. 1658–1668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.088>
25. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton: Crc. Press, 2010. 548 p.
26. *Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Korlyakov I.D., Kasimov N.S.* Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development // Sci. Total Environ. 2018. V. 636. P. 854–863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.308>

Heavy Metals in Urban Soils of the Volga Federal District: a Conjugate Analysis of Official Data

T. A. Paramonova^{1, 2, *}, G. M. Chernogaeva^{1, 3}, N. N. Lukyanova⁴, and M. S. Paramonov⁵

¹*Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, 107258 Russia*

²*Soil Science Faculty, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

⁴*Scientific and Production Association "Typhoon", Obninsk, 249038 Russia*

⁵*Biology Faculty, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: tparamonova@soil.msu.ru*

Based on a conjugated analysis of the official data of Roshydromet on the content of priority heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni) in the soils of 23 cities of the Volga Federal District, as well as Rosstat data on the socio-economic indicators of these settlements, the ecological and geochemical characteristics of urbanozems (Urbic Technosols) and with the help of multivariate statistical analyzes (cluster and factorial), possible relationships between soil pollution parameters and urban features of cities were revealed. For the soils of most cities in the region with average socioeconomic indicators, admissible levels of accumulation of Cd, Pb, Zn, and Cu have been established, which, in terms of concentrations, are close to the average abundance of urban soils in Russia. In small and medium-sized cities of the Republic of Bashkortostan, exceedances of APC Ni in soils are recorded, which reflects the presence of a regional geochemical anomaly of natural and anthropogenic nature in the eastern part of the Volga Federal District, but no correlations between nickel pollution and socio-economic indicators of settlements are revealed. The moderately hazardous level of complex pollution in urbanozems with dominant accumulation of Cd and significantly lower concentration ratios of other heavy metals (Belebey, Davlekanovo, Dzerzhinsk) shows no correlation with the demographic indicators of settlements. The more complex profile of soil pollution (Cd–Zn in Penza or Cu–Cd–Zn in Mednogorsk) shows lower values of the total fertility rate and higher values of the mortality rate (compared with the average regional indicators). In general, using the example of the cities of the Volga Federal District, it is shown that the gradients of increasing concentrations in soils of Cd, Pb, Zn, Cu and the total pollution index Z_c are co-directional with an increase in the general mortality rate of the population.

Keywords: soil contamination, urban soils (Urbic Technosols), ecological-geochemical assessment, cluster analysis, principal component analysis