

УДК 504.06:631.416.9

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ГОРОДА ЧЕЛЯБИНСКА РВ, ZN И CD

<sup>1,2</sup>Смагин А.И., <sup>1</sup>Маркова Л.М.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск, e-mail: odou@csu.ru;

<sup>2</sup>ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики», Озерск, e-mail: subi@subi.su

Город Челябинск является крупнейшим промышленным центром нашей страны. На территории города находится несколько действующих гигантов черной и цветной металлургии. Выбросы предприятий приводят к загрязнению тяжелыми металлами территорий в зонах воздействия, включая как промышленные, так и селитебные территории. В последние 30 лет на территории города комплексных исследований загрязнения почв тяжелыми металлами не проводилось. Целью исследования являлось определение современных уровней техногенного загрязнения почв Челябинска свинцом, цинком и кадмием. Для определения воздействия выбросов крупных предприятий (стационарных источников) отбор образцов проводили на селитебной территории города. Образцы отбирали на условно нетронутых участках, вдали от магистральных дорог – внутри жилых микрорайонов и в зеленых зонах из верхнего пятисантиметрового слоя почвы. Точки отбора распределяли по сетке 500 • 1000 м. Химическое разложение проб проводили с использованием стандартных методов. Концентрации тяжелых металлов Pb, Zn, Cd определяли на атомно-абсорбционном анализаторе Квант-2М. Определение уровня техногенного загрязнения почв тяжелыми металлами проводили, сравнивая абсолютные значения измеренных концентраций с величиной общегородского геохимического фона, который определяли как среднее геометрическое ( $C_g$ ). Было установлено, что концентрации всех исследованных поллютантов имеют большой вариационный размах. На 50% территории жилой застройки наблюдается превышение естественного фона у всех исследованных элементов. Гетерогенные выбросы предприятий города представляют опасность для населения. Наиболее опасным из исследованных поллютантов является Cd, относящийся к элементам первого класса токсикологической опасности.

**Ключевые слова:** почвы, тяжелые металлы, концентрации, уровень регионального фона, г. Челябинск

## SOIL POLLUTION OF THE CITY OF CHELYABINSK PB, ZN AND CD

<sup>1,2</sup>Smagin A.I., <sup>1</sup>Markova L.M.

<sup>1</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, e-mail: odou@csu.ru;

<sup>2</sup>South Ural Institute of Biophysics, Ozersk, e-mail: subi@subi.su

The city of Chelyabinsk is the largest industrial center of our country. On the territory of the city there are several operating giants of the domestic ferrous and non-ferrous metallurgy. Emissions from enterprises lead to heavy metal contamination of the territory in the impact zones, including both industrial territories and residential territories. In the last 30 years, no comprehensive studies of soil contamination with heavy metals have been conducted in the city. The aim of the study was to determine the current levels of technogenic soil pollution in Chelyabinsk Pb, Zn, Cd. To determine the impact of emissions from large enterprises (stationary sources), sampling was carried out on the residential territory of the city. Samples were taken in areas untouched by humans, away from main roads – inside residential neighborhoods and in green areas from the upper five-centimeter soil layer. The sampling points were distributed over a grid of 500 • 1000 m. Chemical decomposition of the samples was carried out according to the Guidelines using standard methods. Concentrations of heavy metals Pb, Zn, Cd, were determined by the Quantum-2M atomic absorption analyzer. The level of technogenic soil contamination with heavy metals was determined by comparing the absolute values of the measured concentrations with the value of the citywide geochemical background, which was determined as the geometric mean ( $C_g$ ). It was found that all the pollutants studied have a large variation range. In 50% of the residential development area, there is an excess of the natural background in all the studied elements. Heterogeneous emissions from the city's enterprises pose a danger to the population. The most dangerous of the pollutants studied is Cd, which belongs to the elements of the first class of toxicological hazard.

**Keywords:** soils, heavy metals, concentrations, the level of the regional fund, the city of Chelyabinsk

В условиях техногенеза нарастает воздействие человека на окружающую среду, увеличиваются выбросы загрязняющих веществ промышленных предприятий в атмосферу. Почва является долговременно депонирующей средой и накапливает поллютанты, являясь маркером многолетнего загрязнения [1]. В то же время почвы выполняют значимую роль в процессах устойчивого функционирования биосферы [1, 2]. По данным ООН тяжелые металлы являются наиболее опасными загрязнителями городских почв [3]. Загрязнение почвенного покрова приводит к изменениям в структуре

самих почв, угнетению роста растений, вызывает токсические испарения и др. [4, 5]. Выращивание на загрязненных почвах сельскохозяйственной продукции ведет к поступлению поллютантов в организм человека и может вызвать различные заболевания. Выявлена корреляция между химическим загрязнением почвы и заболеваемостью населения [6, 7]. В связи с этим изучение особенностей накопления и распределения тяжелых металлов в почве является приоритетным направлением современных исследований состояния почвенного покрова урбоэкосистем [8].

На территории России можно выделить ряд промышленных центров с неблагоприятной экологической обстановкой, к которым относится и Челябинск [5]. В последние 30 лет на территории Челябинской городской агломерации комплексных почвенно-геохимических исследований не проводилось.

Цель исследования – определение современных уровней концентрации техногенных Pb, Zn, Cd в почвах города Челябинска.

#### Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись почвы на территории г. Челябинска, а предметом – оценка загрязнения почв города техногенными Pb, Zn, Cd.

Площадь, занимаемая г. Челябинском, составляет более 500 км<sup>2</sup> и отличается высоким разнообразием подстилающих материнских пород, являющихся источником формирования естественного фонового уровня концентрации тяжелых металлов в почвах.

Исследуемые поллютанты широко распространены в земной коре.

**Свинец.** Относится к элементам IV группы и имеет халькофильные свойства, слабую растворимость гидроксидов и оксидов в воде и склонность к образованию связей с кислородом. В земной коре распространен в форме галенита PbS, в котором присутствует в виде Pb<sup>2+</sup>, встречается кислая форма Pb<sup>+4</sup>. Свинец может образовывать и другие минералы, плохо растворимые в воде. По геохимическим свойствам Pb<sup>2+</sup> близок к группе двухвалентных щелочно-земельных элементов, поэтому он способен замещать Ba, Sr и даже Ca как в минералах, так и в сорбционных позициях. Накапливается в кислых сериях магматических пород, где концентрация элемента колеблется от 10 до 40 мг/кг. Максимальные концентрации Pb в глинах достигают 20–40 мг/кг, в кислых гранитах и гнейсах 15–24 мг/кг, а в ультраосновных породах и известковистых осадках 0,1–10 мг/кг. Естественные содержания Pb в почвах зависят от содержания элемента в материнских породах [9].

**Цинк.** Относится к элементам II группы и входит в состав пород в виде простого сульфида ZnS, а также замещает Mg<sup>2+</sup> в силикатах. В магматических породах концентрация Zn колеблется от 40 до 120 мг/кг, а в глинистых осадках и сланцах от 80–120 мг/кг, в песчаниках и карбонатных породах 10–30 мг/кг. Основной и наиболее подвижной формой Zn в почвах является Zn<sup>2+</sup>, хотя в почвах могут присутствовать другие ионные формы элемента. Ионы Zn легко ад-

сорбируются как минералами, так и органическими компонентами, что способствует его аккумуляции в поверхностных горизонтах большинства типов почв. В кислых средах скорость образования иона цинка возрастает. Концентрация Zn в поверхностных слоях почв промышленно развитых стран колеблется в пределах 17–125 мг/кг, а диапазон колебаний составляет от 54 до 570 мг/кг. Баланс Zn в поверхностных слоях почв в различных экосистемах показывает, что атмосферное поступление этого металла превышает его вынос за счет выщелачивания и образования биомассы [9].

**Кадмий.** Относится к элементам II группы. Геохимия кадмия тесно связана с геохимией Zn. Отличием является более высокая подвижность Cd в кислых средах. По поведению в окружающей среде Cd больше сходен с S. Кадмий образует изотипичные соединения, соответствующие соединениям таких катионов, как Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и в некоторых случаях Ca<sup>2+</sup>.

В процессе выветривания пород Cd легко растворяется в воде и присутствует в растворе в виде Cd<sup>2+</sup>. Элемент образует комплексные ионы (CdCl<sup>+</sup>, CdOH<sup>+</sup>, CdHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, CdCl<sub>3</sub><sup>-</sup>, CdCl<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cd(OH)<sup>3-</sup> и Cd(OH)<sub>4</sub><sup>2-</sup>), а также органические хелаты. Валентное состояние кадмия в природных средах +2. Подвижность Cd во многом определяется pH среды и окислительно-восстановительным потенциалом. В кислых средах Cd способен образовывать собственные минералы (CdO, CdCO<sub>3</sub>), а также накапливаться в фосфатах и биогенных осадках (биолитах). В магматических и осадочных породах концентрация элемента не превышает 0,3 мг/кг, а в глинистых почвах, на сланцах и лессах может возрастать до 0,6–0,7 мг/кг [9].

Главный фактор, определяющий содержание Cd в почвах, – химический состав материнских пород. Средние концентрации Cd в почвах стран мира варьируют в диапазоне 0,07 и 1,1 мг/кг. При этом фоновые уровни Cd в почвах, как правило, не превышают 0,5 мг/кг, а все более высокие значения свидетельствуют об антропогенном вкладе в содержание Cd в верхнем слое почв.

Исследования концентраций Pb, Zn, Cd проводили в 2018–2021 гг. общепринятыми методами согласно ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ Р 58595-2019. Образцы почвы отбирали по регулярной сетке с шагом 500×1000 м почвенным буром БП-1 (ГОСТ 17.4.4.02-2017). Поскольку в результате аэриального загрязнения земной поверхности тяжелые металлы накапливаются в верхнем

слое почвы, откуда слабо мигрируют в нижние горизонты, образцы почвы отбирали с глубины 0–5 см [10]. Для оценки влияния выбросов предприятий пробные площадки закладывали внутри жилых микрорайонов и зеленых зон. Отбор производился в местах, не подвергавшихся землеванию и перекопке за последние годы. В недавно застроенных районах пробы отбирали на сохранившихся между жилыми кварта-

лами лесных участках. Всего было отобрано около 200 образцов (рис. 1). Для химического анализа почвенные пробы доставляли в лабораторию экологического мониторинга факультета экологии ЧелГУ. Химическое разложение проб производили согласно РД 52.18.685-2006. Концентрации тяжелых металлов определяли атомно-абсорбционным методом на приборе Квант-2М в соответствии со стандартной методикой.



Рис. 1. Карта-схема отбора почвенных проб на территории г. Челябинска: ЧМК – Челябинский металлургический комбинат; ЧЦЗ – Челябинский цинковый завод; ЧЭМК – Челябинский электрометаллургический комбинат; ЧТПЗ – Челябинский трубопрокатный завод; ТЭЦ 1–3 – Теплоэлектроцентрали

Оценку уровня техногенного загрязнения почв тяжелыми металлами проводили методом сравнения абсолютных значений измеренных концентраций с величиной общегородского геохимического фона, который определяли как среднее геометрическое ( $C_r$ ). Для построения графиков абсолютные значения концентрации поллютантов в почвах Челябинска ранжировали по величине.

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами [11] с использованием программ Microsoft Excel и Statistika 5.5. Построение картосхем выполнено в программе MapInfo Professional.

### Результаты исследования и их обсуждение

Основные общие статистические характеристики измеренных концентраций Pb, Zn, Cd в почвах г. Челябинска приводятся в таблице. Согласно полученным данным, концентрации исследованной группы металлов в почвах варьируют в широком диапазоне: например, у Pb интервал (min-max) значений составляет около трех порядков величины, у Zn и Cd около двух с половиной

порядков. Значительные интервалы в концентрациях элементов в почвах г. Челябинска могут быть вызваны как сложным геологическим строением территории города, так и разницей в интенсивности выпадений, обусловленных выбросами предприятий.

Из-за глобальных процессов загрязнения окружающей среды в районах проживания человека большинство верхних горизонтов почв может быть обогащено техногенным Pb. [10]. Для анализа уровня техногенного загрязнения почв г. Челябинска полученные значения концентраций Pb сравнивали со значениями общего городского геохимического фона –  $C_r$  (рис. 2).

Из представленной на рисунке информации следует, что концентрация свинца имеет значение меньше уровня общегородского фона в 107 обследованных точках, что составляет ~50% обследованной территории, следовательно, около 50% обследованной территории г. Челябинска имеет повышенные уровни загрязнения свинцом техногенного происхождения. Часть территории, ~15%, загрязнена техногенным Pb в 2 и более раза выше фонового уровня.

Статистические характеристики концентраций поллютантов в почве г. Челябинска (мг/кг)

Поллютант	Min,	Max,	Ср. арифмет.	Медиана	Ср. геом. ( $C_r$ )
Pb	14,6	1858,6	91,7	50,1	54,8
Zn	61,2	4279,9	446,0	290,8	316,6
Cd	0,14	82,56	2,30	1,01	1,13

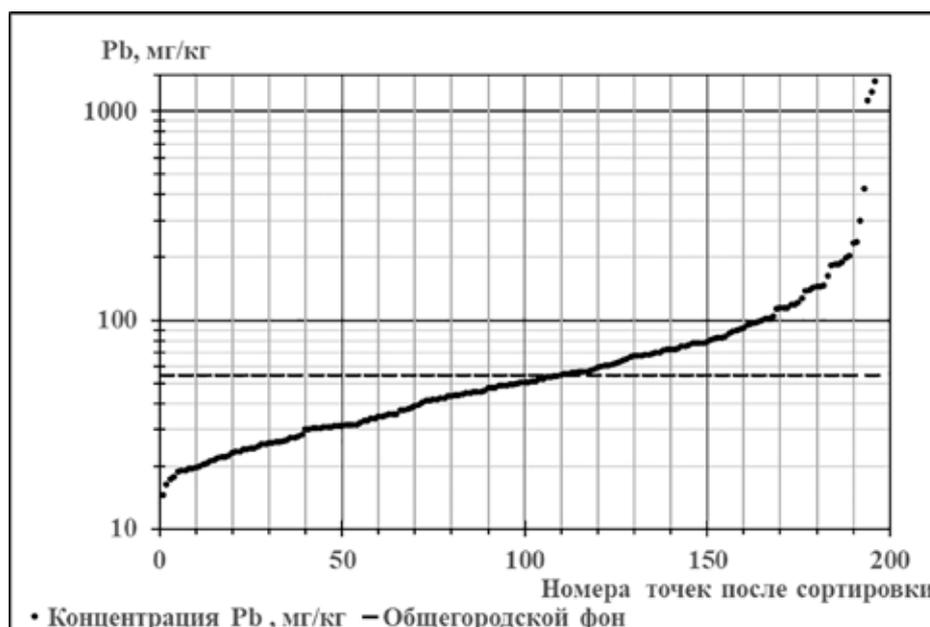


Рис. 2. Распределение концентрации Pb и общегородской фон

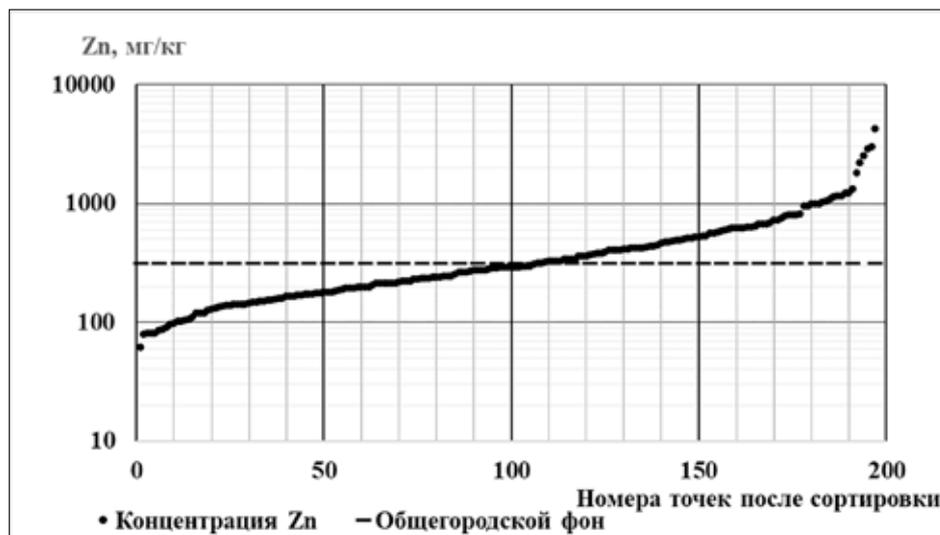


Рис. 3. Распределение концентрации Zn и уровень общегородского фона

Наибольшие концентрации Pb в почвах г. Челябинска были обнаружены на селитебных территориях в районах жилой застройки в шаговой доступности от металлургических предприятий, а фоновые — в почвах новостроек, значительно удаленных от предприятий.

В России производство этилированного бензина было запрещено в конце 2002 г. (Постановление ГД ФС РФ от 15.11.2002). Несмотря на это, свинец, поступающий в окружающую среду в составе тетраэтилсвинца с выбросами автотранспорта, до настоящего времени присутствует в почве на придорожных участках вблизи крупных магистралей и на дворовых территориях кварталов, построенных 70–80 лет назад [8]. Естественные концентрации Pb в верхних горизонтах различных почв стран мира колеблются в пределах 3–189 мг/кг при средних значениях для различных типов почв 10–67 мг/кг, при общем среднем 32 мг/кг. Это дает основание заключить, что 85% территории г. Челябинска загрязнено Pb выше средних мировых показателей.

На рис. 3 представлено распределение концентраций Zn в почвах города.

Концентрация Zn в почве превышает общегородской фон в 94 обследованных точках, что составляет около 47% от обследованной территории. Концентрации цинка в пробах варьируют в широком диапазоне и различаются на отдельных участках внутри городской черты более чем в 100 раз. Часть обследованной территории, ~15%, загрязнена техногенным цинком выше общегородского фона более чем на порядок величины.

Источником поступления цинка в атмосферу г. Челябинска может служить не только ОАО «ЧЦЗ», но и предприятие «Оксид», где производится ZnO. Кроме того, источником цинка может служить оцинкованный металлолом, используемый при производстве сталей в конвертерах и электродуговых печах на ПАО «ЧМК». Средние значения концентраций Zn в поверхностных слоях почв ряда стран, включая США, колеблются в пределах 17–125 мг/кг. Эти показатели могут рассматриваться как региональные фоновые концентрации. Приведенные значения намного ниже, чем оцененные нами уровни городского фона в г. Челябинске (316,6 мг/кг). Полученные нами уровни колебаний концентраций Zn в почвах г. Челябинска (таблица) также превышают значения этого показателя в Южном Китае (54–570 мг/кг) [9].

Из всех проанализированных поллютантов наибольшую опасность представляет Cd, являющийся элементом 1 класса. Допустимая концентрация элемента для нейтральных суглинистых и глинистых почв 2 мг/кг. На рис. 4 представлены результаты исследования уровня загрязнения почв г. Челябинска техногенным Cd.

Представленные на рисунке данные свидетельствуют о том, что на обследованной территории концентрация Cd в почвах, как и у Pb и Zn, превышает общегородской фон на 50% площади. Концентрации кадмия в образцах почвы варьируют в широком диапазоне, отдельные образцы различаются по этому показателю почти в 100 раз. На части территории (~5%) концентрация техногенного Cd выше фоновых значений в 10 и более раз.

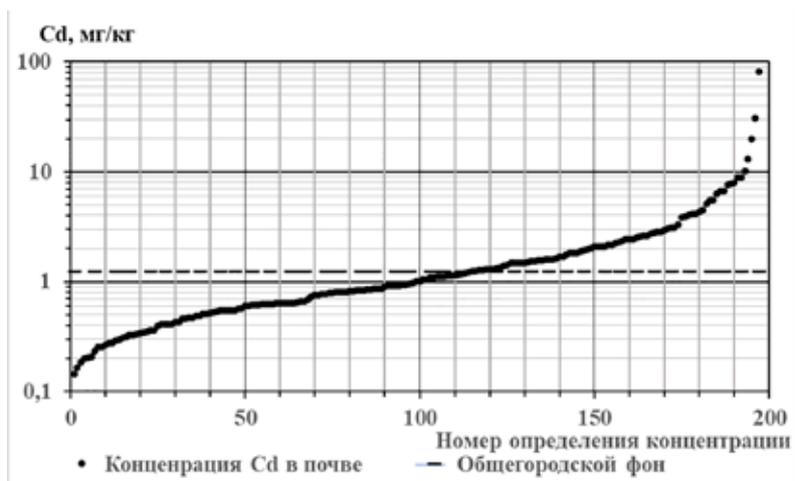


Рис. 4. Распределение концентрации Cd и общегородской фон

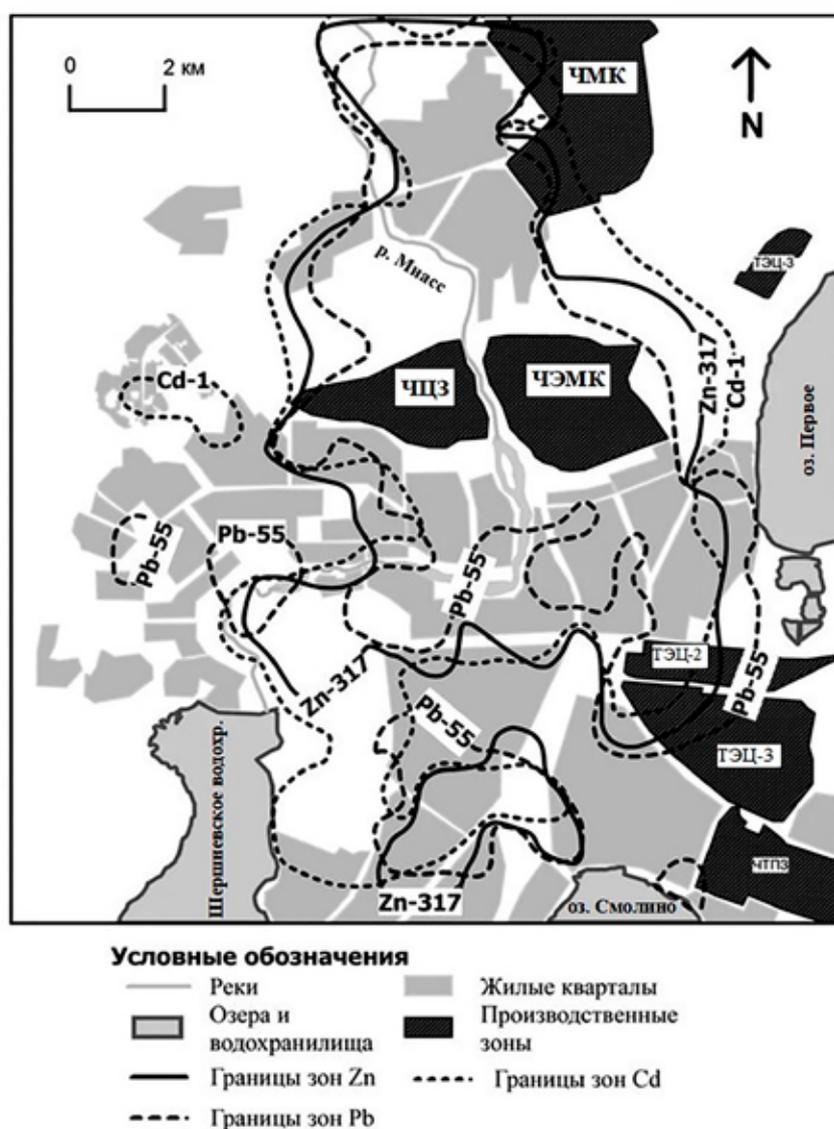


Рис. 5. Карта-схема территорий, загрязненных техногенными металлами в результате выбросов предприятий

Источником выбросов кадмия является ОАО Челябинский цинковый завод, товарным продуктом которого, наряду с цинком, является и металлический индий и кадмий. Наибольшим уровнем загрязнения Cd характеризуется территория северо-восточной части города, примыкающая к промышленным зонам ЧЦЗ и ЧЭМК. В целом большая часть этой аномалии (по концентрации выше 3 мг/кг) находится вне жилых кварталов и приходится на производственную и коммунально-складскую зону и гаражные кооперативы. Также в зоне воздействия находятся зеленые зоны специального пользования (Успенское кладбище) и территории, не включенные в реестр зеленых насаждений города Челябинска – Першинский лес. Высокие уровни загрязнения Cd имеют территории одноэтажной застройки, примыкающие к металлургическому комбинату.

Анализ результатов исследования загрязнения почвы г. Челябинска Pb, Zn, Cd позволил выявить зоны города, в которых наблюдается превышение естественного фона (рис. 5).

Самый крупный ареал техногенного загрязнения, где были обнаружены повышенные концентрации всех трех поллютантов, располагается на запад от ЧМК, а также южнее и севернее предприятий ЧЦЗ, ЧЭМК. Наибольшему загрязнению подвергается практически вся территория Металлургического района, восточные части Курчатовского, Калининского и Центрального районов, частично западная часть Ленинского района. Отдельные пятна загрязнения были выявлены на западе г. Челябинска в Курчатовском районе. Еще одно пятно загрязнения было обнаружено в Советском районе.

### Заключение

В результате выполненных исследований было установлено, что концентрации металлов в почвах г. Челябинска варьируют в широком диапазоне. Интервал (min-max) значений концентрации Pb составляет около трех порядков величины, а у Zn и Cd около двух с половиной порядков. Значительные различия в концентрации тяжелых металлов в почвах могут быть обусловлены не только выбросами предприятий, но и поступлением химических элементов в процессе выветривания из подстилающих пород. Определенный нами уровень геохимического фона на территории г. Челябинска составляет для Pb – 54,8 мг/кг, Zn – 316,6 мг/кг и Cd – 1,13 мг/кг. Сравнивая концентрации Pb, Zn и Cd в почвах города с уровнем геохимического фона, было уста-

новлено, что на 50% территории наблюдается превышение показателя  $C_p$ , вызванное техногенным загрязнением.

Наибольшую опасность из исследованной группы тяжелых металлов представляет Cd, вариационный размах концентраций которого велик, а около четвертой части почв городской территории имеют уровень загрязнения выше допустимой концентрации. Основным источником выбросов Cd является ОАО «ЧЦЗ».

В настоящее время на предприятиях г. Челябинска активно внедряются новые технологии газоочистки, позволяющие снизить уровень выбросов.

Нами получены данные об уровнях загрязнения почв города тяжелыми металлами, характеризующие интенсивность и пространственное распределение аэротехногенных потоков. Выделены относительно незагрязненные участки и наиболее проблемные зоны, на которых необходимо провести тщательные обследования уровней загрязнения почвы и постоянно осуществлять мониторинг воздушной среды. Полученные результаты могут быть использованы для разработки мероприятий по защите здоровья населения.

### Список литературы

1. Добровольский Г.В., Чернов И.Ю., Бобров А.А., Гонгальский Г.В. Добровольская Т.Г., Лысак Л.В., Онипченко В.Г., Гонгальский К.Б., Зайцев А.С., Терехова В.А., Соколова Т.А., Терехин В.Г., Шмарикова Е.В., Чернова О.В. Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия: кол. монография / Отв. ред. Г.В. Добровольский, И.Ю. Чернов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 273 с.
2. Орлова К.С., Савин И.Ю. Обзор экологических функций почв для оценки экологического состояния почвенного покрова в городской среде // Здоровые почвы – гарант устойчивого развития: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Курск, 18–19 апреля 2022 г.). Курск: Издательство Курский государственный университет, 2022. С. 25–26.
3. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.
4. Селокова С.В. Тяжелые металлы в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 8. С. 85–93.
5. Семенов А.И., Кокшаров А.В., Погодин Ю.И. Содержание тяжелых металлов в почве г. Челябинска // Медицина труда и экология человека. 2015. № 3. С. 184–191.
6. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
7. Узаков З.З. Тяжелые металлы и их влияние на растения // Символ науки. 2018. № 1–2. С. 52–53.
8. Ясовеев М.Г., Стреха Н.Л., Пацкайлик Д.А. Экология урбанизированных территорий. Минск: ИНФРА-М, 2015. 292 с.
9. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
10. Водяницкий Ю.Н. Обобщенная характеристика распределения тяжелых металлов в почвенном профиле // Агрохимия. 2014. № 6. С. 77–83.
11. Шелутко В.А. Методы обработки и анализа геоэкологической информации. СПб.: РГТУ, 2020. 296 с.