

УДК 504.064.2, 631.42

DOI: 10.15372/ChUR20202560

## Анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в почвах зоны влияния Новосибирского оловянного комбината

С. С. ШАЦКАЯ<sup>1</sup>, А. Ю. КРАСОВСКАЯ<sup>2</sup>, И. В. СТОРОЖКО<sup>2</sup>, Е. А. УДАЛЬЦОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
Новосибирск (Россия)

E-mail: lana46@ngs.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск (Россия)

(Поступила 26.02.20; после доработки 20.07.20)

### Аннотация

Исследована проблема загрязнения почв крупного мегаполиса тяжелыми металлами. Определено содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах промышленной зоны Кировского района г. Новосибирска на территории влияния металлургического предприятия – ООО “Новосибирский оловянный комбинат” (НОК). Химический анализ проведен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и методом атомной абсорбции. Показано, что в анализируемых образцах превышены предельно допустимые концентрации (ПДК) Cr, Ni, Zn, Pb, Cu. По мере удаления от предприятия содержание тяжелых металлов снижается, но превышение их ПДК прослеживается даже в районе естественной парковой зоны. При расчете накопления подвижных форм тяжелых металлов в почве промышленной зоны вблизи НОК для As значения ПДК приняли равным предельно допустимому превышению (ПДП). Выявлен ряд накопления подвижных форм тяжелых металлов в почве промышленной зоны вблизи НОК по рассчитанным коэффициентам концентрации: Cr < Ni < Zn < Pb < Cu < As. Категория загрязнения почв согласно суммарному показателю загрязнения характеризуется как опасная.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, экотоксиканты, аккумуляция, миграция в почве

### ВВЕДЕНИЕ

В результате стремительно развивающейся промышленной деятельности, повсеместной урбанизации и индустриализации проблема загрязнения почв регионов России тяжелыми металлами (ТМ) растет из года в год [1–4].

Тяжелые металлы представляют собой наиболее опасные неорганические ксенобиотики антропогенного происхождения [5]. Опасность ТМ заключается в том, что они не подвергаются деградации, а только переходят из одного соединения в другое. Попадая в почву, ТМ накапливаются в ней, ведут себя как экотоксиканты, способны передаваться по пищевым цепям в организм человека [6]. Некоторые ТМ помимо

прямого токсического действия на живые организмы способны вызывать канцерогенные, мутагенные и тератогенные эффекты [7–9]. Согласно данным Международного агентства по изучению рака, работающего под контролем Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), мышьяк, кадмий и его соединения классифицируются как канцерогены группы 1 (канцерогенные для человека); свинец и никель – группы 2 (вероятно канцерогенные для человека).

Горнодобывающая промышленность и предприятия цветной металлургии относятся к основным источникам поступления ТМ в окружающую среду [10–12]. Крупное предприятие ООО “Новосибирский оловянный комбинат” (НОК) оказывает техногенное воздействие на

объекты окружающей среды г. Новосибирска. Предприятие функционирует с 1942 года, производя олово, баббиты и сплавы на основе олова, свинца, меди и сурьмы. Главное достижение завода – выпуск олова сверхчистоты (99.9999 %).

Характер технологического процесса НОК, несовершенные системы очистки и нерациональная утилизация отходов обогащения привели к масштабному загрязнению близлежащей территории. Для определения основных веществ, поступающих в окружающую среду, проведен анализ технологического процесса производства олова [13]. Технологическая схема включает в себя следующие этапы: доводка оловянных концентратов, обжиг, восстановительная плавка, рафинирование. В процессе производства олова выделяется ряд токсичных веществ: оксиды серы, соединения мышьяка, свинца, меди, цинка и железа. Основной путь поступления ТМ в окружающую среду – их выброс в атмосферу при высокотемпературных технологических процессах. В то же время на занимаемой комбинатом территории накоплены большие объемы отходов обогащения. Содержащиеся в них соединения ТМ могут переноситься ветром на большие расстояния и выщелачиваться осадками, загрязняя почву.

Проблема загрязнения окружающей НОК территории была рассмотрена ранее: исследовано аэрозольное загрязнение воздуха (2002 г.) [14] и снежного покрова (2013 г.) [15], определено валовое содержание ТМ в почве в зоне влияния предприятия (2004 г.) [16]. Однако в силу буферной способности почв валовое содержание ТМ не является информативным показателем наличия реальной опасности загрязнения. Наиболее опасные последствия для человека связаны с наличием подвижных форм элементов в почве [17, 18]. Анализ содержания мобильных форм ТМ позволяет оценить биологическую доступность, возможность миграции элементов в почве и выщелачивание в другие среды (грунтовые и поверхностные воды).

Необходимость исследования почв на содержание подвижных форм ТМ в Кировском районе г. Новосибирска объясняется тем, что на рассматриваемой территории находятся действующие дачные участки и рекреационная зона – парк культуры и отдыха “Бугринская роща”. На расстоянии 1 км от НОК ведется интенсивная многоэтажная жилая застройка. Также следует учитывать тот факт, что к 2030 г. планируется вынос производства НОК за территорию города

с последующей рекультивацией и поэтапным перепрофилированием территории, занимаемой комбинатом, под общественно-деловую, торговую, производственную застройку [19].

Цель данной работы – экологическая оценка уровня загрязнения почв ТМ в подвижной форме в зоне влияния предприятия цветной металлургии – НОК.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Отбор проб почв

Новосибирский оловянный комбинат – один из наиболее мощных источников техногенного загрязнения окружающей среды в Кировском районе. На территории, оказавшейся в зоне влияния комбината, было выбрано 9 пробных площадок в северо-восточном направлении от предприятия таким образом, чтобы охватить все типы городских зон: промышленные, жилые и рекреационные. Одна проба почвы была отобрана в южном направлении от комбината для оценки ориентировочного уровня загрязнения территории в направлении, которое не являлось предметом исследования. В результате плотной городской застройки большая часть почвы находится под асфальтом, что делает невозможным отбор почвенных образцов с каким-либо определенным интервалом расстояний от НОК.

Отбор, обработка и хранение проб почв проводились в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 17.4.4.02-2017, согласно которому пробные площадки намечались вдоль векторов повторяемости направлений ветра. В Новосибирске ветра преимущественно дуют с юга и юго-запада [20]. Для исследования было выбрано северо-восточное направление от промышленной площадки, поскольку именно по направленности преобладающего юго-западного ветра располагаются новые строящиеся многоэтажные дома, а также дачные участки, на которых выращивается загрязненная ТМ продовольственная продукция.

Рельеф местности – другой существенный фактор, который повлиял на выбор северо-восточного направления для изучения степени загрязнения почв. В данном районе высота местности снижается по мере приближения к р. Оби. Следовательно, ТМ в подвижной форме, находясь в виде свободных ионов в почвенном растворе, мигрируют и выщелачиваются в сторону снижения рельефа.

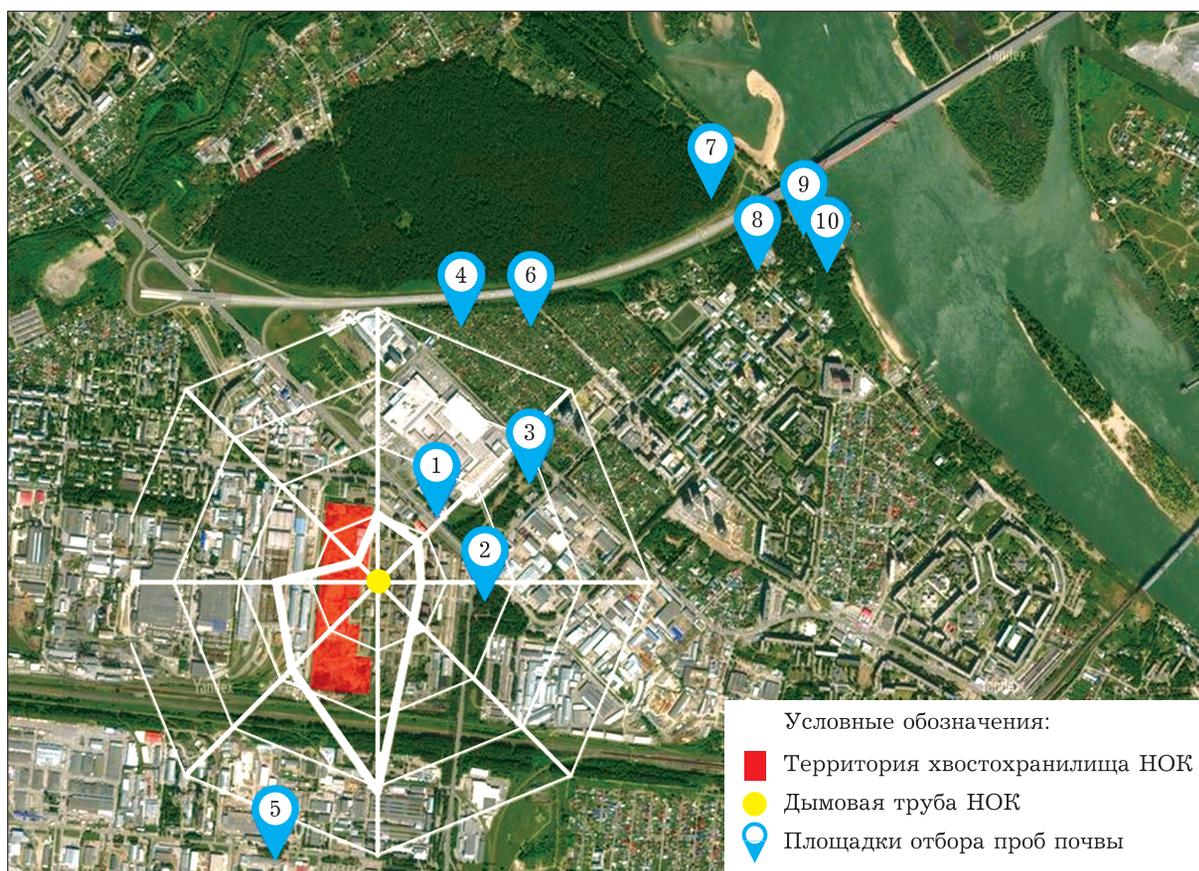


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб относительно Новосибирского оловянного комбината (НОК) с указанием диаграммы повторяемости направлений ветра за период 1966–2018 гг.

Расположение точек отбора проб, диаграмма повторяемости направлений ветра (роза ветров) за период 1966–2018 гг. представлены на рис. 1. Точка штиля розы ветров совмещена с дымовой трубой НОК.

Отбор проб почв проводили в сентябре 2018 г. В соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.4.02-2017 пробы почв отбирали на пробной площадке  $1 \times 1$  м методом конверта с глубины 0–20 см на расстоянии 0.5–2.4 км относительно НОК. Отобранные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре и влажности лабораторного помещения, протирали пестиком в ступке до однородности и просеивали через капроновое сито (1 мм).

Для определения фоновых концентраций металлов были отобраны пробы почвы в устье р. Ельцовки (Ордынский район, Новосибирская обл., координаты  $54.443188^{\circ}\text{N}$ ,  $82.308552^{\circ}\text{E}$ ). Данная точка, значительно удаленная от промышленных и сельскохозяйственных предприятий, в исследованиях по химии окружающей среды часто служит для отбора контрольных образцов

почвы, воды и воздуха, не подвергнутых техногенному воздействию [21, 22].

#### Аналитические методы

Химический анализ проб был проведен в лаборатории интеркаляционных и механохимических реакций Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН, Новосибирск).

Содержание подвижных форм ТМ определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргонной плазмой (ИСП-МС) с помощью масс-спектрометра Agilent 7500A (Agilent Technologies, Япония) и методом атомной абсорбции с использованием спектрометра AA-280 FS (Varian, Австралия) в соответствии с методикой ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 “Количественный химический анализ почв”. Поскольку приборы предназначены для анализа жидких проб, твердые образцы были переведены в раствор. Подвижные формы элементов из анализируемых образцов извлекались раствором азотной кислоты ( $1 \text{ моль/дм}^3$ ). Для каждой экспериментальной

точки проведено три параллельных измерения, по среднему значению рассчитано содержание элементов в пробе.

Также в ходе исследования были измерены некоторые почвенные характеристики, которые влияют на подвижность ТМ. К ним относятся содержание органического вещества, реакция среды и водный режим почвы. Процентное содержание органического вещества определяли путем прокаливания навесок почв в муфельной печи согласно ГОСТ 27784-88, значения рН почв – электрометрическим методом согласно ГОСТ 26423-85, влажность почвы – путем высушивания проб в сушильном шкафу до постоянной массы в соответствии с ГОСТ 5180-2015.

Уровень загрязнения почв устанавливали путем сравнения полученных концентраций ТМ в подвижной форме с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) согласно гигиеническим нормативам ГН 2.1.7.2041-06. Стоит отметить, что для мышьяка, одного из самых токсичных элементов, ПДК не установлена. В работе [23] обсуждаются данные исследования нидерландских экологов [24], на основании которых нормирование подвижных форм ТМ в почве проводится по предельно допустимому превышению (ПДП). Данный показатель установлен для большего набора ТМ (17 элементов). Сравнение значений ПДП для некоторых ТМ (Cr, Ni, Zn, Cu), ПДК для которых установлены в России, показывает, что величины ПДК и ПДП близки. Это позволяет использовать значения ПДП для оценки уровня загрязнения почв теми элементами, для которых ПДК отсутствуют. Таким образом, полученные концентрации ТМ будут сравниваться для элементов Cu, Pb, Ni, Cr, Zn со значениями ПДК, равными 3, 6, 4, 6, 23 мг/кг соответственно, а для As – с ПДП, равным 4,5 мг/кг.

Для экологической оценки состояния почв рассчитаны коэффициенты концентрации химического вещества ( $K_c$ ) и суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ).

Коэффициент концентрации химического вещества  $K_c$  определяется как отношение фактической концентрации элемента ( $C_i$ ) в рассматриваемой пробе к фоновой концентрации данного элемента ( $C_{\phi i}$ ):

$$K_c = C_i / C_{\phi i}$$

Суммарный показатель загрязнения почвы  $Z_c$  рассчитывается по формуле

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_{ci} - (n - 1)$$

где  $K_{ci}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го компонента загрязнения;  $n$  – число учитываемых загрязняющих веществ.

Согласно методическим указаниям МУ 2.1.7.730-99 “Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест” выделяют четыре категории опасности химического загрязнения почв по значениям суммарного показателя загрязнения  $Z_c$ : допустимая ( $Z_c < 16$ ), умеренно опасная ( $16 < Z_c < 32$ ), опасная ( $32 < Z_c < 128$ ), чрезвычайно опасная ( $Z_c > 128$ ).

Математико-статистическая обработка полученных данных проводилась при помощи программы Microsoft Excel и включала в себя вычисление среднего арифметического, стандартного отклонения и других статистических параметров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируемые почвы характеризуются нейтральной, слабощелочной и щелочной реакцией, значения водородного показателя (рН) изменяются в пределах 6.9–8.5. В нейтральных почвах (рН 6.6–7.0) мобильны соединения As и Zn. При увеличении рН подвижными становятся анионообразующие элементы (Cr, V, Mo и др.). В кислых почвах подвижность катионообразующих металлов растет (Zn, Cu, Pb и др.) [11].

Накопление подвижных форм элементов зависит от водного режима почв, который характеризуется влажностью. Влажность исследуемых образцов варьируется в пределах 6–23 %, следовательно, для почв характерен непромывной режим. В таких условиях ТМ накапливаются активнее, чем в почвах с промывным режимом, поэтому доля потенциально подвижных ТМ возрастает [12].

Твердая фаза почвы состоит из органической и минеральной частей. Высокое содержание органического вещества в почве позволяет образовывать комплексные соединения с ТМ, которые менее доступны для растений. Процентное содержание органической части исследуемых почв находится в диапазоне 10–29 %. Это означает, что опасность накопления избыточного количества подвижных форм элементов в растениях выше, чем в почвах с большим содержанием органического вещества.

На основании совокупности всех вышеперечисленных почвенных факторов можно сделать вывод, что в исследуемой промышленной зоне г. Новосибирска созданы предпосылки для накопления в почве ТМ.

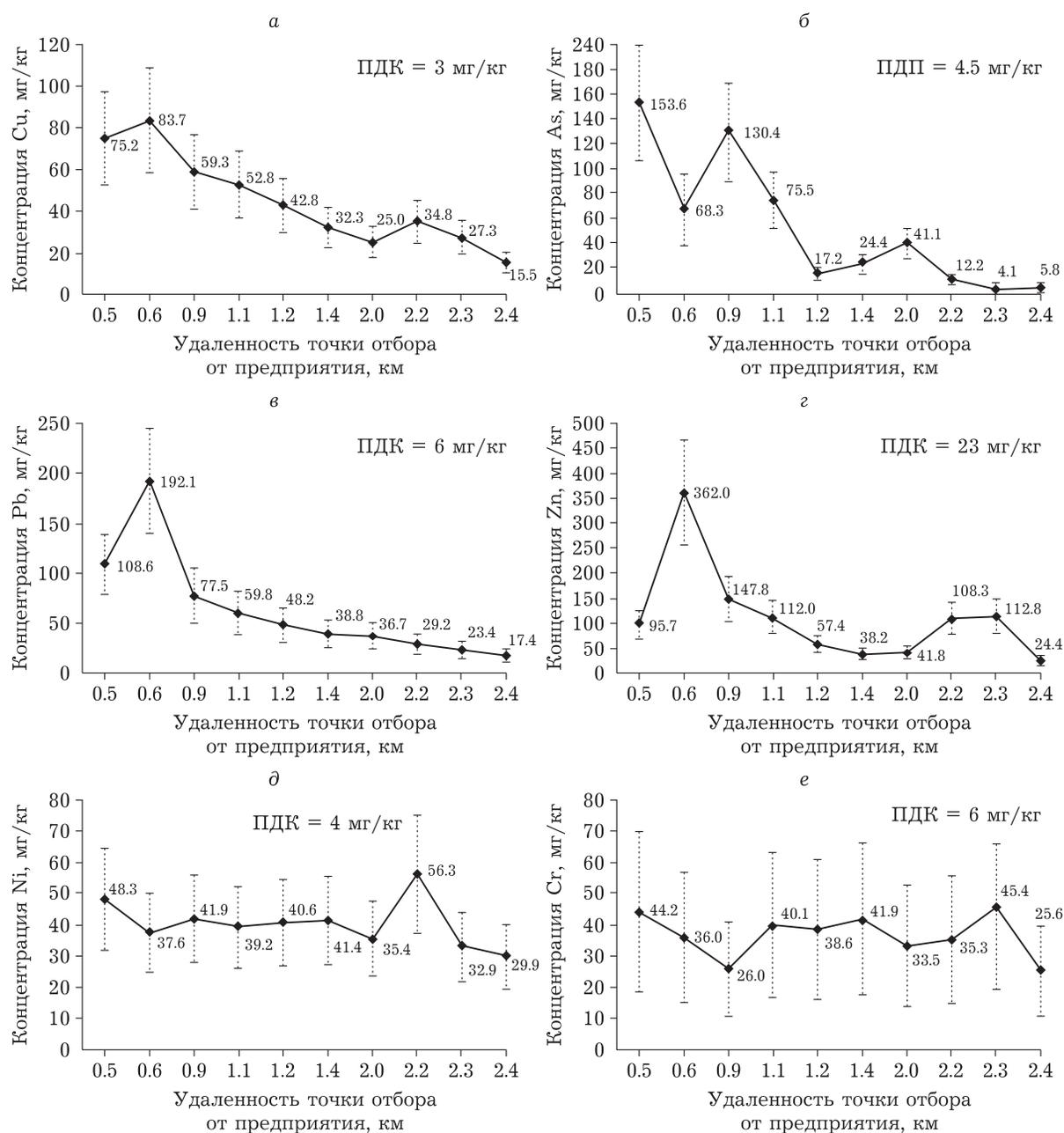


Рис. 2. Зависимость концентраций тяжелых металлов от удаленности точек отбора проб от Новосибирского оловянно-комбината (количество почвенных образцов – 10, количество параллельных измерений – 3,  $P = 0.95$ ).

Поскольку растения поглощают лишь мобильную часть ТМ, то для оценки их токсичности важно иметь представление о содержании элементов в подвижной форме. Концентрации подвижных форм ТМ в исследуемых образцах почв и значения нормативов представлены на рис. 2. Сравнительный анализ результатов исследований с допустимыми концентрациями ТМ показал превышение ПДК Cu, Ni, Cr, Pb, Zn и ПДП As. Следовательно, загрязнение почв в районе влияния металлургического предприятия носит полиэлементный характер.

Наибольшее загрязнение почв медью, цинком, свинцом зафиксировано на расстоянии 0.6 км от НОК. Кратность превышения установленных нормативов для Cu, Zn, Pb составляет 28, 16, 32 соответственно. Максимальная концентрация As (34ПДП) наблюдается в точке на расстоянии 0.5 км, Ni (14ПДК) – на расстоянии 2.2 км, Cr (8ПДК) – на расстоянии 2.3 км. Это объясняется тем, что вблизи завода осаждаются меньше соединений ТМ, поскольку рассеивание загрязняющих веществ зависит от высоты источника выбросов.

ТАБЛИЦА 1

Фоновая концентрация подвижных форм тяжелых металлов в образцах почв для г. Новосибирска (количество контрольных образцов – 5, количество параллельных измерений – 3,  $P = 0.95$ )

Класс опасности вещества	Элемент	Концентрация, мг/кг
1	As	0.98±0.49
	Pb	3.15±1.13
	Zn	8.67±3.81
2	Ni	5.20±2.18
	Cu	2.05±0.86
	Cr	4.75±2.76

Для определения зависимости концентраций ТМ от удаленности точек отбора проб относительно НОК были рассчитаны коэффициенты корреляции: Cu – 0.92; As – 0.8; Pb – 0.79; Zn – 0.51; Ni – 0.28; Cr – 0.18. Данные значения подтверждают тот факт, что НОК загрязняет прилегающую территорию медью, мышьяком, свинцом и цинком. По мере удаления от предприятия их концентрация уменьшается. Загрязнение почв никелем и хромом, вероятно, обусловлено воздействием других техногенных источников. Ответ на данный вопрос требует детального изучения технологических процессов других предприятий, расположенных в данной промышленной зоне.

Результаты определения фоновых концентраций ( $C_{фi}$ ) ТМ в образцах почв для г. Новосибирска представлены в табл. 1. Видно, что за исключением Ni они не превышают ПДК.

Рассчитанные по экспериментально полученным данным коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) для каждого элемента представлены в табл. 2. По этому показателю ряд накопления подвижных форм ТМ в почве промышленной зоны вблизи НОК выглядит следующим образом: Cr < Ni < Zn < Pb < Cu < As.

Суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) для рассматриваемой территории равен 125, что соответствует опасной категории загрязнения почв ( $32 < Z_c < 128$ ). В соответствии с методическими указаниями МУ 2.1.7.730–99 данный уровень загрязнения характеризуется возможным увеличением общей заболеваемости населения, проживающего вблизи предприятия, а также числа людей с хроническими заболеваниями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение почв промышленной зоны г. Новосибирска в районе влияния НОК носит полиэлементный характер. В пределах исследуемой

ТАБЛИЦА 2

Значения коэффициентов концентрации подвижных форм тяжелых металлов (количество образцов – 10,  $P = 0.95$ )

Элемент	Коэффициент концентрации, $K_c$
As	54.3±2.7
Cu	21.9±1.1
Pb	20.1±1.0
Zn	12.7±0.6
Ni	7.8±0.4
Cr	7.7±0.4

территории концентрации подвижных форм Cr, Ni, Pb, Cu, Zn, согласно гигиеническим нормативам, превышают ПДК повсеместно, содержание As не превышает ПДП лишь на расстоянии 2.3 км от оловокомбината.

По суммарному показателю загрязнения почв ТМ, согласно установленным санитарным нормам РФ, почвы относятся к опасной категории химического загрязнения.

Наибольшую опасность представляет загрязнение почв дачных участков Кировского района подвижными формами ТМ, поскольку существует риск миграции ТМ по пищевым цепям через растения в организм человека. Кратность ПДП для As, признанного ВОЗ канцерогеном группы 1, достигает 34ПДП; превышение для Ni и Pb (канцерогены группы 2) – 14ПДК и 32ПДК соответственно.

Выявленное в промышленной зоне загрязнение ТМ свидетельствует о необходимости рекультивации (очистки) загрязненной почвы.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам Института химии твердого тела и механохимии СО РАН А. Л. Бычкову, И. А. Деревягиной и Н. Ф. Глазыриной за помощь в проведении данных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – A review // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 249. P. 200–207.
- 2 Emelyanova N., Naprasnikova E., Sorokovoi A. The ecological state of a large city of Eastern Siberia in the process of urbanization // *Geography and Natural Resources*. 2018. Vol. 39, No. 4. P. 324–331.
- 3 Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: A case study of Tyumen, Russia // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 239. P. 366–375.

- 4 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 // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 636. P. 854–863.
- 5 Singh N., Gupta V., Kumar A., Sharma B. Synergistic effects of heavy metals and pesticides in living systems // *Frontiers in Chemistry*. 2017. Vol. 5, Article 70. DOI: 10.3389/fchem.2017.00070
- 6 Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng Y. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 695, Article 13893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>
- 7 Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B. B. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. Vol. 7, No. 2. P. 60–72.
- 8 Al-Saleh I., Al-Rouqi R., Elkhatib R., Abduljabbar M., Al-Rajudi T. Risk assessment of environmental exposure to heavy metals in mothers and their respective infants // *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2017. Vol. 220. P. 1252–1278.
- 9 Jarup L. Hazards of heavy metal contamination // *British Medical Bulletin*. 2003. Vol. 68. P. 167–82.
- 10 Шербакова И. Н., Густайтис М. А., Лазарева Е. В., Богущ А. А. Миграция тяжелых металлов (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) в ореоле рассеяния Урского хвостохранилища (Кемеровская область) // *Химия уст. разв.* 2010. Т. 18, № 5. С. 621–633.
- 11 Гаськова О. В., Бортникова С. Б., Кабанник В. Г., Новикова С. П. Особенности загрязнения почв в районе хранилища отходов пирометаллургического извлечения цинка на Беловском цинковом заводе // *Химия уст. разв.* 2012. Т. 20, № 4. С. 419–429.
- 12 Ettler V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: A review // *Applied Geochemistry*. 2016. Vol. 64. P. 56–74.
- 13 Власов О. А. Процессы получения металлов [Конспект лекций]. Красноярск: СФУ ИЦМиМ. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/7225806/> (дата обращения: 07.12.2019).
- 14 Рапута В. Ф., Шуваева О. В., Коковкин В. В., Шурухин С. Г., Воробьева О. А. Анализ аэрозольного загрязнения в районе Новосибирского оловокомбината // *Химия уст. разв.* 2002. Т. 10, № 5. С. 691–697.
- 15 Коковкин В. В., Рапута В. Ф., Шуваева О. В. Мониторинг загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова в окрестностях Новосибирского оловокомбината // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2013. Т. 4, № 2. С. 36–41.
- 16 Артамонова С. Ю., Рапута В. Ф., Колмогоров Ю. П. Техногенное загрязнение почв и растительного покрова в районе оловокомбината (г. Новосибирск) // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2005. Т. 5. С. 106–110.
- 17 Baran A., Tarnawski M., Assessment of heavy metals mobility and toxicity in contaminated sediments by sequential extraction and a battery of bioassays // *Ecotoxicology*. 2015. Vol. 24, No. 6. P. 1279–1293.
- 18 Prabhat K., Sang S., Ming Z., Yiu F. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management // *Environmental International*. 2019. Vol. 125. P. 365–385.
- 19 Постановление № 1091 от 27.03.2018 “О проекте планировки и проектах межевания территории, ограниченной ул. Ватутина, Советским шоссе, ул. Петухова, ул. Сибиряков-Гвардейцев, рекой Тулой, в Кировском районе (с изменениями на 4 июня 2018 года)”. Мэрия города Новосибирска [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/465721241> (дата обращения: 01.10.2018).
- 20 ФГБУ “Западно-Сибирское УГМС”. Официальные данные наблюдений. Официальные прогнозы. Роза ветров за год. Режим доступа: <http://www.meteo-nsr.ru/pages/53> (дата обращения: 11.09.2018).
- 21 Skripkina T. S., Bychkov A. L., Smolyakov B. S. Changes in phytoplankton production after the introduction of heavy metals into ecosystem with subsequent cleaning by humic sorbent // *Water Resources*. 2019. Vol. 46, No. 2. P. 242–248.
- 22 Skripkina T., Bychkov A., Tikhova V., Smolyakov B., Lomovsky O. Mechanochemically oxidized brown coal and the effect of its application in polluted water // *Environmental Technology and Innovation*. 2018. Vol. 11. P. 74–82.
- 23 Водяницкий Ю. Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // *Почвоведение*. 2012. № 3. С. 368–375.
- 24 Crommentuijn T., Polder M. D., Van de Plassche E. J. Maximum Permissible Concentrations and Negligible Concentrations for metals, taking background concentrations into account // *RIVM Rapport 601501001*. Bilthoven, Netherlands, 1997. 260 p. URL: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601501001.pdf> (дата обращения: 24.02.2020).