

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ О СОДЕРЖАНИИ КИСЛОТОРАСТВОРИМЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ГОРКИ

Т. Н. МЫСЛЫВА, О. Н. ЛЕВШУК

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: byrty41@yahoo.com, levshuk-2011@mail.ru

(Поступила в редакцию 14.10.2020)

Оценка характера пространственного распределения тяжелых металлов в почвах представляет собой актуальную научную задачу, поскольку именно загрязненная почва становится вторичным источником поступления лютеантов в фитомассу растений. На основании собственных экспериментальных исследований выполнен анализ пространственного распределения кислоторастворимых форм меди, цинка, свинца и кадмия в урбаногемах в пределах территории с индивидуальной жилой застройкой г. Горки (Могилевская область, Республика Беларусь) с использованием функциональных возможностей модуля Spatial Analyst программного продукта ArcGIS. Посредством применения методов геостатистического анализа с помощью алгоритма k-средних было установлено наличие 3 кластерных групп данных, характеризующих уровень загрязнения территории по комплексу показателей – содержанию в почве кислоторастворимых Cu, Zn, Pb, Cd. Определено, что наиболее сильно в урбаногемах г. Горки варьирует содержание кислоторастворимых форм цинка ( $v = 98,9\%$ ) и свинца ( $v = 97,2\%$ ), что подтверждает техногенную природу происхождения этих лютеантов.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, урбаногема, пространственное распределение, анализ.

Assessment of the nature of spatial distribution of heavy metals in soils is an urgent scientific problem, since it is the contaminated soil that becomes a secondary source of pollutants entering the phytomass of plants. On the basis of our own experimental studies, we analyzed the spatial distribution of acid-soluble forms of copper, zinc, lead and cadmium in urban soils within the territory with individual residential development in the city of Gorki (Mogilev region, Republic of Belarus) using the functionality of Spatial Analyst module of ArcGIS software product. By applying the methods of geostatistical analysis using the k-means algorithm, the presence of 3 cluster groups of data was established that characterize the level of contamination of the territory by a set of indicators – the content of acid-soluble Cu, Zn, Pb, Cd in the soil. It has been determined that the content of acid-soluble forms of zinc ( $v = 98.9\%$ ) and lead ( $v = 97.2\%$ ) varies most strongly in the urban soils of Gorki, which confirms the technogenic nature of the origin of these pollutants.

**Key words:** heavy metals, urban soils, spatial distribution, analysis.

### Введение

Техногенное загрязнение вследствие воздействия промышленных эмиссий лютеантов, прежде всего тяжелых металлов, является одной из основных причин ухудшения качества почв и выращиваемой на них сельскохозяйственной продукции [1]. Почва является чувствительным индикатором эколого-геохимической обстановки в пределах агроэкосистем, поскольку в ней пересекаются пути миграции различных химических элементов, в частности тяжелых металлов [2]. Выявление характеристик пространственной структуры содержания кислоторастворимых форм тяжелых металлов может стать базовой основой для комплексной оценки уровня загрязнения почвенного покрова и разработки рациональной политики управления окружающей средой в условиях усиления антропогенного воздействия на биосферу. Исходя из этого, существует потребность в получении релевантной информации о пространственном поведении содержания тяжелых металлов как в пределах локальных территорий и административных районов, так и в пределах отдельных регионов и природно-территориальных комплексов. Однако подавляющее большинство исследований, выполненных как отечественными учеными, так и исследователями из ближнего и дальнего зарубежья, касается оценки уровня загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова в областных центрах и в городах с высокой степенью концентрации промышленного производства [3], в то время как исследований по оценке эколого-геохимического состояния агроселитебных ландшафтов малых городов, в частности в Могилевской области, проведено недостаточно.

Целью исследований стала идентификация кластеров высоких и низких значений содержания тяжелых металлов в пределах территории г. Горки для выполнения зонирования территории по уровню загрязнения.

### Основная часть

Исследования выполнялись в 2017–2020 гг. на территории микрорайонов «Заречье», «Центр», «Слобода» и «Академия», а также садовых товариществ «Иваново», «Труд» и «Садовод», находящихся в пределах территории г. Горки Могилевской области (рис. 1).

Отбор образцов почвы проводился в соответствии с требованиями, указанными в ТКП 17.03–02–2013 «Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими вещества-

ми» [4]. Размер пробной площадки составлял 10×10 м, почва отбиралась методом «конверта» из слоя 0–20 см. Один репрезентативный почвенный образец формировался из 20 точечных проб.

Определение содержания тяжелых металлов – Cu, Zn, Pb и Cd выполнялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе SOLAAR S Series AA фирмы Thermo Scientific (США). Экстрагирование тяжелых металлов выполняли 1н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

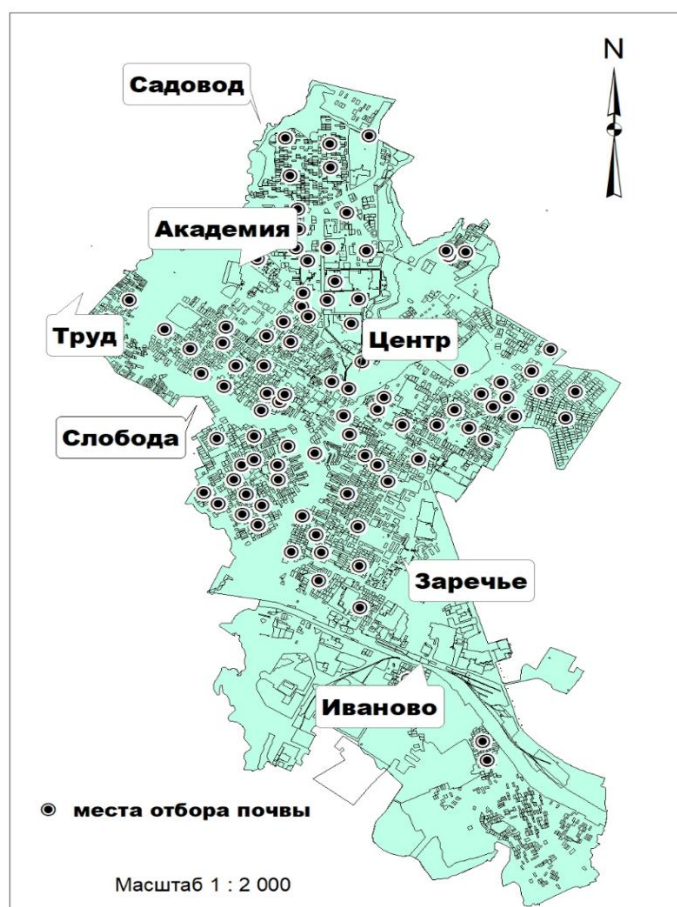


Рис. 1. Схема отбора репрезентативных образцов почвы на территории участков индивидуальной жилищной застройки в пределах г. Горки

Геопространственный анализ данных о содержании тяжелых металлов в урбаноземах выполнялся с помощью функциональных возможностей набора инструментов «Расчет кластеризации» модуля «Пространственная статистика» программного продукта ArcGIS версии 10.5. С помощью инструментов геопространственной статистики выполнялся анализ структурных закономерностей в распределении данных и анализ их кластеризации.

Использование методов геостатистического анализа позволяет идентифицировать неоднородности загрязнения тяжелыми металлами в пределах территории исследования по одному или нескольким параметрам. Анализ группирования – действенный инструмент изучения геопространственных данных, выполняющий процедуру классификации, целью которой является поиск естественных кластеров высоких и/или низких значений в массиве данных. Метод k-средних – наиболее популярный метод кластеризации, который был изобретён в 1950-х годах XX ст. математиком Гуго Штейнгаузом [5]. Действие алгоритма кластеризации таково, что он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров (1):

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} (x - \mu_i)^2, \quad (1)$$

где  $k$  – число кластеров;  $S_i$  – полученные кластеры;  $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $\mu_i$  – центры масс всех векторов  $x$  из кластера  $S_i$ .

С его помощью геопространственные данные распределяются на заданное число групп, в которых все показатели наиболее схожи между собой, а сами группы максимально отличаются друг от друга

[6, 7]. Поиск оптимального числа групп выполнялся с помощью алгоритма k-средних в пределах выборки данных, сведения об основных статистических характеристиках которой представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки данных о содержании в почве кислоторастворимых форм тяжелых металлов, n=80

Название показателя	Значение показателя			Sd	Cv, %	Med	Экспесс	Асимметрия
	min	max	mid					
Медь, мг/кг	3,36	35,35	9,59	5,56	58,0	8,05	7,75	1,89
Цинк, мг/кг	15,07	325,1	86,07	83,45	98,9	52,8	4,21	1,54
Свинец, мг/кг	3,40	66,62	13,94	13,55	97,2	9,72	9,64	2,68
Кадмий, мг/кг	0,0001	0,57	0,20	0,13	65,0	0,17	3,28	0,78

Примечание: Sd – среднееквадратическое отклонение; Cv – коэффициент вариации; mid – среднее значение; Med – медиана.

Следует отметить, что распределение данных о содержании кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почве не соответствует нормальному, а в выборке геопространственных данных присутствует значительное количество выбросов высоких и низких значений, свидетельствующие о перспективности идентификации участков с максимальным и минимальным уровнями загрязнения в пределах города. О фрагментарности и контрастности строения атмотехногенных ореолов рассеивания тяжелых металлов свидетельствует и величина коэффициента вариации их содержания в почве. Среди исследуемых тяжелых металлов наиболее сильно в урбаноземах г. Горки варьирует содержание кислоторастворимых форм цинка ( $v = 98,9\%$ ) и свинца ( $v = 97,2\%$ ), что подтверждает техногенную природу происхождения данных поллютантов. Медианное значение содержания в почве меди, свинца и цинка превышает значения ПДК в 2,7; 2,3 и 1,6 раза соответственно, тогда как медианное значение содержания кадмия составляет 0,34 ПДК.

Посредством выполнения анализа группирования было установлено наличие в пределах исследуемой территории г. Горки трех зон с определенным набором параметров. В данном случае под параметрами подразумевается содержание в почве кислоторастворимых форм тяжелых металлов, а под однородностью – наличие кластеров параметров с высокими либо низкими значениями (табл. 2).

Таблица 2. Значение  $R^2$  для идентифицированных групп содержания тяжелых металлов в почве на территории г. Горки

Идентифицированная группа показателей	Наименование показателя			
	содержание кислоторастворимых форм, мг/кг			
	меди	цинка	свинца	кадмия
1	0,3722	0,4846	0,6032	0,3722
2	0,5451	0,4795	0,7635	0,5854
3	0,7789	0,9315	0,9159	0,8079
Общее значение	0,6189	0,4769	0,2319	0,5199

Величина  $R^2$  свидетельствует о том, что доминирующим показателем при определении групп 1 и 2 выступает содержание кислоторастворимого свинца ( $R^2 = 0,6032$  и  $0,7635$  соответственно), а группы 3 – содержание кислоторастворимого цинка ( $R^2 = 0,9315$ ).

Статистические характеристики идентифицированных групп геопространственных данных свидетельствуют о следующем (рис. 2). В группе 1, которая наиболее широко представлена в исследуемом массиве данных, значения всех показателей находятся на уровне ниже медианных значений. Данная группа отражает участки в пределах северной части микрорайона «Академия», в районе дендропарка и вдоль левого берега р. Поросица, а также в садовых товариществах «Садовод» и «Иваново». Участки, входящие в группу 2, сосредоточены преимущественно в микрорайоне «Слобода». Значения содержания в почве меди и цинка в данной группе находятся на уровне выше медианных значений, содержание свинца соответствует величине верхнего глобального квартиля, а кадмия – выходит за его пределы. В третьей группе представлены участки, сосредоточенные преимущественно в центре города, а также в микрорайонах «Академия» и «Заречье». Единичные участки, относящиеся к группе 3, присутствуют также в пределах микрорайона «Слобода» в районе улиц Сурганова и Пионерской. В данной группе среднее содержание свинца и цинка лежат за пределами глобального верхнего значения, а содержание меди – за пределами глобального верхнего квартиля. В группе 1 приоритетными загрязнителями почвы выступают свинец и цинк, а в группа 2 и 3 – свинец и кадмий.

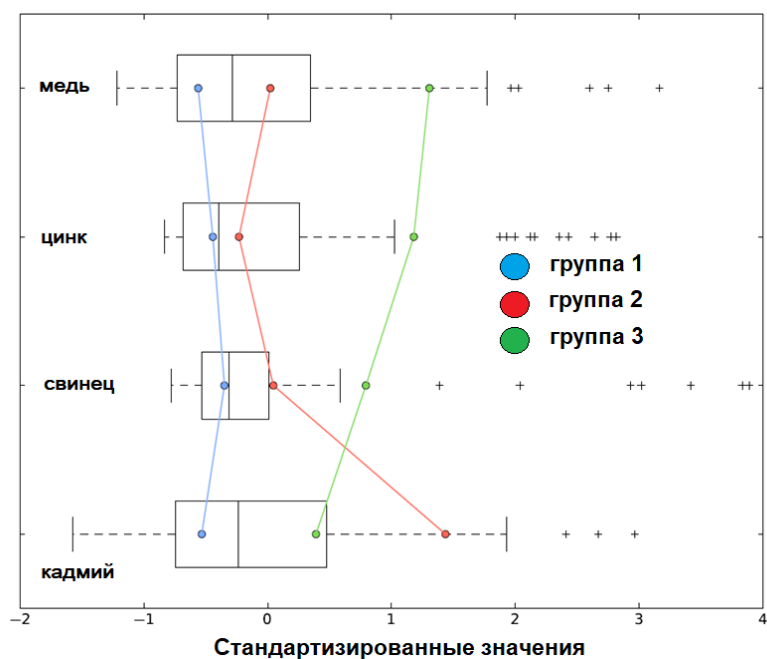


Рис. 2. Сводная статистическая характеристика идентифицированных групп данных о содержании тяжелых металлов

После установления наличия кластеризации высоких и низких значений исследуемых геопространственных данных о содержании в почве тяжелых металлов был выполнен ее анализ. Он дает возможность установить, где проходят наиболее четкие границы между контурами с высоким и низким содержанием того либо иного элемента в почве и есть ли в пределах исследуемой территории аномально высокие или аномально низкие значения показателей, которые можно отнести к пространственным выбросам. По результатам оценки величины локального индекса Морана, z-оценки и р-значения было установлено наличие пространственных выбросов высоких и низких значений для всех исследуемых показателей (рис. 3).

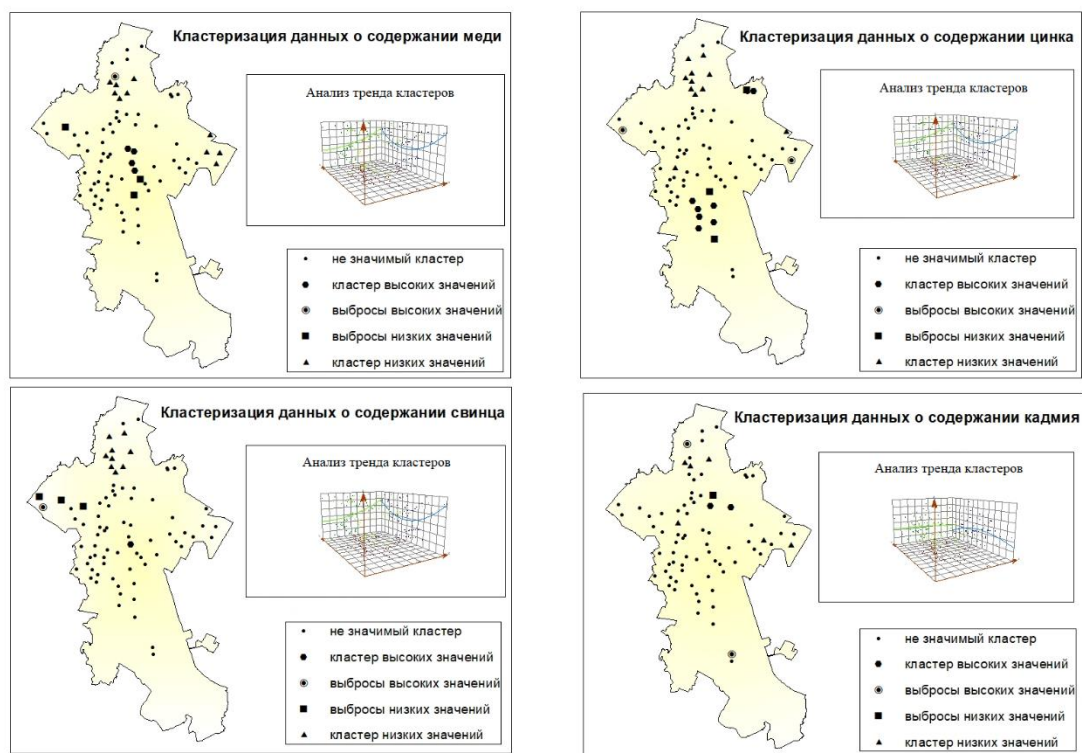


Рис. 3. Результаты анализа кластеризации данных о содержании тяжелых металлов

Для меди установлено наличие кластеров высоких значений в центре города, кластеров низких значений – в районе дендропарка и северной части микрорайона «Академия», в то время как в микрорайоне «Заречье» зафиксировано наличие выбросов низких значений содержания кислоторастворимой меди в почве. Кластеризацией высоких значений содержания цинка характеризуется территория микрорайона «Заречье», низких значений – северная часть микрорайона «Академия», в то время как для территории в районе дендропарка и садового товарищества «Труд» достоверно установлено наличие выбросов высоких значений содержания в почве цинка. Наличием кластеров низких значений содержания свинца и кадмия характеризуется северная часть микрорайона «Академия», а выбросы низких значений данных элементов зафиксированы на территории садового товарищества «Труд» и в районе левого берега р. Поросица.

### **Заключение**

Результаты выполненных исследований дают основания для следующих выводов: 1) урбаноземы на территории города Горки загрязнены кислоторастворимыми формами Cu, Zn, Pb и характеризуются пестротой и контрастностью атмотехногенных ореолов рассеивания данных поллютантов; 2) посредством выполнения геостатистического анализа с использованием алгоритма k-средних установлено наличие 3 групп данных, характеризующих уровень загрязнения территории города по комплексу показателей; 3) приоритетными загрязнителями почв земельных участков, находящихся в пределах индивидуальной жилищной застройки и относящихся к группам 1 и 2, является свинец, к группе 3 – цинк.

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Мислива, Т. М. Свинець і кадмій у ґрунтах агроландшафтів Житомирського Полісся / Т. М. Мислива // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2013. – Вип. 3 (25). – С. 43–50.
2. Мысльва, Т. Н. Тяжелые металлы в урбаноземмах парково-рекреационных ландшафтов г. Житомир / Т. Н. Мысльва // Агрохимия. – 2011. – №1. – С. 67–74.
3. Мысльва, Т. Н. Тяжелые металлы в агроселитебных ландшафтах г. Горки / Т. Н. Мысльва, О. Н. Левшук // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 211–216.
4. Охрана окружающей среды и природопользование Земли. Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами ТКП 17.13-02-2013 (02120) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vik.by>.
5. Steinhaus, H. Sur la division des corps materiels en parties / H. Steinhaus // Bulletin International de l'Academie Polonaise des Sciences. – 1956. – C1. III. – Vol IV. – P. 801–804.
6. Митчелл, Э. Руководство по ГИС-анализу. Часть 1. Пространственные модели и взаимосвязи / Э. Митчелл. – ESRI: 2000. – 170 с.
7. Mitchell, A. The ESRI Guide to GIS Analysis / A. Mitchell. – Esri Press, 2005. – Volume 2. – 252 p.