



УДК 528.856:528.936(045)

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ГОРОДА КИЕВА

**А.В. Мацибора¹, Ф.Н. Лисецкий²,
И.В. Кураева³, Ю.Ю. Войтюк³**

¹ *Институт географии Национальной академии наук, Украина, 01030, г. Киев-30, ул. Владимирская, 44.*

² *Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.*

³ *Институт геохимии, минералогии и рудообразования имени Н.П. Семеново Национальной академии наук, Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Академика Палладина, 34.*

E-mail: rmcf@ukr.net; liset@bsu.edu.ru; yuliasun@mail.ru

Рассмотрены возможности использования геоинформационных систем для создания пространственных баз данных геохимических исследований почвенного покрова урбоэкосистем. Представлены результаты оценки уровня техногенного загрязнения и моделирования пространственного распределения тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Sn) в почвах города Киева. Показано, что наибольшие значения содержания тяжелых металлов характерны для районов с интенсивным промышленным производством.

Ключевые слова: тяжелые металлы, городские почвы, геоинформационные системы, геоинформационное моделирование, пространственная база данных.

Введение

Важной чертой развития человечества на современном этапе является ускорение процесса урбанизации. Постоянно увеличивающиеся площади городских земель и концентрация населения в городах способствуют формированию новых форм взаимодействия в системе «человек–окружающая среда». Урбанизация носит глобальный характер и выступает фактором существенной трансформации географической оболочки, в результате чего развиваются специфические образования – урбоэкосистемы. Повышение роли городов в жизни человечества обуславливает концентрацию ресурсов и их потребителей на относительно небольших участках пространства, что приводит к возникновению диспропорций в балансе использования и восстановления природной среды.

Одним из наиболее чувствительных к антропогенно обусловленным изменениям геокомпонентов являются почвы, которые непосредственно испытывают трансформации физико-химических параметров в результате влияния человеческой деятельности. В результате функционирования объектов промышленности, транспортной инфраструктуры почвенный покров урбанизированных территорий накапливает в аккумулятивных горизонтах химические элементы в количествах, отличных от его природного геохимического фона.

Промышленные отходы, выбрасываемые в окружающую среду, обогащены химическими элементами; а их значительные концентрации, комплексность и вариабельность состава определяют особенностями современных технологий. Техногенные аномалии химических элементов в почвенных образованиях являются индикаторами наличия и интенсивности загрязнения атмосферы промышленными выбросами.

Особого внимания требует оценка поступления тяжелых металлов воздушным путем в поверхностные горизонты почв с последующим накоплением и миграцией по профилю. Вопросы изучения пространственного распределения, миграционных особенностей тяжелых металлов в почвах рассмотрены в работах Ю.Н. Водяницкого [1, 2], В.Г. Добровольского [3], Д.В. Ладонина [4], В.Б. Ильина [5] и других авторов. Согласно этим исследованиям установлены природные источники тяжелых металлов в почвах: 1) прямое обогащение металлами из почвообразующей породы; 2) региональное нарушение баланса между химическими элементами; 3) активизация литогенных тяжелых элементов в результате колебания уровня грунтовых вод. Антропогенное загрязнение почв происходит в результате: аэриального выпадения вокруг стационарных или передвижных объектов; поступления тяжелых металлов гидрогенным путем с промышленными сточными водами; создания отвалов золы, шламов, руд непосредственно возле промышленных центров. Комплексный анализ факторов загрязнения позволяет провести оценку степени антропогенной нагрузки на городские почвы.



Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются почвы города Киева, урбанизированная территория которого характеризуется высокой степенью антропогенной нагрузки в связи с функционированием значительного количества предприятий и в первую очередь машиностроения, черной и цветной металлургии, химической промышленности, а также легкой и полиграфической. Район исследований характеризуется наличием промышленных предприятий различного профиля, которые в ряде случаев расположены близко друг от друга и образуют промышленные зоны, перемежаемые жилыми кварталами и рекреационными территориями.

Отбор почвенных образцов проводили по регулярной сети ключевых участков с учетом особенностей планирования городской застройки города Киева и функциональной структуры. Обозначенный подход предусматривает исследование почв промышленных зон, территорий отдельных предприятий, жилых массивов и рекреационных объектов, что позволяет составить эколого-геохимическую характеристику почв городской агломерации. В ходе проведения полевых исследований было отобрано 73 образца почв с глубины 5 см на ключевых участках.

С целью определения содержания тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Sn) в почвах урбоэкосистемы Киева применяли спектральный полуколичественный анализ на спектрографе СТЭ-1 и атомно-абсорбционный анализ с использованием прибора КАС-115. Валовое содержание химических элементов сравнивали с фоновым показателем, в качестве которого были приняты параметры почв вне административных границ города Киева. Для всех ключевых участков исследования был рассчитан суммарный коэффициент техногенного загрязнения [6].

На основе полученных результатов лабораторных анализов создана пространственная база данных (ПБД) геохимических исследований. Обработку пространственных данных и моделирование геохимических полей выполняли в рабочей среде настольной геоинформационной системы с открытым исходным кодом QGIS 2.2.0-Valmiera, которая распространяется на условиях GNU General Public License. Построение интерполированных поверхностей распределения тяжелых металлов производили с применением метода обратно-взвешенных расстояний (IDW).

Кроме разработки ПБД и моделирования составлен перечень объектов, которые являются источниками поступления тяжелых металлов в почвы урбоэкосистемы Киева (предприятия промышленности, транспорта, сельскохозяйственного производства). Используя метод оверлея, проанализированы пространственные закономерности распределения концентраций химических элементов по отношению к потенциальным источникам техногенного загрязнения.

Результаты и их обсуждение

В результате проведения полевых работ и лабораторных анализов получен массив данных геохимических исследований, который стал основой формирования ПБД. Структура атрибутивной информации ПБД оптимально организована для целей хранения данных, интерактивного взаимодействия с пользователем и геостатистического моделирования. Учитывая, что ГИС QGIS поддерживает большинство распространенных типов данных и практически не ограничивает набор атрибутов пространственных объектов, их перечень максимально полно описывает почвенно-геохимическую информацию.

Для целей исследования ПБД ключевых участков содержит информацию о географических координатах, населенном пункте и его административных районах, адресную привязку, название ближайшего промышленного объекта, возле которого проводился отбор образцов почв, глубину отбора, а также результаты лабораторных анализов по содержанию тяжелых металлов и суммарный коэффициент техногенного загрязнения (табл. 1).

Таблица 1

Структура атрибутивной информации ПБД геохимических показателей почв (на примере г. Киева)

№	Название поля	Тип поля	Значение (в скобках пример данных)
1	2	3	4
1.	Number	Integer	порядковый номер ключевого участка, на котором проводился отбор почвенных образцов («72»)
2.	X	Real (10.8)	географические координаты («37.479551»)
3.	Y	Real (10.8)	географические координаты («47.168001»)
4.	City	String (254)	название города исследования («Киев»)
5.	District	String (254)	принадлежность ключевого участка к элементу административного деления города – району («Печерский район»)
6.	Address	String (254)	адресная привязка ключевого участка («ул. Владимирская, 44»)

Окончание табл. 1

1	2	3	4
7.	Plant	String (254)	крупный объект промышленного производства, находящийся в непосредственной близости от ключевого участка («ПО Химволокно»)
8.	Depth	Real (3.2)	глубина отбора образца, единицы измерения – метры («0.05»)
9.	<i>Pb</i>	Real (10.2)	содержание тяжелых металлов в почвенных образцах, единицы измерения – мг/кг («400»)
10.	<i>Zn</i>		
11.	<i>Cu</i>		
12.	<i>Cr</i>		
13.	<i>Ni</i>		
14.	<i>Sn</i>	Real (10.2)	суммарный коэффициент техногенного загрязнения («28.68»)
15.	<i>Zc</i>		

Использование обозначенного широкого перечня показателей и характеристик обусловлено необходимостью не только создавать картографические изображения для визуальной оценки геохимической ситуации, но и для эксплуатации самой ПБД, что предусматривает выполнение атрибутивных и пространственных запросов, создание выборок, расчета статистических показателей, установку связей, сортировку, объединение данных.

Уровень техногенного загрязнения тяжелыми металлами почв урбоэкосистемы города Киева оценивался на основе изучения пространственного распределения шести химических элементов, которые относятся к различным классам опасности. Согласно обще токсикологическим нормативам [7] *Pb* и *Zn* относятся к сильноопасным, *Ni*, *Cu*, *Cr* к умеренноопасным и *Sn* – к слабоопасным элементам. Обозначенная градация имеет достаточно условный характер, так как поведение тяжелых металлов в почвах, отличающихся гранулометрическим, минералогическим составом, показателем pH и содержанием органического вещества, может существенно различаться. Но для общей оценки уровня техногенной нагрузки на почвенный покров указанная градация может быть использована в качестве официально утвержденной классификации.

Показатели концентрации *Pb*, *Zn*, *Cu*, *Cr*, *Ni*, *Sn* в почвах города Киева характеризуются широкой амплитудой колебаний значений на отдельно взятых ключевых участках, что можно объяснить их принадлежностью к разным функциональным зонам урбанизированной территории. Для всех исследуемых металлов характерно существенное превышение средних значений над фоновыми (табл. 2).

Таблица 2

Статистические показатели результатов геохимических исследований почв урбоэкосистемы г. Киева (количество определений – 73)

Химический элемент	Содержание, мг/кг			
	max	min	среднее	фоновое
<i>Pb</i>	410.00	2.00	124.00	10
<i>Zn</i>	600.00	103.00	262.55	30
<i>Cu</i>	266.00	50.00	158.00	16
<i>Cr</i>	450.00	7.00	96.70	20
<i>Ni</i>	96.00	3.00	35.86	7
<i>Sn</i>	16.40	2.00	9.20	2

Наличие в массиве данных значений концентрации тяжелых металлов, которые характеризуются более чем двадцатикратным превышением фона, связано с отбором образцов у непосредственной близости к действующим промышленным предприятиям, где в результате длительной техногенной нагрузки верхний горизонт почвы аккумулировал значительное количество загрязнителей. К таким химическим элементам стоит отнести *Pb*, максимальное значение которого в 40 раз превышает аналогичное фоновое значение, *Zn* – в 20 и *Cr* – более чем в 22 раза.

Полученные геохимические данные отражают содержание тяжелых металлов на каждом отдельном ключевом участке, что не позволяет сформулировать выводы о пространственном распределении исследуемых показателей. Для этих целей целесообразно применить геоинформационное моделирование, которое позволяет построить континуальные растровые поверхности на основе набора дискретных данных, используя процедуру пространственной интерполяции.

Среди широкого спектра методов интерполяции был выбран алгоритм обратновзвешенных расстояний (IDW). Использование IDW-интерполяции обуславливается, в первую очередь, возможностью применения в случае, если набор данных имеет неравномерное изме-

нение значений, что особенно актуально для геохимических исследований, так как значения содержания тяжелых металлов на территории промышленных предприятий и рекреационных зон могут существенно различаться. Важной особенностью метода IDW является вычисление промежуточных значений переменной, учитывая показатели близлежащих точек, что исключает влияние факторов, не имеющих пространственных связей с вычисляемым узлом регулярной сети.

Использование процедуры IDW-интерполяции, реализованной в настольной ГИС QGIS, позволило создать картосхемы пространственного распределения *Pb*, *Zn*, *Cu*, *Cr*, *Ni* и *Sn* в почвах урбоэкосистемы Киева. Учитывая необходимость дальнейшей визуальной оценки полученных картографических материалов, отображение интерполированных поверхностей производили с использованием метода количественного фона, согласно которому, интенсивность цвета пропорциональна значению отображаемого параметра, в данном случае концентрации химического элемента. Цветовая шкала была разделена по формальному принципу на шесть одинаковых интервалов, что дает возможность не только сопоставить интенсивность техногенного загрязнения, но и оценить пространственное распределение показателей, значения которых выше среднего. Повысить информативность картосхем позволило применение изолинейного отображения концентрации исследуемого тяжелого металла. В качестве подложки для геохимических данных использовали растровый слой «Google Physical» (рис. 1).

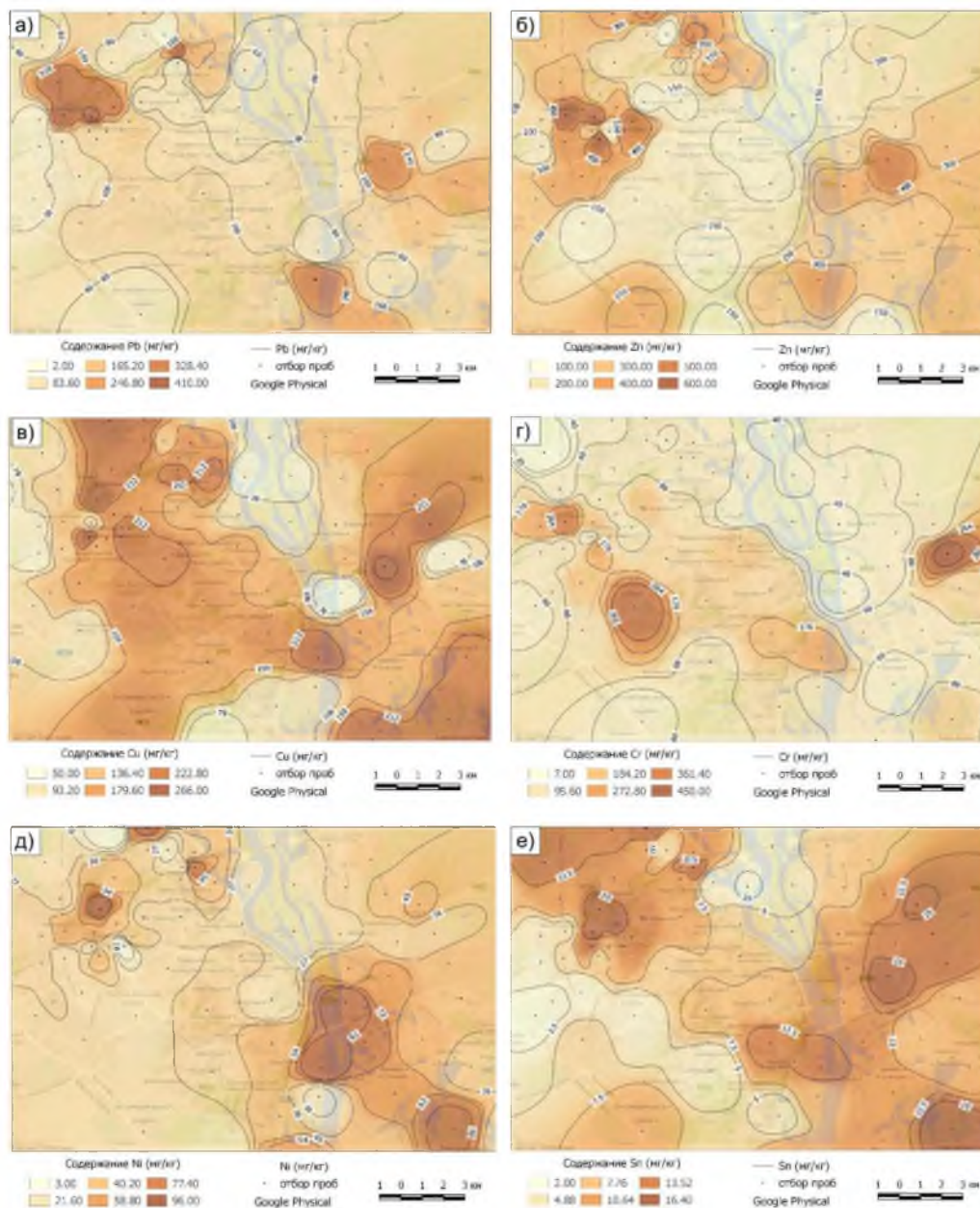


Рис. 1. Пространственное распределение тяжелых металлов в почвах г. Киева: а) *Pb*; б) *Zn*; в) *Cu*; г) *Cr*; д) *Ni*; е) *Sn*



Картосхемы пространственного распределения тяжелых металлов в почвах исследуемой урбоэкосистемы наглядно демонстрируют приуроченность центров повышенной концентрации химических элементов к скоплению объектов промышленного производства.

Изучение пространственного распределения *Pb* (рис. 1, а) позволило установить повышенное содержание данного элемента в северо-западной части города (Шевченковский административный район), где его концентрация достигает 400 мг/кг. Высокие значения обусловлены размещением в данном районе нескольких промышленных объектов на ограниченной площади. Максимальное содержание *Pb* в почвах восточной части Киева составляет 300 мг/кг. В южной части города значения *Pb* достигают 320 мг/кг. К районам с невысоким содержанием *Pb* в почвах (до 40 мг/кг) относится северная часть Киева (Деснянский и часть Днепроовского районов), а также его исторический центр (Печерский, Соломенский и Голосеевский районы).

Пространственное распределение *Zn* (рис. 1, б) в почвах Киева отличается значительной неоднородностью и в общих чертах характеризуется наличием отдельных зон резкого повышения концентрации в северо-западной части города (Оболонский район), где содержание достигает 200–400 мг/кг. Для промышленной зоны западных районов Киева (Шевченковского и Соломенского) данные показатели еще выше – от 350 до 600 мг/кг. Относительно повышенные концентрации *Zn* наблюдается в почвах Днепроовского и Дарницкого районов, где максимальные показатели достигают 300–500 мг/кг. Минимальное содержание *Zn* (150 мг/кг) отмечено для Деснянского и Печерского районов.

Содержание *Cu* (рис. 1, в) в почвах на территории Киева варьируется от 60 мг/кг (в Деснянском и Днепроовском районах), до 250 мг/кг (в западной и юго-восточных частях города). Для *Cu* характерной остается общая тенденция повышения концентраций в промышленных районах и резкое уменьшение там, где отсутствуют объекты промышленности, с тем отличием, что большая часть территории агломерация имеет показатели выше средних (160 мг/кг).

Особенный характер пространственного распределения свойственен *Cr* (рис. 1, г). Данный химический элемент не создает больших ареалов с повышенными уровнями содержания, для него характерно наличие отдельных, небольших по площади, участков с концентрацией, которая достигает 250–450 мг/кг в Днепроовском, 200–400 мг/кг в Соломенском и 150–250 мг/кг в Шевченковском районах. Для остальной территории исследования содержания *Cr* не превышает 80–100 мг/кг.

В городских почвах *Ni* распространяется неравномерно (рис. 1, д), для него характерно значительное повышение концентрации в юго-восточной части Киева до 70–90 мг/кг (преимущественно Дарницкий район) и отдельные небольшие ареалы в Шевченковском и Оболонском районах, где уровни содержания составляют 70–80 мг/кг. Минимальное количество *Ni* наблюдается в Соломенском, Печерском и северной части Днепроовского района – до 30 мг/кг.

Пространственное распределение *Sn* (рис. 1, е) характеризуется превышением среднего показателя концентрации (9 мг/кг) на большей части территории Киева, образуя ареалы со значениями выше 12 мг/кг в северо-западной (Подольский, Шевченковский и Оболонский районы), северо-восточной (Деснянский и часть Днепроовского районов) и юго-восточной (Дарницкий район) частях города. Минимальным содержанием отличаются Соломенский и Голосеевский районы – до 5 мг/кг.

Для комплексной оценки техногенного загрязнения почв города Киева использовали суммарный коэффициент (Z_c), рассчитанный по формуле:

$$Z_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{C_{фон}}$$

где Z_c – коэффициент суммарного техногенного загрязнения;
 C_i – концентрация i -го элемента;
 $C_{фон}$ – фоновая концентрация i -го элемента;
 n – количество исследуемых химических элементов.

При расчете коэффициента Z_c степень токсичности всех химических элементов условно считается одинаковой, а также могут нивелироваться экстремальные показатели отдельных элементов, если остальные не превышают фоновые значения. Известны предложения по совершенствованию использованной схемы расчета, учитывающей различия в токсичности элементов [8]. Несмотря на некоторые ограничения в использовании данного показателя, коэффициент Z_c позволяет оценить суммарное загрязнение почв с учетом значений всех исследуемых тяжелых металлов – *Pb*, *Zn*, *Cu*, *Cr*, *Ni*, *Sn* и в общих чертах отражает степень эколого-геохимической напряженности исследуемой территории (рис. 2).

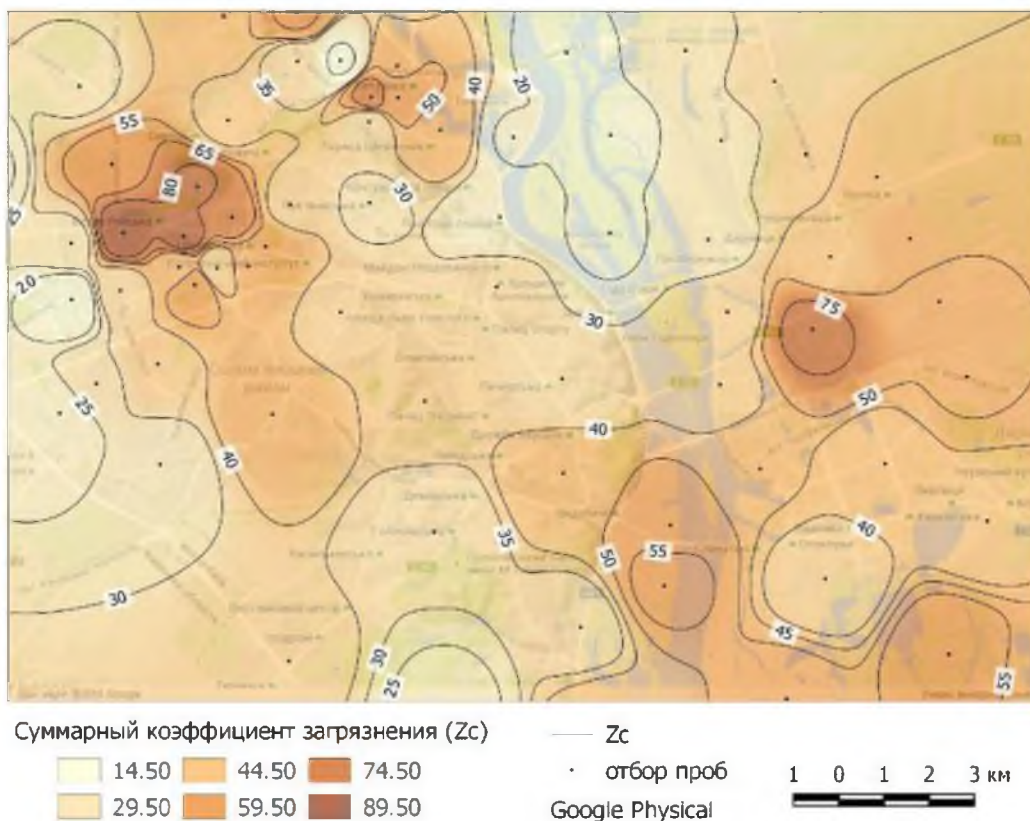


Рис. 2. Пространственное распределение суммарного коэффициента техногенного загрязнения (Z_c) почв на территории Киева

Пространственное распределение суммарного коэффициента техногенного загрязнения почв урбоэкосистемы Киева позволяет выделить районы наиболее загрязненные тяжелыми металлами с позиции их совместного воздействия. Наиболее высокие значения Z_c характерны для северо-западной части города (Шевченковский и Оболонский районы), где данный показатель достигает значений 80-90. Максимальные показатели Z_c , по-видимому, обусловлены размещением в данных районах нескольких промышленных объектов на ограниченной площади, среди которых «6-й Киевский Авторемонтный Завод», ОАО «Киевский авторемонтный завод №1», ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения», комбината печати «Украина», Институт сверхтвёрдых материалов НАН Украины, ПАО «Киевский завод реактивов, индикаторов и аналитических препаратов», ЗАО «Полимер». Вторым участком с относительно высокими значениями Z_c является восточная часть Киева (Днепровский район), где коэффициент достигает 50–70. Среди наибольших объектов промышленного производства данного района стоит выделить ООО Киевский лакокрасочный завод «Макрофарб», ОАО «Киевхимволокно», ООО Киевский завод «Вулкан». Повышение Z_c характерно также для южных частей Киева (на границе Дарницкого и Голосеевского районов), где суммарный коэффициент техногенного загрязнения составляет 30–50. Наиболее мощными объектами промышленности в данном районе являются: ОАО «Киевский завод железобетонных изделий №5», Киевский комбинат «Стройиндустрия» и ОАО «Корчеватский комбинат строительных материалов».

Комплексное решение, предполагающее интеграцию цифровых моделей города, полученных растров полей концентраций загрязняющих веществ, карт зонирования территории по экологической комфортности, позволяет выделить зоны особой экологической опасности для населения и разработать предложения по ее снижению [9].

Заключение

Интенсивная техногенная нагрузка на почвенный покров в городах, большая концентрация объектов промышленности вызывает необходимость учета экологического фактора в развитии урбанизированных территорий и применения современных технологических решений для повышения эффективности урбоэкологического мониторинга. Создание пространственных баз данных геохимических показателей городских почв и моделирование средствами



ГИС является эффективным инструментом мониторинга и оценки экологического состояния урбоэкосистем.

Полученные в результате применения ГИС-технологий пространственная база геохимических данных и территориальные модели распределения тяжелых металлов (*Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Sn*) позволили выделить районы города Киева с наиболее высоким техногенным загрязнением почв, а также установить пространственную связь с объектами антропогенной нагрузки, которые могут обуславливать устойчивое развитие техногенных геохимических аномалий.

Работа с пространственными объектами в среде ГИС-приложения QGIS позволяет использовать все преимущества ПБД. Среди которых стоит выделить интерактивность взаимодействия с пользователем, динамичность обновления данных, контроль уровня актуальности информации, возможность формирования выборок и составления отчетов. ПБД в открытом формате можно рассматривать как инструмент разработки, который позволяет интегрировать картографическую функциональность в другие приложения.

Использование серии обзорных картосхем, с применением метода количественного фона, для отображения концентрации химических элементов, дает возможность визуально оценить пространственное распределение геохимических показателей городских почв и сформулировать рекомендации относительно землепользования, нормирования техногенной нагрузки на почвы, экологического состояния городской среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-35-50080-мол_нр.

Список литературы

1. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2009. – 182 с.
2. Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В. Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1998. – 216 с.
3. Добровольский В.В. Роль органического вещества почв в миграции тяжелых металлов // Природа. – 2004. – №7. – С. 35–39.
4. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. – 2002. – №6. – С. 682–692.
5. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 219 с.
6. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта – М.: Астрей, 1999. – 768 с.
7. ГОСТ 17.4.1.02.-83 Охрана природы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.
8. Титова В.И., Дабахов М.В., Дабахова Е.В. Некоторые подходы к экологической оценке загрязнения земельных угодий // Почвоведение. – 2004. – №10. – С. 1264–1267.
9. Лисецкий Ф.Н., Свиридова А.В., Соловьев В.И. Использование геоинформационных технологий для экологического мониторинга городских территорий // Экологические системы и приборы. – 2007. – №8. – С. 12–17.

GIS MODELING OF HEAVY METALS DISTRIBUTION IN SOILS OF KYIV AGGLOMERATION

**A.V. Matsibora¹, F. N. Lisetskii²,
I.V. Kuraieva³, Iu.Iu. Voitiuk³**

¹ Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, 44 Volodymyrska St, Kyiv-030, 01030, Ukraine

² Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

³ M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, National Academy of Sciences of Ukraine, 34 Akademik Palladin Ave., Kyiv-142, 03680, Ukraine

E-mail: rmcf@ukr.net;
liset@bsu.edu.ru; yuliasun@mail.ru

The possibilities of geographic information systems usage for creation of spatial database of geochemical information on the soil cover of urboecosystems are considered. The results of estimation of heavy metals (*Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Sn*) pollution in urban soils of Kyiv agglomeration and their spatial distribution are presented. It is shown that the highest value of heavy metals content is typical for the areas with intensive industrial production.

Key words: heavy metals, urban soils, GIS, spatial database, GIS modeling.