

**БИОИНДИКАЦИЯ УРБООКОСИСТЕМЫ Г. ПАВЛОДАРА ПО СОДЕРЖАНИЮ  
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОЛЕ ЛИСТЫ ТОПОЛЯ ЧЕРНОГО *POPULUS NIGRA* L.**

Установлен высокий уровень накопления химических элементов в золе листьев *P. nigra* L. и построен геохимический ряд (по Кс):  $Cr_{22} > Sb_{8,2} > Zn_{6,7} > Na_{2,5} > Tb_{2,3} > Lu_{2,2} > Yb_{1,9} > Ca_{1,8} > Ba_{1,7} > Co_{1,5} = Eu_{1,5} > Fe_{1,3} > Sc_{1,2} = Rb_{1,2} = Sr_{1,1} = U_{1,1} = Ta_{1,1} > Ce_{1,0} = Sm_{1,0} = Th_{1,0} = Hf_{1,0}$ . Определены как наиболее значимые две микроассоциации: Lu–Ce и Sm–La–Th–Sc на территории г. Павлодара.

**Ключевые слова:** антропогенная трансформация растительности; биогеохимический мониторинг; геохимические спектры.

Павлодарская область является одним из наиболее развитых в экономическом отношении регионов Республики Казахстан, имеющих стратегическое значение для всей страны. Ключевой экологической проблемой Павлодарской области является загрязнение атмосферного воздуха. Пятая часть всех выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по Казахстану приходится на Павлодарскую область, экологическая ситуация характеризуется как напряженная [1]. Павлодарская область подвержена высокому техногенному загрязнению, т.к. базовыми отраслями экономики области являются горнодобывающая, нефтеперерабатывающая и химическая промышленность, черная и цветная металлургия, энергетика. На территории области действовал Семипалатинский ядерный полигон (39% его территории находится на землях Майского района Павлодарской области). В области насчитывается значительный парк передвижных источников загрязнения атмосферного воздуха.

В Павлодарской области зарегистрировано 200 крупных предприятий – природопользователей, осуществляющих выбросы в атмосферу из 3 880 источников. По территориальной принадлежности основная масса выбросов принадлежит промышленным предприятиям, расположенным в городах Павлодарской области: Экибастуз (43%), Аксу (30%) и Павлодар (25%), на долю всех остальных районов области приходится лишь 2% выбросов. При этом основная масса промышленных выбросов Павлодарской области поступает от предприятий теплоэнергетики и металлургической промышленности [1].

Общеизвестно, что промышленные предприятия в зависимости от их мощности и характера производства могут влиять на изменение геохимических особенностей территорий как на локальном уровне, так и в региональном, и в глобальном масштабах [2]. Химические элементы распределяются в объектах окружающей среды и включаются в протекание природных глобальных, региональных биогеохимических циклов. Растения, представляющие уровень продуцентов и обладающие избирательностью процессов поглощения, способствуют включению химических элементов в биологический круговорот [3, 4].

Популяции живых организмов, в том числе растительные объекты, отражают распределение химических элементов по трофическим уровням, участвуя в стабилизации среды как в роли своеобразных биогеохимических барьеров, так и в качестве их накопителей в пищевых цепях. Антропогенная трансформация природной среды, в том числе ее химическое загрязнение, неизбежно ведет к деформации этих обменных процессов, прежде всего, за счет избирательного накопления

химических элементов отдельными компонентами экосистем и изменения их продуктивности [5].

Живые организмы как наиболее динамичная компонента ландшафта всегда реагируют на любое изменение в нем даже при отсутствии видимых нарушений в других составляющих. Поступление высоких концентраций химических веществ в окружающую среду отражается на элементном составе растительности. В настоящее время с развитием высокочувствительных методов определения микроэлементного состава объектов природной среды стало возможным исследовать широкий спектр химических элементов [6].

В настоящей работе представлены данные по накоплению в листе тополя черного химических элементов, в том числе загрязнителей, при фоновых условиях (кларк ноосферы) и при антропогенном воздействии на природную среду в условиях промышленного центра на северо-востоке Казахстана.

Цель работы – оценка эколого-геохимического состояния территории г. Павлодара по данным химического анализа золы листьев тополя черного – *Populus nigra* L.

Задачи исследования:

1. Установить уровни накопления химических элементов в золе листьев *Populus nigra* L. на территории г. Павлодара.

2. Выявить ассоциации микроэлементов, характерных для листьев тополя черного на территории г. Павлодара.

Объектами исследования явились листья тополя черного из 55 точек г. Павлодара. Отбор проб листьев *Populus nigra* L. проводили по стандартной методике [7].

Для количественного анализа на содержание в листьях токсичных, радиоактивных, редкоземельных, благородных и других элементов использовали современный высокочувствительный ядерно-физический метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) с облучением тепловыми нейтронами на Томском исследовательском реакторе ИРТ-Т НИИЯФ в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. Данный метод ИНАА обладает рядом преимуществ по сравнению с другими, в том числе дает возможность определять в широком диапазоне (от  $n.1$  до  $n.10^{-6}\%$ ) содержание химических элементов. При этом не используется химическая подготовка проб, что исключает погрешности за счет приноса или удаления элементов вместе с реактивами [8].

Накопление и обработку аналитических данных проводили на IBM PC/AT совместимых компьютерах с использованием программ STATISTICA, версия 6.0 и

др. При статистической обработке данных определяли следующие основные параметры: пределы значений, математическое ожидание (среднее значение), медиана, мода, стандарт и вариация. После расчета показателей концентрации выборка представлялась в виде набора относительных характеристик аномальности химических элементов в виде геохимических ассоциативных рядов элементов с показателями накопления ( $K_c$ ,  $K_k$ ) в порядке убывания. Такой набор позволил дать качественную и количественную оценку геохимической ассоциации золы листьев *Populus nigra* L.

Для пространственного анализа полученных данных использовали возможности современных геоинформационных технологий (Arc View, Spatial Analyst, Surfer). Интеграция ГИС с результатами эколого-геохимического

исследования позволила получить серию моноэлементных карт-схем, отражающих распределение концентраций элементов-загрязнителей на территории г. Павлодара.

Нами изучен широкий спектр химических элементов (26 элементов), включая редкие, редкоземельные, радиоактивные и благородные элементы в золе листьев *Populus nigra* L.

Анализ полученных материалов показывает, что на территории г. Павлодара наблюдается неравномерное распределение практически большей части изученных элементов. О наличии участков с явными аномальными значениями изучаемых элементов свидетельствуют такие показатели, как стандартное отклонение, коэффициент вариации и др. (табл. 1).

Таблица 1

Статистические параметры распределения микроэлементов в золе листьев *Populus nigra* L. на территории г. Павлодара (55 проб), мг/кг

| Элемент | Среднее | Стандарт. ошибка | Стандарт. отклонение | Медиана | Мода   | Мин   | Макс.  | V, % |
|---------|---------|------------------|----------------------|---------|--------|-------|--------|------|
| Na      | 3075    | 482              | 3574                 | 1500    | 1200   | 600   | 14200  | 116  |
| Ca      | 143764  | 5104             | 37851                | 146000  | 126000 | 67000 | 233000 | 26   |
| Sc      | 0,93    | 0,05             | 0,38                 | 0,9     | 0,88   | 0,1   | 2,2    | 40   |
| Cr      | 99,52   | 8,21             | 60,86                | 88,7    | 58,6   | 1,4   | 369,8  | 61   |
| Fe      | 3138    | 194              | 1441                 | 2800    | 2600   | 700   | 8200   | 46   |
| Co      | 9,23    | 0,54             | 3,99                 | 9       | 13,1   | 2,7   | 19,3   | 43   |
| Zn      | 1145    | 70               | 516                  | 1059    | 1144   | 420   | 420    | 45   |
| Br      | 5,45    | 0,59             | 4,4                  | 4,4     | 0,8    | 0,2   | 23     | 81   |
| Rb      | 59      | 5,4              | 40,24                | 52      | 44     | 20,7  | 301    | 68   |
| Ag      | 0,51    | 0,01             | 0,11                 | 0,5     | 0,5    | 0,5   | 1,3    | 21   |
| Sb      | 0,81    | 0,05             | 0,39                 | 0,78    | 0,1    | 0,1   | 1,71   | 48   |
| La      | 2,24    | 0,11             | 0,39                 | 2,1     | 2,5    | 0,8   | 4,7    | 17   |
| Ce      | 2,69    | 0,27             | 1,97                 | 2,3     | 1,5    | 0,4   | 9,3    | 73   |
| Sm      | 0,42    | 0,02             | 0,17                 | 0,38    | 0,33   | 0,18  | 1,05   | 41   |
| Yb      | 0,20    | 0,02             | 0,11                 | 0,16    | 0,1    | 0,1   | 0,52   | 58   |
| Lu      | 0,02    | 0                | 0,02                 | 0,01    | 0,01   | 0,01  | 0,09   | 79   |
| Th      | 0,52    | 0,03             | 0,23                 | 0,49    | 0,45   | 0,02  | 1,24   | 44   |
| U       | 0,22    | 0,01             | 0,09                 | 0,2     | 0,2    | 0,2   | 0,85   | 43   |
| Hf      | 0,29    | 0,02             | 0,18                 | 0,28    | 0,28   | 0,06  | 1,01   | 60   |
| Au      | 0,04    | 0                | 0,02                 | 0,039   | 0,04   | 0,008 | 0,117  | 61   |
| Ba      | 225     | 10,21            | 75,70                | 221     | 284    | 69    | 470    | 34   |
| Sr      | 932     | 60               | 445                  | 956     | 646    | 6     | 1971   | 48   |
| Cs      | 0,46    | 0,05             | 0,34                 | 0,49    | 0,1    | 0,1   | 1,21   | 73   |
| Tb      | 0,05    | 0,01             | 0,06                 | 0,02    | 0,02   | 0,02  | 0,23   | 120  |
| Ta      | 0,05    | 0                | 0,02                 | 0,05    | 0,05   | 0,05  | 0,19   | 36   |
| Eu      | 0,13    | 0,01             | 0,05                 | 0,13    | 0,16   | 0,05  | 0,28   | 40   |

Исходя из представлений о том, что при симметричном (нормальном) распределении показатели среднего значения, моды и медианы примерно равны [9] установлено, что близки к нему распределения следующей выборки элементов: Sc, Ag, La, Sm, Ta, Zn, Th, Eu, U.

Особенностью техногенных ареалов является неоднородность распределения в них химических элементов. Для сравнительного статистического анализа результатов эколого-геохимических исследований методом ИНАА были построены гистограммы по проверке нормального распределения содержания микроэлементов в золе листьев тополя черного на территории г. Павлодара. В качестве критерия соответствия эмпирического распределения нормальному теоретическому используют отношения показателей асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам [10]. Гистограммы распределения химических элементов в золе листьев показали, что в большинстве случаев наблюдается некоторая асимметрия в левую или

в правую сторону. Следует отметить, что аномальные концентрации элементов, выходящих за пределы вариационной кривой нормального распределения, относятся к следующим: Na, Cr, Fe, Co, Zn, Br, Rb, La, Ce, Sm, Yb, Lu, Th, U, Hf, Au, Ba, Tb, Ta.

Построенная дендрограмма (рис. 1) кластерного анализа элементного состава позволяет разбить изученные химические элементы (25) на группы, которые объединяют элементы с наивысшими значениями меры сходства (парных коэффициентов корреляции Пирсона,  $r$ ).

Геохимические спектры микроэлементов в золе листьев тополя черного образуют значимые ассоциации (рис. 1). Отчетливо выделены несколько групп ассоциаций, среди которых можно выделить элементы, относящиеся к пылеаэрозольным промышленным выбросам, например ТЭЦ (Eu, Fe, Yb, Lu, Ce, Hf, Sm, La, Th, Sc; Sr, Co, Ba, Ca) и нефтехимического производства (Cs, Rb, Au, Br).

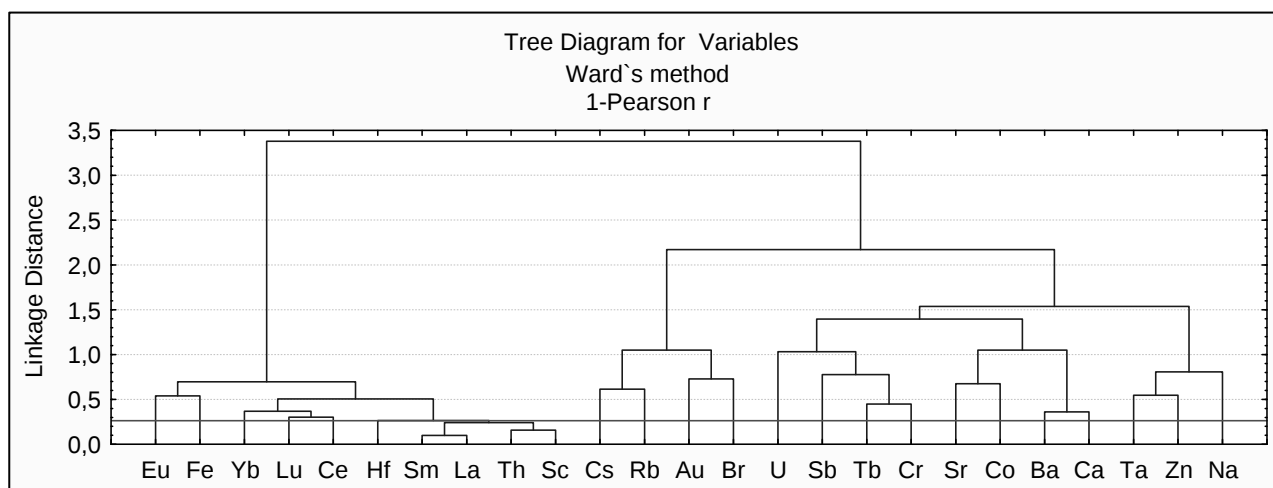


Рис. 1. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра микроэлементов в золе листьев *Populus nigra* L. по методу ИНАА на территории г. Павлодара

Наиболее значимые среди них выделены 2 группы микроассоциаций на территории г. Павлодара: Lu, Ce и Sm, La, Th, Sc; эти микроэлементы могут поступать в растительность через аэрогенные выбросы зольного происхождения.

Результаты анализа полученных данных позволили построить следующие геохимические ряды показателей:  $C_v$ ,  $K_c$  и  $K_k$  (табл. 2). В качестве значений кларка использовали показатель для ноосферы [11].

Таблица 2

Геохимическая специализация на территории г. Павлодара в золе листьев *Populus nigra* L.

| Показатель | Геохимические ряды                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_v$      | Tb > Na > Lu > Ce > Rb > Cr > Hf > Yb > Sb = Sr > Fe > Zn > Th > Co = U > Sm > Sc = Eu > Ba                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| $K_c$      | Cr <sub>21,6</sub> > Sb <sub>8,2</sub> > Zn <sub>6,7</sub> > Na <sub>2,5</sub> > Tb <sub>2,3</sub> > Lu <sub>2,2</sub> > Yb <sub>1,9</sub> > Ca <sub>1,8</sub> > Ba <sub>1,7</sub> > Co <sub>1,5</sub> = Eu <sub>1,5</sub> > Fe <sub>1,3</sub> > Sc <sub>1,2</sub> = Rb <sub>1,2</sub> > Sr <sub>1,1</sub> = U <sub>1,1</sub> = Ta <sub>1,1</sub> > Ce <sub>1,0</sub> = Sm <sub>1,0</sub> = Th <sub>1,0</sub> = Hf <sub>1,0</sub>                                                                  |
| $K_k$      | Au <sub>59</sub> > Zn <sub>25</sub> > Sr <sub>23</sub> > Ca <sub>9,1</sub> > Ba <sub>6,2</sub> > Sb <sub>3,3</sub> > Cr <sub>2,0</sub> > Rb <sub>0,6</sub> > Co <sub>0,4</sub> > Na <sub>0,2</sub> = La <sub>0,2</sub> > Sc <sub>0,1</sub> = Fe <sub>0,1</sub> = Br <sub>0,1</sub> = U <sub>0,1</sub> = Hf <sub>0,1</sub> > Ce <sub>0,08</sub> > Tb <sub>0,07</sub> = Cs <sub>0,07</sub> = Th <sub>0,07</sub> > Lu <sub>0,05</sub> > Ag <sub>0,03</sub> = Ta <sub>0,03</sub> > Yb <sub>0,006</sub> |

Примечание. Полужирным выделены токсичные элементы.

По коэффициенту вариации ( $C_v$ ) токсичных элементов построен следующий ряд убывания: Cr > Sb = Sr > Zn > Co > Ba.

По коэффициенту концентрации ( $K_c$ ) элементы, относящиеся к трем классам токсичности, располагаются в следующем порядке: Cr<sub>21,6</sub> > Sb<sub>8,2</sub> > Zn<sub>6,7</sub> > Ba<sub>1,7</sub> > Co<sub>1,5</sub> > Sr<sub>1,1</sub>.

В целом по городу наиболее высокие показатели (выше единицы загрязнения ( $K_c$ )) имеют следующие токсичные элементы: хром, сурьма, цинк, стронций. Значительно высокие показатели относительно кларка концентрации ( $K_k$ ) отмечены для золота, цинка, стронция, кальция, бария, сурьмы и хрома. К наиболее специфическим элементам относятся токсичные элементы.

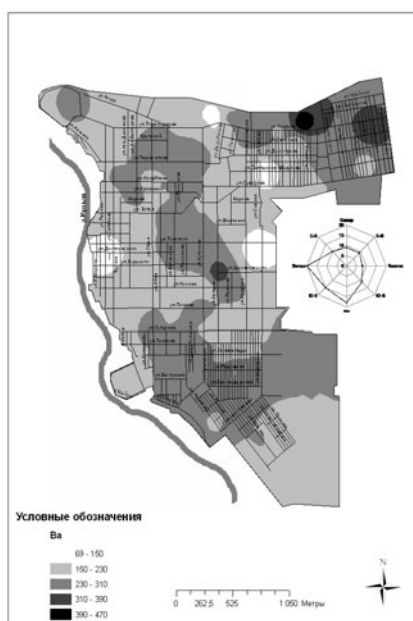
В исследованиях М.С. Панина и Г.С. Ажаева установлен геохимический ряд ( $K_c$ ) элементов в водной фракции снега из селитебной зоны г. Павлодара: Cr<sub>5,6</sub> > Zn<sub>3,1</sub> > Sr<sub>2,8</sub> > Co<sub>2,5</sub> [12, 13]. При сопоставлении данных по накоплению токсичных элементов в золе листьев тополя черного на территории города с геохимическим состоянием жидкой фазы снегового покрова наблюдается региональная сходимость в концентрации хрома, цинка, стронция и кобальта.

На основе полученных данных по химическому составу были построены моноэлементные схематические

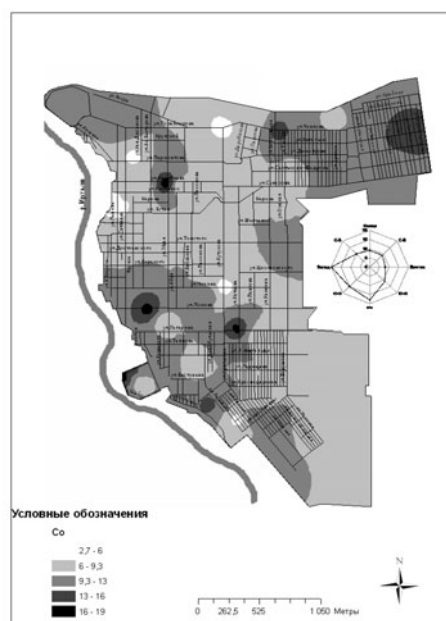
карты распределения токсичных элементов в золе листьев тополя черного *Populus nigra* L. на территории г. Павлодара (рис. 2).

Пространственное распределение рассмотренных элементов (Ba, Co, Sr и Sb) на территории г. Павлодара носит неравномерный, очаговый характер. Отчетливые аномалии бария, кобальта, стронция и сурьмы выражены на юго-западе и северо-востоке города. Небольшие очаги распределения хрома и цинка установлены в центральной и юго-западной частях г. Павлодара.

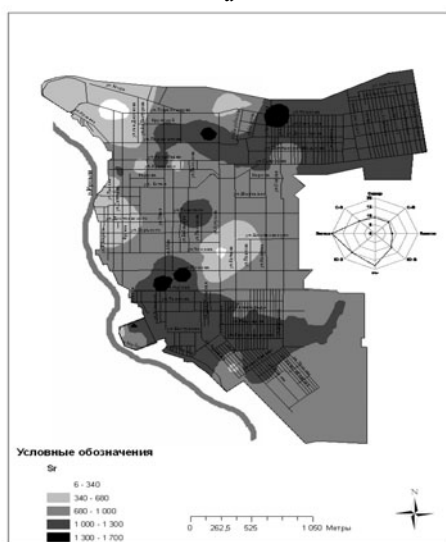
Выраженные аномалии в юго-западной и северо-восточной частях города, на наш взгляд, соответствуют направлению розы ветров (западное, юго-западное) и переносу аэрогенных выбросов ферросплавного завода в г. Аксу и пылевых частиц от золоотвалов угольных разрезов г. Экибастуза, а также связаны с трансграничным переносом элементов по долине р. Иртыша (вверх по течению реки расположен Семипалатинский полигон и металлургические предприятия г. Усть-Каменогорска). Эти данные позволяют утверждать, что уровень накопления изученных химических элементов в золе листьев отражает степень техногенного влияния развитого промышленного комплекса г. Павлодара, Павлодарской области и прилегающих территорий Восточно-Казахстанской области.



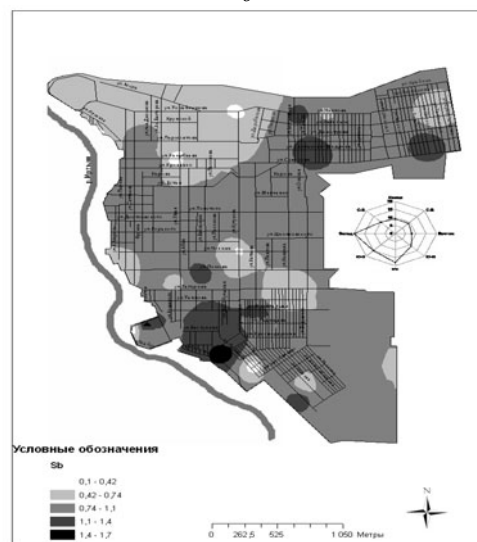
а



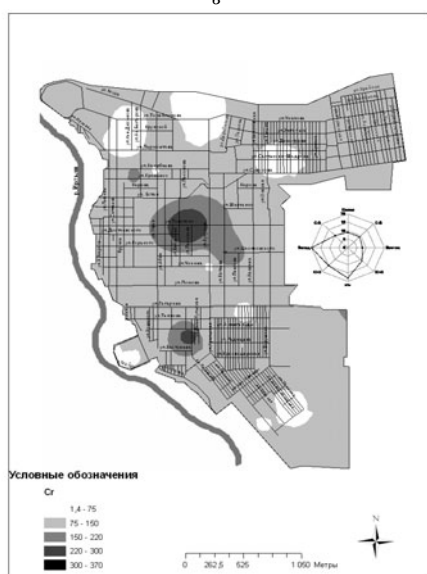
б



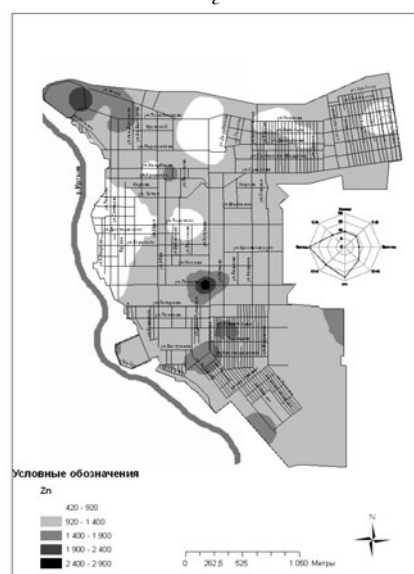
в



г



д



е

Рис. 2. Схематические карты распределения токсичных элементов (Ba, Co, Sr, Sb, Cr, Zn) в золе листьев *Populus nigra* L., мг/кг сухой массы. Содержание токсичных элементов: а – бария; б – кобальта; в – стронция; г – сурьмы; д – хрома; е – цинка

По спектру химических элементов могут быть выделены как минимум 2 группы главных источников воздействия:

- предприятия угольной энергетики и металлообработывающей промышленности (Cr, Zn, Sb, Co);
- нефтехимическое производство и химическая промышленность (Zn, Sb, Co, Rb).

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. В г. Павлодаре установлен высокий уровень накопления химических элементов в золе листьев

*Populus nigra* L. и построен геохимический ряд (по  $K_c$ ):  $Cr_{22} > Sb_{8,2} > Zn_{6,7} > Na_{2,5} > Tb_{2,3} > Lu_{2,2} > Yb_{1,9} > Ca_{1,8} > Ba_{1,7} > Co_{1,5} = Eu_{1,5} > Fe_{1,3} > Sc_{1,2} = Rb_{1,2} = Sr_{1,1} = U_{1,1} = Ta_{1,1} > Ce_{1,0} = Sm_{1,0} = Th_{1,0} = Hf_{1,0}$ .

2. На всей территории г. Павлодара в большей степени в листьях тополя выражены токсичные элементы  $Cr > Sb > Zn$ .

3. Определены как наиболее значимые две микроассоциации: Lu, Ce и Sm, La, Th, Sc на территории г. Павлодара.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет начальника Павлодарского областного территориального управления охраны окружающей среды В.А. Бедненко. Павлодар, 2007. 6 с.
2. Алексеев В.А. Экологическая геохимия: Учебник. М.: Логос, 2000. 627 с.
3. Виноградов А.П. Основные закономерности в распределении микроэлементов между растениями и средой // Микроэлементы в жизни растений и животных. М.: Наука, 1985. С. 7–20.
4. Безель В.С. Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты. Екатеринбург: Голицкий, 2006. 280 с.
5. Безель В.С., Бельский Е.А., Бельская Е.А. и др. Учение В.И. Вернадского о биохимических циклах и роль трофической структуры биоценоза в их стабилизации в фоновых условиях и при химическом загрязнении среды // Тяжелые металлы, радионуклиды в окружающей среде: Докл. IV Междунар. науч.-практ. конф. Семипалатинск, 2008. Т. 1. С. 5–10.
6. Барановская Н.В. Элементный состав биологических материалов и его использование для выявления антропогенно-измененных территорий (на примере южной части Томской области): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2003. С. 28.
7. Уфимцева М.Д., Терехова Н.В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 66 с.
8. Рихванов Л.П., Язиков Е.Г., Сухих Ю.И. и др. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения. Томск: Курсив, 2006. 216 с.
9. Шестаков Ю.Г. Математические методы в геологии: Учеб. пособие. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. 208 с.
10. Михальчук А.А., Язиков Е.Г., Еришов В.В. Статистический анализ эколого-геохимической информации. Томск: ТПУ, 2006. 72 с.
11. Глазовский Н.Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С. 86–95.
12. Панин М.С., Гельдымамедова Э.А., Ажаев Г.С. Эколого-геохимическая характеристика атмосферных осадков г. Павлодара // Доклады II Международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде». Семипалатинск, 2002. Т. 2. С. 142–154.
13. Ажаев Г.С. Оценка экологического состояния г. Павлодара по данным геохимического изучения жидких и твердых атмосферных выпадений: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2007. 25 с.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 1 июня 2010 г.