

## БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРОДОВ БИЙСКА И БАРНАУЛА

М.В. Жданова, А.И. Гусев<sup>1</sup>

Бийский педагогический государственный университет, г. Бийск

<sup>1</sup> ОАО «Горно-Алтайская экспедиция», с. Малоенисейское

Антропогенное загрязнение растительности происходит в городах, где экологический прессинг со стороны промышленных предприятий и транспорта превышает возможности самоочищения растений и превышении «барьерных физиологических механизмов растений» [2]. Целью биогеохимического опробования явилось получение данных о накоплении тяжёлых металлов растениями в условиях различной степени техногенного воздействия на природную среду в пределах городов Бийска и Барнаула и выявление биогеохимических индикаторов такого загрязнения.

По литературным данным [1, 3] химический состав разных растений и различных частей одного растения неодинаков и зависит от ряда факторов: систематического положения растения, его возраста, фазы вегетации, геохимических особенностей ландшафта и состава почвы, времени года. Отмечено, в частности, что наиболее высокое содержание металлов - в листьях, меньшее - в коре, что содержание фосфора в золе трав уменьшается от весны к осени, а сезонные колебания в химическом составе более характерны для листьев, чем для коры. В этой связи в данной работе анализу была подвергнута зола, полученная из коры деревьев (береза, сосна, тополь) и травянистых растений (полынь, пырей ползучий), отобранных в промышленных зонах и в районах вокзалов г. Бийска и Барнаула в июне 2004 года. Травянистые растения сжигались полностью. Средние содержания химических элементов в золе растений и коэффициенты биологического накопления приведены в таблицах 1 и 2.

Как видно из таблицы 1, содержание большинства элементов в золе растений значительно отличается от их среднего содержания в почве, так как растения избирательно поглощают элементы. Интенсивность поглощения характеризуется коэффициентом биологического поглощения  $K_x$ , который рассчитывается как отношение средней концентрации элемента в золе растения к среднему содержанию этого элемента в почве. При  $K_x > 1$  элементы накапливаются в растениях, а при  $K_x < 1$  - только захватываются.

В соответствии с классификацией элементов по интенсивности биологического поглощения [3], фосфор следует отнести к элементам биологического накопления ( $K_x = 3,4-24,0$ ); Mo, Zn, Ag, Cd, Hg – к элементам сильного захвата ( $K_x = 11-77,8$ ); Sr, Ba, Cu, Mn, B, Pb, Sn, Ni - к элементам среднего захвата ( $K_x = 0,5-8$ ); Ti, Al, Co, Cr, Be, F - к элементам слабого захвата ( $K_x = 0,1-1$ ). Необходимо отметить, что в группе сильного захвата элементов в промышленной зоне г. Бийска такие элементы как ртуть, кадмий, цинк и серебро превышают стандартные уровни, указываемые в литературных источниках, на целый порядок и более, что, в свою очередь, свидетельствует о весьма высокой техногенной нагрузке в черте г. Бийска. Обращает на себя внимание различная интенсивность биологического поглощения некоторых элементов для древесных и травянистых растений. Кора деревьев гораздо в меньшей степени накапливает фосфор, чем травянистые растения ( $K_x = 3,4-5,1$  для коры, 21,0 - для полыни и 24,0 – для пырея). Эта же закономерность характерна и для молибдена ( $K_x = 3$  и 7-11 соответственно). Исключение составляет тополь,

где  $K_x$  для молибдена составляет 20. Менее интенсивно, по сравнению с деревьями, захватывают травянистые растения стронций, кобальт. По литературным данным, предполагается наличие в некоторых растениях защитных механизмов, регулирующих поступление микрокомпонентов в различные органы растений, и, в частности, в вегетационные и репродуктивные органы.

Нами проведено выявление парагенетических ассоциаций элементов в опробованных растениях с наибольшим числом проанализированных проб (тополя и полыни) для обеспечения репрезентативности полученных результатов методом главных компонент факторного анализа. Как известно, последний в наибольшей степени соответствует смыслу парагенетического анализа [4]. Об этом свидетельствует структурное единство модели, описывающей поведение химических элементов системы при изменении внешних условий, и модели метода главных компонент:

$$X_i = \sum W_{ij} Z_j, \text{ где } Z_j - \text{значения } j\text{-го фактора; } W_{ij} - \text{факторная нагрузка } j\text{-го фактора на } i\text{-ю переменную; } (i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,r; r \leq m).$$

Расчёт факторных нагрузок для наших данных по выборкам анализов для коры тополя и травы полыни г. Бийска выглядит следующим образом:

$$\Phi \text{ I тополя, } D=42\%, \text{ Zn}_{0,95} \text{ Mo}_{0,86} \text{ Sn}_{0,61} \text{ Cd}_{0,58} \text{ Hg}_{0,53} \text{ Sr}_{0,52} \text{ P}_{0,48} \text{ Pb}_{0,42}$$

$$\Phi \text{ I полыни, } D=39,2, \text{ Ag}_{0,81} \text{ Zn}_{0,77} \text{ P}_{0,72} \text{ Mo}_{0,62} \text{ Hg}_{0,60} \text{ Cd}_{0,58} \text{ Pb}_{0,57} \text{ Cu}_{0,43}$$

где  $\Phi \text{ I}$  – факторные нагрузки первого порядка,  $D$  – вклад факторных нагрузок в процентах; значения факторных нагрузок конкретных элементов даны рядом с элементом при значениях вероятности 0,95%.

### 1. Средние содержания химических элементов в золе растений (С, %) г. Бийска и коэффициенты биологического накопления ( $K_x$ )

| Элементы | Ср. содержание в почве | Виды растений |       |             |       |              |       |              |       |             |       |
|----------|------------------------|---------------|-------|-------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|
|          |                        | Берёза, n=12  |       | Сосна, n=21 |       | Тополь, n=25 |       | Полынь, n=34 |       | Пырей, n=29 |       |
|          |                        | С             | $K_x$ | С           | $K_x$ | С            | $K_x$ | С            | $K_x$ | С           | $K_x$ |
| P        | 0,1                    | 0,34          | 3,4   | 0,51        | 5,1   | 0,52         | 5,2   | 2,1          | 21,0  | 2,4         | 24,0  |
| Mo       | 0,0001                 | 0,0003        | 3,0   | 0,0003      | 3,0   | 0,002        | 20,0  | 0,0011       | 11,0  | 0,0007      | 7,0   |
| Zn       | 0,0009                 | 0,031         | 34,4  | 0,051       | 56,7  | 0,07         | 77,8  | 0,031        | 34,4  | 0,009       | 10,0  |
| Cu       | 0,003                  | 0,025         | 8,3   | 0,017       | 5,7   | 0,009        | 3,0   | 0,012        | 4,0   | 0,008       | 2,7   |
| Mn       | 0,078                  | 0,41          | 5,2   | 0,33        | 4,2   | 0,13         | 1,7   | 0,13         | 1,7   | 0,11        | 1,4   |
| Ag       | 0,00001                | 0,0003        | 30    | 0,0002      | 20,0  | 0,0003       | 30    | 0,0004       | 40,0  | 0,0001      | 10,0  |
| Sr       | 0,021                  | 0,058         | 2,8   | 0,049       | 2,3   | 0,12         | 5,7   | 0,03         | 1,4   | 0,04        | 1,9   |
| Ba       | 0,04                   | 0,24          | 6,0   | 0,08        | 2,0   | 0,08         | 2,0   | 0,06         | 1,5   | 0,05        | 1,25  |
| B        | 0,003                  | 0,010         | 3,3   | 0,009       | 3,0   | 0,008        | 2,7   | 0,015        | 5,0   | 0,011       | 3,7   |
| Pb       | 0,002                  | 0,014         | 7,0   | 0,012       | 6,0   | 0,009        | 4,5   | 0,014        | 7,0   | 0,012       | 6,0   |
| Cd       | 0,00002                | 0,0001        | 5,0   | 0,00009     | 4,5   | 0,0002       | 10,0  | 0,0002       | 10,0  | 0,0001      | 5,0   |
| Hg       | 0,00003                | 0,0002        | 6,7   | 0,0001      | 3,3   | 0,0003       | 10,0  | 0,0003       | 10,0  | 0,0001      | 3,3   |
| Sn       | 0,0002                 | 0,0005        | 2,5   | 0,0004      | 2,0   | 0,003        | 15,0  | 0,0002       | 1,0   | 0,0002      | 1,0   |
| Ni       | 0,003                  | 0,012         | 4,0   | 0,009       | 3,0   | 0,002        | 0,7   | 0,0003       | 0,1   | 0,0004      | 0,13  |
| Ti       | 0,32                   | 0,18          | 0,56  | 0,19        | 0,6   | 0,12         | 0,4   | 0,08         | 0,25  | 0,07        | 0,22  |
| Al       | 10                     | 6,9           | 0,7   | 8,8         | 0,9   | 6,4          | 0,64  | 4,9          | 0,49  | 5,5         | 0,55  |
| Co       | 0,001                  | 0,09          | 90,0  | 0,06        | 60    | 0,0008       | 0,8   | 0,0003       | 0,3   | 0,0002      | 0,2   |
| V        | 0,005                  | 0,004         | 0,8   | 0,003       | 0,6   | 0,003        | 0,6   | 0,002        | 0,4   | 0,003       | 0,6   |
| Cr       | 0,008                  | 0,004         | 0,5   | 0,003       | 0,4   | 0,002        | 0,25  | 0,002        | 0,25  | 0,001       | 0,12  |
| Be       | 0,0002                 | 0,0003        | 1,5   | 0,0004      | 2,0   | 0,0001       | 0,5   | 0,0001       | 0,5   | 0,0001      | 0,5   |
| F        | 0,06                   | 0,045         | 0,75  | 0,05        | 0,8   | 0,06         | 1,0   | 0,07         | 1,2   | 0,04        | 0,67  |

Примечание. Анализы выполнены количественным спектральным методом в лаборатории ИГЕМ (г. Москва); n- количество проанализированных проб.

Полученные результаты в сопоставлении с данными табл. 1 показывают, что выявленные парагенетические ассоциации элементов в полыни и листьях тополя отражают комплексы химических элементов, имеющих техногенную природу, а конкретные значения факторов ранжированы по степени увеличения коэффициентов биологического накопления (или аномальности в опробованных растениях). Парагенетические ассоциации химических элементов в коре тополя и траве полыни имеют черты сходства и различий. У них имеются общие ассоциации элементов (цинк, молибден, фосфор, свинец, кадмий, ртуть), а также специфические, характерные отдельно для тополя (стронций, олово) и для полыни (серебро, медь). Обращает на себя внимание очень высокая техногенная загрязнённость атмосферы г. Бийска многими тяжёлыми металлами, среди которых весьма опасные – ртуть, кадмий, свинец, молибден, интенсивно поглощаемые из всех источников загрязнения и являющиеся наряду с серебром, цинком, оловом, стронцием, медью главенствующими биогеохимическими индикаторами антропогенного воздействия на городской ландшафт.

При рассмотрении источников поступления элементов в растения отмечается, что наиболее интенсивно элементы поглощаются из газовой фазы, слабее - из раствора и еще слабее - из твердой фазы - почвы [2]. Последнее обстоятельство доказывается отсутствием прямой зависимости между содержанием элемента в растении и в почве, на которой произрастает данное растение (табл. 1). Сопоставление средних содержаний элементов в различных видах растительности (табл. 1) показывает, что минимальные концентрации многих элементов (Mo, Cr, V, Sn, Ti, Be, P, Ni, B, Cu) отмечаются в коре березы и сосны. Наряду с этим кора сосны характеризуется самыми низкими содержаниями Ba, Mn, Zn; эти же элементы накапливаются в коре березы в максимальных (сравнительно с другими видами растений) концентрациях. В ряду опробованных древесных видов максимальные средние концентрации Cr, V, Sn, Ti, Be, Co, Cu, Pb характерны для коры тополя. Описанные закономерности объясняются как естественными природными факторами, в силу которых химический состав растений определяется его систематическим положением, биологическими особенностями и условиями в эпоху видообразования, так и влиянием процессов техногенеза. Анализируя химический состав травянистых растений, нужно отметить их повышенную зольность и высокое содержание в них фосфора (в 4-10 раз больше, чем в древесных). Полынь характеризуется относительно высокими концентрациями большинства исследуемых элементов. Произрастая преимущественно в населенных пунктах, на пустырях, полях, она накапливает те же элементы, что и тополь, в сопоставимых количествах (за исключением Co и Pb). Кроме того, в полыни и пырее отмечены максимальные в ряду исследуемых растений содержания P, Mo, Ag, Cd, Hg, Zn, B (табл. 1).

Для проверки тезиса о преимущественном поступлении поллютантов в растения из газовой фазы проведено опробование почв и листьев тополя в районе Бийской табачной фабрики (БТФ). Кроме того, при этом ставилась цель выявления и интерпретации ореолов химических элементов диффузионной природы в системе «пленочные воды почвы - растения» для определения концентраций тяжёлых элементов и экологического состояния депонирующих сред. Высокая информативность оценки экологического состояния природной системы обеспечена высокой чувствительной биогеохимической съёмкой с использованием рентгенорадиометрической аппаратуры (РРА) типа NOKKIA (г. Санкт-Петербург, ЛГУ), которая позволяет изучать рентгеновские спектры анализируемых проб на широкий круг химических элементов. На первом этапе пробы сухих листьев анализировались с помощью РРА. Анализируемый слой составляет первые микроны поверхности, где концентрируется большая часть тяжёлых металлов, накопленных растениями за период от появления листьев до их сбора. Параллельно с этим проводился анализ почвы, на которой произрастал тополь. В результате таких исследований в районе БТФ установлен спектр аномальных элементов: Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni, Sr. Затем проводилось специализированное озоление листьев аномальных проб до чёрной золы с последующим рентгенорадиометрическим определением элементов с аномальными значениями. Анализ приведенных данных показывает, что в районе БТФ ПДК в почве превышают по степени снижения значений: Pb-3,35, Sr- 2,41, Cd- 2,33, Co- 2,11, Cu- 1,26, Ni- 1,2, а в золе листьев: Cd-4,94, Pb- 3,66, Sr- 2,18, Zn- 1,95, Co- 1,81, Cu- 1,34. Эти же показатели в почве и листьях тополя в районе ГИЯ значительно ниже и не превышает 2 ПДК. Концентрации анализируемых элементов на контрольном участке (с. Малоенисейское) в почве и листьях или меньше ПДК, или слабо его превышают. Таким образом, в районе БТФ аномальные концентрации элементов в листьях обусловлены различными источниками загрязнения: выбросом в атмосферу отработанного пара после обработки табака, а также выхлопными газами автотранспорта. Вероятно, аномальные показатели по свинцу, кадмию, цинку, меди, кобальту в почве и листьях связаны с высокой многолетней нагрузкой на окружающую среду движения автотранспорта на отрезке автовокзал – центр и обусловлен значительной загазованностью этой территории и выбросом в атмосферу тетраэтил свинца и других тяжёлых металлов с выхлопными газами. Вероятно, часть кадмия в почве и золе листьев растений обязана выбросу в атмосферу отработанного пара БТФ при обработке табака.

Аномальные концентрации стронция в почве и листьях в районе БТФ обусловлены влиянием ежедневного сброса в атмосферу огромного количества пара после мокрой термической обработки табака. Последний, как известно, является среди растений одним из главнейших концентраторов стронция и, в том числе, радиоактивных изотопов [1], связанных напрямую с интенсивным загрязнением почвенного покрова Алтая радиоактивными изотопами цезия и стронция вследствие ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Во время выброса отработанного пара и в течение последующих нескольких часов в районе БТФ летом стоит неприятный запах табака, который вызывает ухудшение состояния больных астмой. Показательно, что в районе гимназии №2 содержания стронция в депонирующих средах близки к норме, а в районе с. Малоенисейское они ещё ниже. Вероятно, в аномальных пробах присутствует радиоактивный изотоп, являющийся канцерогенным компонентом и негативно влияющим на дыхательные пути человека, вызывая астматические заболевания. Высокие концентрации кадмия также представляют угрозу здоровью людей, так как он, при попадании в организм человека, не выводится и замещает кальций в костях, вызывая ломкость последних. Большая загазованность выхлопными газами автотранспорта в часы пик в районе БТФ обуславливает высокое содержание, помимо указанных выше тяжёлых элементов, также монооксида углерода, бенз(а)пирена, диоксида серы, оксидов азота и других вредных веществ. Угроза здоровью людей усугубляется в районе БТФ тем, что селитебная зона не отделена нормальной санитарно-защитной зоной из растений от автодорог. Особенно остро стоит эта проблема зимой. И совсем не выдерживает никаких санитарных норм строй продуктовых киосков и магазинов, расположенных по обе стороны от автомагистралей, которые не обеспечены ни положенным расстоянием от автотрасс, ни растительной санитарно-защитной зоной. Следует отметить, что скошенную траву на газонах города следует вывозить и уничтожать, а не оставлять на газонах,

как это делается в городе Бийске. Скошенная трава содержит большое количество токсичных элементов (см. табл. 1), которые после перегнивания высохшей травы обогащают этими элементами почву.

Показателем неблагоприятного экологического состояния среды в районе БТФ является отсутствие здесь лишайников, чутко реагирующих на загрязнение почвы тяжёлыми элементами, а также появление некротических пятен на листьях чахлах деревьев и ранняя их дефолиация (июль-август). Зелёных насаждений в районе БТФ явно недостаточно, если учесть, что одно дерево способно очистить воздух от монооксида углерода, пыли и других вредных примесей и восстановить объём кислорода, необходимый для дыхания только трёх человек. Количество деревьев вдоль автомагистрали в районе БТФ не более 30.

Аналогичные данные по средним содержаниям элементов в листьях опробованных растений получены для города Барнаула (табл. 2). По многим элементам наблюдается ещё более высокие концентрации в растениях и, как следствие, более удручающие показатели биологического накопления вредных элементов в различных частях растений по Mo, Zn, Cu, Pb, Cd, Hg и другим элементам.

## 2. Средние содержания химических элементов в золе растений (С, %) г. Барнаула и коэффициенты биологического накопления (К<sub>х</sub>)

| Элементы | Ср. содержание в почве | Виды растений |                |             |                |              |                |              |                |             |                |
|----------|------------------------|---------------|----------------|-------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|-------------|----------------|
|          |                        | Берёза, n=9   |                | Сосна, n=15 |                | Тополь, n=18 |                | Польнь, n=21 |                | Пырей, n=17 |                |
|          |                        | С             | К <sub>х</sub> | С           | К <sub>х</sub> | С            | К <sub>х</sub> | С            | К <sub>х</sub> | С           | К <sub>х</sub> |
| P        | 0,1                    | 0,33          | 3,3            | 0,50        | 5,0            | 0,53         | 5,3            | 2,2          | 22,0           | 2,5         | 25,0           |
| Mo       | 0,0001                 | 0,00025       | 2,5            | 0,0003      | 3,0            | 0,002        | 20,0           | 0,0011       | 11,0           | 0,0007      | 7,0            |
| Zn       | 0,0009                 | 0,041         | 45,5           | 0,051       | 56,7           | 0,072        | 80,0           | 0,033        | 36,7           | 0,0093      | 10,3           |
| Cu       | 0,003                  | 0,024         | 8,0            | 0,019       | 6,3            | 0,011        | 3,7            | 0,015        | 5,0            | 0,009       | 3,0            |
| Mn       | 0,078                  | 0,43          | 5,5            | 0,35        | 4,5            | 0,15         | 1,9            | 0,14         | 1,8            | 0,12        | 1,3            |
| Ag       | 0,00001                | 0,00032       | 32             | 0,00023     | 23,0           | 0,0003       | 30             | 0,0004       | 40,0           | 0,00012     | 12,0           |
| Sr       | 0,021                  | 0,06          | 2,9            | 0,05        | 2,4            | 0,13         | 6,2            | 0,03         | 1,4            | 0,05        | 2,4            |
| Ba       | 0,04                   | 0,26          | 6,5            | 0,08        | 2,0            | 0,09         | 2,25           | 0,07         | 1,75           | 0,06        | 1,5            |
| B        | 0,003                  | 0,01          | 3,3            | 0,008       | 3,0            | 0,008        | 2,7            | 0,017        | 5,7            | 0,013       | 4,3            |
| Pb       | 0,002                  | 0,015         | 7,5            | 0,014       | 7,0            | 0,011        | 5,5            | 0,015        | 7,5            | 0,013       | 6,5            |
| Cd       | 0,00002                | 0,00015       | 7,5            | 0,0001      | 5,0            | 0,00022      | 11,0           | 0,0002       | 10,0           | 0,0002      | 10,0           |
| Hg       | 0,00003                | 0,00024       | 8,0            | 0,00012     | 4,0            | 0,0003       | 10,0           | 0,0003       | 10,0           | 0,00012     | 4,0            |
| Sn       | 0,0002                 | 0,0005        | 2,5            | 0,0004      | 2,0            | 0,003        | 15,0           | 0,0002       | 1,0            | 0,0002      | 1,0            |
| Ni       | 0,003                  | 0,012         | 4,0            | 0,009       | 3,0            | 0,002        | 0,7            | 0,0003       | 0,1            | 0,0004      | 0,13           |
| Ti       | 0,32                   | 0,18          | 0,56           | 0,19        | 0,6            | 0,12         | 0,4            | 0,08         | 0,25           | 0,07        | 0,22           |
| Al       | 10                     | 6,9           | 0,7            | 8,8         | 0,9            | 6,4          | 0,64           | 4,9          | 0,49           | 5,5         | 0,55           |
| Co       | 0,001                  | 0,091         | 91,0           | 0,063       | 63             | 0,0008       | 0,8            | 0,0003       | 0,3            | 0,0002      | 0,2            |
| V        | 0,005                  | 0,004         | 0,8            | 0,003       | 0,6            | 0,003        | 0,6            | 0,002        | 0,4            | 0,003       | 0,6            |
| Cr       | 0,008                  | 0,004         | 0,5            | 0,003       | 0,4            | 0,002        | 0,25           | 0,002        | 0,25           | 0,001       | 0,12           |
| Be       | 0,0002                 | 0,0003        | 1,5            | 0,0004      | 2,0            | 0,0001       | 0,5            | 0,0001       | 0,5            | 0,0001      | 0,5            |
| F        | 0,06                   | 0,048         | 0,8            | 0,053       | 0,88           | 0,06         | 1,0            | 0,07         | 1,2            | 0,047       | 0,78           |

Примечание. Анализы выполнены количественным спектральным методом в лаборатории ИГЕМ (г. Москва); n-количество проанализированных проб.

Таким образом, биогеохимические индикаторы техногенного загрязнения растительности городов Бийска и Барнаула весьма разнообразны и зависят от источников поллютантов (различные промышленные предприятия, вокзалы, автотрассы). Биогеохимические индикаторы техногенного загрязнения различны и имеют специфические ассоциации в разных растениях. Выявленные парагенетические ассоциации элементов-загрязнителей биоты городов можно считать пока предварительными. В дальнейшем предполагается проведение подобного обследования на более широкий круг растений и выявление селективного вклада каждого предприятия в загрязнение биоты с целью составления экологических паспортов двух крупнейших городов Алтайского края.

### Литература

1. Гусев А.И., С.С. Лихачёва, О.И. Гусева, Е.И. Ажигулова. Экологическое состояние среды в районе табачной фабрики г. Бийска // Алтай: экология и природопользование. Бийск, 2003, с.313-316.
2. Ковалевский А.Л. Биогеохимические поиски рудных месторождений М., Недра, 1984, 172 с.
3. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М., Высшая школа. 1975, 276 с.
4. Смирнов Б.И. Статистические методы выделения ассоциаций химических элементов и минералов // Обзор. М., Наука, 1975, 62 с.