

УДК 550.42

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ БЕЛАРУСИ

© 2001 г. В. Б. Кадацкий\*, Л. И. Васильева\*, Н. И. Тановицкая\*, С. Е. Головатый\*\*

\* *Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАНБ*

220114 Минск, Староборисовский тракт, 10

\*\* *Институт почвоведения и агрохимии ААНБ*

220010 Минск, ул. Казинца, 62

Поступила в редакцию 06.12.99 г.

Выполнены исследования по изучению распределения форм нахождения группы тяжелых металлов (ТМ) в гумусовом горизонте почв Березинского заповедника и Браславского национального парка. Для обеих территорий выявлена тесная сопоставимость соотношений активной формы ТМ к инертной (при следовых значениях подвижной формы) вне зависимости от их валовых содержаний. Предложенные расчетные коэффициенты техногенности ( $K_t$  и  $X_t$ ) и подвижности ( $K_{п}$  и  $X_{п}$ ) можно считать выражением природного соотношения форм ТМ для Северной и Центральной литогеохимической провинций Беларуси.

*Ключевые слова:* педосфера, гумусовый горизонт, ландшафт, трансформация, литогеохимическая провинция, урбанизированные территории.

Современный мониторинг состава компонентов ландшафта имеет дело с результатами их геохимической трансформированности, причем различного масштаба. Это объясняется длительным воздействием антропогенного фактора, постепенным нарастанием результатов этого воздействия, включением технофильных (искусственных) микроэлементов (МКЭ) в естественные биогеохимические циклы миграции вещества. Круговорот МКЭ в основном компоненте ландшафта – педосфере – разными авторами трактуется неоднозначно. Это объясняется существенными вариациями их естественных концентраций даже в пределах одного почвенного типа, различным поступлением и спецификой миграции технофильных элементов в зависимости от физико-химических условий почвенной среды. Тем не менее в последние годы балансы МКЭ рассчитывали для разных почвенных экосистем. Разница в привносе и выносе показывает, что для большинства элементов скорость аккумуляции в гумусовом горизонте имеет положительное значение (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Для понимания скрытых процессов геохимической трансформированности почвенного покрова в импактных районах Беларуси, в которых проживает более 71% населения страны, необходимы сопоставимые исследования в ландшафтах фоновых территорий, к каковым в первую очередь относятся заповедники и национальные парки. Изучение масштабов глобального поступления и распределения технофильных МКЭ пер-

спективно осуществлять на основе анализа форм их нахождения.

При выявлении любого загрязнения основной задачей является вычленение техногенной составляющей в общем потоке химических элементов. Как показали поисковые исследования по оценке загрязнения урбанизированных территорий ТМ на примере крупного промышленного центра – г. Минска, это выполнимо на основании соотношений их форм (Васильева, Кадацкий, 1996, 1998; Vasilyeva, Kadatsky, 1994). Дальнейшие исследования по изучению трансформации почвенного покрова других городов Минской области с различным промышленным потенциалом подтверждают перспективность такого методического подхода, который был продиктован следующими теоретическими соображениями. Как известно, в кислотную вытяжку переходят гидроокислы, соли, окислы металлов. Поскольку для анализа отбирали верхний гумусовый горизонт, который, как правило, имеет слабокислую среду, то наличие карбонатных соединений здесь маловероятно. Окислы и гидроокислы Fe и Mn обуславливают более устойчивую форму закрепления металлов (всех природных микроэлементов). При техногенном обогащении почвы химическими элементами роль имеющихся гидроокислов в закреплении вновь поступивших ТМ, по-видимому, невелика, поскольку их сорбционные возможности в основном реализованы. В процессе закреплении могут участвовать лишь вновь образующиеся гидроокислы. В кислотную вытяжку

переходит также фульватный комплекс органического вещества. Кислая среда техногенных почв способствует формированию большей доли дисперсных подвижных соединений фульватной природы (Аржанова, Елпатьевский, 1990). В естественных природных ландшафтах также может встречаться обстановка с кислыми условиями среды, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

Таким образом, при изучении техногенных почв элювиальных ландшафтов извлечение в кислотную вытяжку происходит, вероятнее всего, из техногенных продуктов, поступающих на поверхность в основном в виде окислов и солей металлов. Исходя из такого подхода в кислотной фракции должна преобладать техногенная составляющая.

Принципиальный момент предложенной методики заключается в том, что выделение техногенной природной составляющей в общем содержании ТМ осуществляется прямым путем, без сравнения с некими фоновыми концентрациями. Введенный нами коэффициент техногенности ( $K_t$  – отношение активной формы к инертной) позволил выявить закономерную зависимость величины  $K_t$  от степени антропогенного воздействия. По общепринятому коэффициенту концентрации ( $K_c$  – отношение валового содержания элемента в исследуемом объекте к его среднему региональному содержанию) такая зависимость просматривается только при значительной степени загрязнения, при этом наблюдается корреляция между  $K_t$  и  $K_c$ . Как установлено детальными исследованиями, при техногенной трансформированности почв значения их больше единицы, и чем выше степень загрязнения, тем больше значения коэффициентов.

С целью выяснения дальнейших возможностей этой методики было проведено сравнительное изучение почв сопоставимых элювиальных ландшафтов Березинского биосферного заповедника и национального парка “Браславские озера”. Здесь был применен тот же методический подход, что и к урбанизированным территориям. Помимо  $K_t$  и  $K_c$ , их суммарных значений –  $X_t$  и  $X_c$ , рассчитывался также коэффициент подвижности –  $K_p$  (отношение подвижной формы к инертной). В настоящей работе проводится сравнительный анализ распределения валовых содержаний и форм нахождения основных элементов-загрязнителей (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Cr) в гумусовом горизонте почв Березинского заповедника (БЗ) и Браславского парка (БП).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Изучали сопоставимые элементарные ландшафты в пределах охраняемых природных терри-

торий. Основными пробными площадками, приуроченными к выровненным плакорным повышениям рельефа, выступали коренные хвойные фитоценозы на минеральных почвах. Характерными экологическими условиями развития этих биогеоценозов являются их олиготрофность и слабая увлажненность почвенного профиля. Грунтовые воды находятся на значительной глубине (более 3–5 м) и растения получают влагу исключительно за счет атмосферных осадков. Как правило, почвенный покров анализируемых участков развивается на песчаных и супесчаных материнских породах. Однако для Браславского парка в отдельных случаях отбираемые пробы непосредственно представлены и подстилаются глинистым субстратом, характерным для Северной литогеохимической провинции Беларуси.

Одним из основных критериев отбора проб являлась строгая фиксация в натурных условиях и картографическая привязка пунктов геохимических наблюдений, что гарантирует преемственность исследований, сравнимость результатов при последующих измерениях с целью выявления природных закономерностей в распределении МКЭ и тенденций их антропогенной трансформации. Валовые концентрации Cu, Pb, Ni, Co, Cr устанавливали количественным эмиссионно-спектральным методом. Ввиду низкой чувствительности определения Zn этим методом, его валовое содержание определяли атомно-абсорбционным методом с полным разложением пробы.

Формы ТМ определяли по трехступенчатой схеме: 1 – подвижная (элюент 1 N  $\text{CH}_3\text{COONa}$ ); 2 – потенциально-подвижная или активная (элюент 1 N HCl); 3 – прочно связанная или инертная. Элюаты после выделения подвижной и активной форм анализировали атомно-абсорбционным методом. Инертную форму рассчитывали по разности между валовым содержанием ТМ и суммой подвижной и активной форм.

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ

По валовому содержанию рассчитывали коэффициент концентрации  $K_c$ . Для расчета  $K_c$  заповедных территорий использовался региональный фон, т.е. среднее содержание элемента в почвах Беларуси (Лукашев, Кадацкий, 1982; Петухова, 1987). Для каждого определяемого элемента по соотношению активной и инертной форм рассчитывали коэффициент техногенности ( $K_t$ ), по соотношению подвижной и инертной форм – коэффициент подвижности ( $K_p$ ). Для каждой исследуемой территории были рассчитаны суммарные усредненные коэффициенты  $X_c$ ,  $X_t$ ,  $X_p$ .

Коэффициент техногенности ( $K_t$ ) рассчитывается по отношению процентного содержания потенциально подвижной формы ТМ (активная)

к процентному содержанию прочно связанной формы (инертная):

$$K_T = \frac{\text{активная форма (\%)}}{\text{инертная форма (\%)}} \quad (1)$$

Коэффициент концентрации ( $K_c$ ) рассчитывается по отношению валового содержания ТМ в объекте к его среднему содержанию по Республике Беларусь (региональный фон):

$$K_c = \frac{\text{валовое содержание (мг/кг)}}{\text{среднее содержание (мг/кг)}} \quad (2)$$

Коэффициент подвижности рассчитывается по отношению процентного содержания подвижной формы к инертной:

$$K_{\Pi} = \frac{\text{подвижная форма (\%)}}{\text{инертная форма (\%)}} \quad (3)$$

Усредненный коэффициент техногенности ( $X_T$ ) рассчитывается как среднее арифметическое из суммы коэффициентов  $K_T$  для  $n$  элементов в  $m$  образцах по формуле

$$X_T = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{Tij}}{nm} \quad (4)$$

где  $K_{Tij}$  – коэффициент техногенности  $i$ -го элемента в  $j$ -м образце;  $n$  – число учитываемых элементов;  $m$  – число образцов.

Усредненный коэффициент концентрации ( $X_c$ ) рассчитывается как среднее арифметическое из суммы коэффициентов  $K_c$  для  $n$  элементов в  $m$  образцах по формуле

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{cij}}{nm} \quad (5)$$

где  $K_{cij}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го элемента в  $j$ -м образце;  $n$  – число учитываемых элементов;  $m$  – число образцов.

Усредненный коэффициент подвижности ( $X_{\Pi}$ ) рассчитывается как среднее арифметическое из суммы коэффициентов  $K_{\Pi}$  для  $n$  элементов в  $m$  образцах по формуле

$$X_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{\Pi ij}}{nm} \quad (6)$$

**Таблица 1.** Валовые содержания микроэлементов в гумусовом горизонте почв заповедных территорий, г/т

Объект	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	Cr
Березинский заповедник ( $n = 18$ )	3.3	14.3	26.8	1.0	1.5	9.3
Браславский парк ( $n = 14$ )	15.4	28.7	19.5	13.9	Не обн.	12.0

**Таблица 2.** Суммарные коэффициенты техногенности ( $X_m$ ), концентрации ( $X_c$ ) и подвижности ( $X_n$ ) в почвах заповедных территорий

Объект	$X_c$	$X_m$	$X_n$
Березинский заповедник ( $n = 18$ )	0.9	0.5	0.05
Браславский парк ( $n = 14$ )	2.5	0.4	0.05

где  $K_{\Pi ij}$  – коэффициент подвижности  $i$ -го элемента в  $j$ -м образце;  $n$  – число учитываемых элементов;  $m$  – число образцов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ распределения валовых содержаний Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Cr и их форм для заповедных территорий проводился в пределах элювиальных ландшафтов как наиболее информативного объекта в отношении изучения масштабов и структуры аэральных выпадений. Эти металлы были выбраны как основные глобальные элементы-загрязнители, присутствующие в гумусовом горизонте практически всех почвенных разностей исследуемого региона (Лукашев, Окунь, 1991; Хомич и др., 1996). Кроме того, они хорошо идентифицируются распространенными аналитическими методами и являются удобными показателями трансформации почв.

В табл. 1 приведены усредненные валовые содержания для шести определяемых элементов. Как видно, разница в валовом содержании большинства изученных элементов для обеих охраняемых территорий существенна. Причем наблюдается тенденция превышения концентрации МКЭ (исключение составляет Pb) в почвах Браславского парка, что, вероятно, связано с преобладанием глинистых и алевритовых частиц. Как известно, мелкоземистые почвы на моренном субстрате в условиях Беларуси характеризуются повышенным содержанием МКЭ по сравнению с песчаными и супесчаными.

По результатам изучения форм ТМ были построены диаграммы соотношения  $K_T$  и  $K_c$ . Для примера на рис. 1 приведены только диаграммы по Cu и Pb. Следует сказать, что в элювиальных почвах БЗ и БП для всех элементов  $K_T < 1$ , за исключением отдельных проб, где для свинца  $K_T > 1$



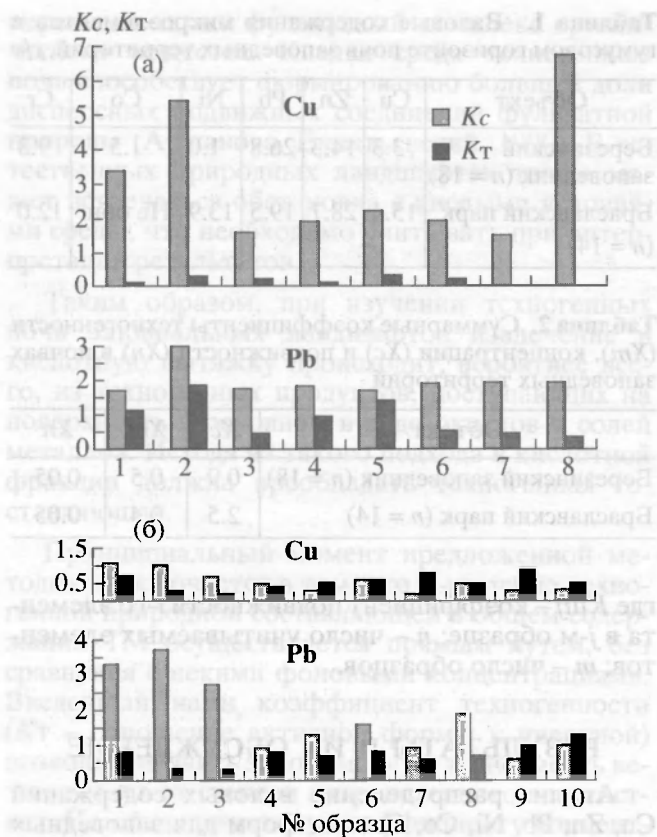


Рис. 1. Коэффициенты концентрации ( $K_c$ -1) и техногенности ( $K_t$ -2) по Cu и Pb для почв Brasлавского парка (а) и Березинского заповедника (б).

(превышение незначительное). По коэффициенту концентрации картина совсем иная: для свинца  $K_c > 1$  в большинстве случаев как в заповеднике, так и в парке; для меди  $K_c < 1$  в почвах заповедника, тогда как в почвах парка  $K_c > 1$ , причем достигает значений  $K_c = 5-6$ .

Если сопоставить БЗ и БП по усредненным  $K_c$  и  $K_t$  для пяти элементов (Co в почвах БП не обнаружен), то можно сказать, что по  $K_t$  эти территории сопоставимы, по  $K_c$  между ними просматриваются различия (рис. 2). Таким образом, при оценке эколого-геохимического состояния по валовому содержанию ТМ эти исследуемые объекты резко отличаются.

В табл. 2 приведены суммарные усредненные коэффициенты техногенности ( $X_t$ ), концентрации ( $X_c$ ) и подвижности ( $X_p$ ). Усреднение проводилось по трем элементам (Cu, Zn, Pb), так как в спектре атмосферных поллютантов эти элементы, как глобальные загрязнители, занимают ведущее место. В урбанизированных почвах коэффициент техногенности, как правило, для Cu, Zn, Pb всегда больше единицы, а в сильно загрязненных условиях он может достигать значений 5-10, что свидетельствует об информативности этих

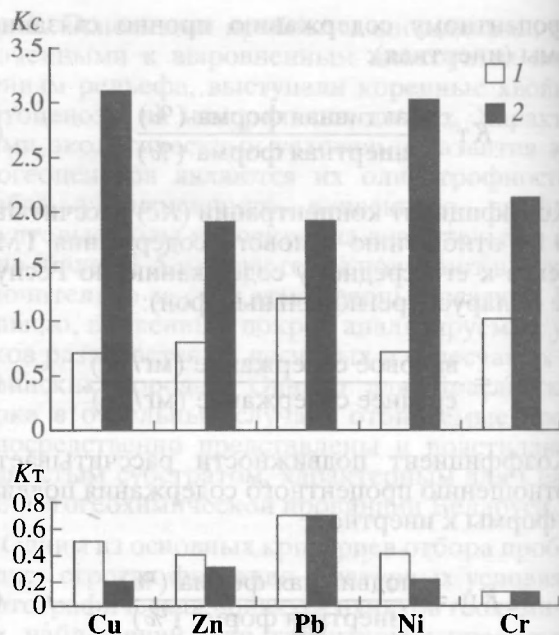


Рис. 2. Усредненные коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) и техногенности ( $K_t$ ) по Березинскому заповеднику (1) и Brasлавскому парку (2).

элементов. Для Ni, Co, Cr такие высокие значения  $K_t$  не присущи. Необходимо отметить, что в исследуемых объектах только для Zn характерно наличие подвижной формы, причем значения  $X_p$  минимальны (0.05), что говорит о небольших содержаниях подвижной составляющей Zn. Из табл. 2 видно, что значения  $X_t$  и  $X_p$  для изученных охраняемых территорий сопоставимы и меньше единицы. По  $X_c$  исследуемые объекты резко отличаются: для БП  $X_c > 1$ , для БЗ  $X_c < 1$ . Иными словами, по коэффициенту концентрации Brasлавский парк можно рассматривать как "загрязненную" территорию, поскольку на значения  $K_c$  существенно влияют минералогические особенности почв, присущие Северной геохимической провинции. Иными словами, при определенных условиях  $K_c$  не позволяет судить о техногенной составляющей в валовых содержаниях МКЭ. Напротив, значения  $K_t$ , являющегося автономным, свидетельствуют о том, что никакого существенного техногенного загрязнения здесь не наблюдается.

## ВЫВОДЫ

1. Вне зависимости от варибельности валовых содержаний тяжелых металлов в гумусовом горизонте почв Brasлавского национального парка и Березинского биосферного заповедника соотношение активной и инертной форм для обоих объектов имеет близкие значения ( $X_t = 0.4-0.5$ ).

2. Предложенные коэффициенты техногенности ( $K_t$  и  $X_t$ ) можно использовать для эколого-геохимической оценки состояния любых территорий, включая девственные ландшафты, так как в сравнении с другими оценочными критериями они не привязаны к субъективным фоновым показателям и не зависят от минералогических особенностей почвенного субстрата.

3. Учитывая ранее выполненные подобные ландшафтно-геохимические работы для почв урбанизированных территорий, можно считать обоснованным, что эти количественные показатели являются выражением природного соотношения форм элементов для Северной и Центральной литогеохимических провинций региона. Более того, полученные значения коэффициентов техногенности для почв охраняемых территорий, по-видимому, могут служить в качестве естественных фоновых геохимических критериев для определенной физико-географической области.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 194 с.

Васильева Л.И., Кадацкий В.Б. Формы тяжелых металлов в почвах урбанизированных территорий // Природопользование. Минск: ИПИПРЭ АНБ, 1996. Вып. 1. С. 139–143.

Васильева Л.И., Кадацкий В.Б. Формы тяжелых металлов в почвах урбанизированных и заповедных территорий // Геохимия. 1998. № 4. С. 426–429.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Лукашев В.К., Окунь Л.В. Изучение загрязнения почв тяжелыми металлами на примере городов Беларуси // Докл. АН БССР. 1991. Т. 35. № 11. С. 1009–1012.

Лукашев К.И., Кадацкий В.Б. Новые данные о микроэлементах в поверхностных образованиях территорий Беларуси // Докл. АН БССР. 1982. Т. 26. № 4. С. 362–364.

Петухова Н.Н. Геохимия почв Белорусской ССР. Минск: Наука и техника, 1987. 231 с.

Хомич В.С., Какарека С.В., Парфенов В.В. Анализ структуры полей распределения тяжелых металлов в почвах г. Минска // Природопользование. Минск: ИПИПРЭ АНБ, 1996. Вып. 1. С.134–139.

Vasilyeva L., Kadatsky V. Heavy metal forms in soils of urban territories // Abstract of International Symposium on environmental Geochemistry. Krakov: University of Mining and Metallurgy, 1994. P. 80–81.