

*Л.И. СМЫКОВИЧ***КОНЦЕНТРАЦИЯ ЦИРКОНИЯ И КРЕМНИЯ НА ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРАХ**

Geochemical features of the elements are closely related to the spatial structure of geosystems. This study examines the role of the barrier geosystem as an independent element landscape-geochemical structure in the redistribution of zirconium and silicium.

Геохимия элемента, геохимия процесса и геохимия системы – три составляющие комплексного геохимического исследования. Анализ геохимии элемента важно начинать с рассмотрения ландшафтно-геохимической обстановки, в которой происходит его миграция. Накоплен обширный материал по особенностям концентрации и перераспределения элементов между компонентами географической оболочки на региональном и глобальном уровнях. Между тем особенности перераспределения элементов между элементарными ландшафтами пока мало исследовали. Изучение этих особенностей важно не только само по себе (чтобы закрыть «белое пятно» в геохимии элемента), но и для установления влияния вертикальной и горизонтальной структур ландшафта на формирование миграционного потока элемента, выявления зоны его аккумуляции, транзита в конкретных ландшафтно-геохимических условиях (геохимия процесса и геохимия системы).

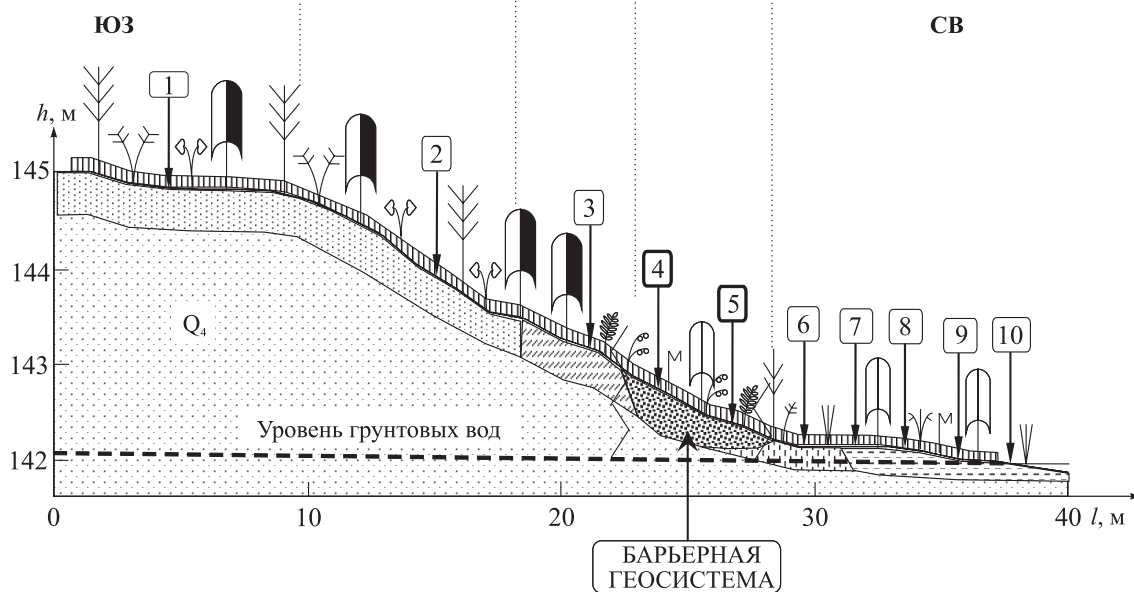
Геохимические особенности элементов тесно связаны с пространственной структурой геосистем. В данном исследовании анализируется роль барьерной геосистемы как самостоятельного элемента ландшафтно-геохимической структуры в перераспределении циркония (Zr) и кремния (Si).

Изучение пространственного распределения Zr и Si выполнялось с помощью метода ландшафтно-геохимического профилирования, который позволяет наиболее полно использовать все преимущества системного анализа. Ландшафтно-геохимический профиль (катена) «Белое Болото» (рис. 1) находится в бассейне р. Припять, в восточной части Мозырского Полесья, в пределах вторичных водно-ледниковых умеренно дренированных ландшафтов с сосновыми, широколиственно-сосновыми, дубовыми лесами на дерново-подзолистых, реже – заболоченных почвах [1]. Ландшафтная специфика бассейна Припяти выражается в широком распространении супераквальных комплексов, на долю которых приходится до 27 % территории региона [2]. В краевой зоне переходного болота от местного водораздела – вершины песчаного холма – к днищу замкнутого заболоченного понижения с помощью точек комплексного описания (445, 446 и др.) выделены и описаны структурно-функциональные части сопряжения элементарных ландшафтов, представляющего собой последовательную смену геосистем: Н/Э/е – Н/ТЭ/е – Н/ТА/е – Н–Н-Fe/ТС/fg – Н-Fe/С/fg\*. Протяженность профиля около 40 м. Геосистема

\* Индекс геосистемы включает класс, род, вид элементарного ландшафта. Классы: Н – кислый окислительный, Н-Fe – кислый восстановительный, Н–Н-Fe – переходный, характеризующийся высокой динамикой окислительно-восстановительных условий, приурочен к барьерной геосистеме. Роды: Э – элювиальный, ТЭ – трансэлювиальный, ТА – трансаккумулятивный, ТС – трансупераквальный, С – супераквальный. Виды: е – на эоловых отложениях, fg – на флювиогляциальных отложениях.

краевой зоны болота Н–Н-Fe/ТС/fg является барьерной, где выделен комплексный барьер, состоящий из сорбционного G2, кислого E2, глеевого C2 и биогеохимического в почве и фитоценотического барьера поглощения в наземном покрове [3, 4].

Ряд	БИОГЕННЫЙ				
Группа	ЛЕСНЫЕ			ЛУГОВЫЕ И БОЛОТНЫЕ	
Тип	ВТОРИЧНЫЕ МЕЛКОЛИСТВЕННЫЕ ЛЕСА			БОЛОТНЫЕ	
Семейство	Ландшафты сосново-березовых лесов			Ландшафты лесоболотные	Ландшафты переходных болот
Класс	Н			Н–Н-Fe	Н-Fe
Род	Э	ТЭ	ТА	ТС	С
Вид	На эоловых песках			На флювиогляциальных песках	



Условные обозначения

- подзолистая песчаная иллювиально-железистая
  - дерново-подзолистая глееватая иллювиально-гумусовая
  - торфяно-подзолисто-глеевая иллювиально-гумусовая
  - торфянисто-подзолисто-глеевая иллювиально-гумусовая
  - перегнойно-подзолисто-глеевая иллювиально-гумусовая
- 
- сосна
  - багульник
  - осока
  - береза
  - черника
  - мятлик
  - можжевельник
  - папоротник
  - зеленые мхи
  - крушина
  - ситник
  - границы геохимического барьера

Рис. 1. Ландшафтно-геохимический профиль «Белое Болото»

В литературе Zr и Si характеризуются как геохимически инертные элементы [5, 6]. Благодаря высокой устойчивости к выветриванию циркон – минерала циркония – элемент используется при изучении генезиса почв. Вместе с тем есть свидетельства подвижности Zr в почвах под действием органических кислот в форме комплексных соединений [6, 7]. В ландшафтах Мещеры латеральное перераспределение Zr характеризуется как контрастное; при этом отмечается концентрация элемента в торфяных горизонтах суперкавалных лесных и болотных ландшафтов [8]. В бассейне Припяти установлена относительная концентрация Zr в верхних слоях торфяно-болотных почв [2].

Валовое содержание Zr и Si определялось с помощью рентгенофлуоресцентного спектрального анализа. В пределах катены максимальное содержание Zr (200÷300 мг/кг) наблюдается в болотно-подзолистых почвах Н-Н-Fe/ТС/fg и Н-Fe/C/fg комплексов (рис. 2). В минеральных почвах холма (Н/Э/e, Н/ТЭ/e, Н/ТА/e) повышенным содержанием элемента (110÷140, до 200 мг/кг) характеризуются главным образом гумусовые горизонты. Существенных сезонных различий в распределении элемента в почвенном покрове катены не наблюдается, за исключением гумусового горизонта ТА-комплекса. Область максимального содержания Zr в болотно-подзолистых почвах выходит за границу барьерной геосистемы и постепенно как бы выклинивается по мере продвижения в глубь болота. Можно предположить, что емкость барьерной геосистемы оказалась мала для Zr, поэтому область концентрации данного элемента шире, чем для некоторых других элементов [4]. В целом просматривается зависимость между содержанием Zr в почвенном покрове катены и увеличением увлажненности и содержания органического вещества. Так, почвы ТС- и С-комплексов характеризуются значительно более высоким содержанием элемента, чем подзолистая и дерново-подзолистая почвы холма, где концентрация Zr в верхних горизонтах колеблется в нешироком диапазоне значений (110÷150 мг/кг) и незначительно уменьшается с глубиной (60÷100 мг/кг). В пределах барьерной геосистемы с прилегающей к ней частью С-комплекса радиальная дифференциация элемента отсутствует, его содержание изменяется от 190 до 230 мг/кг. В центральной части болота количество Zr в верхних горизонтах составляет 190÷230 мг/кг, уменьшаясь до 97÷125 мг/кг в горизонте В<sub>h</sub>, подпитываемом грунтовыми водами.

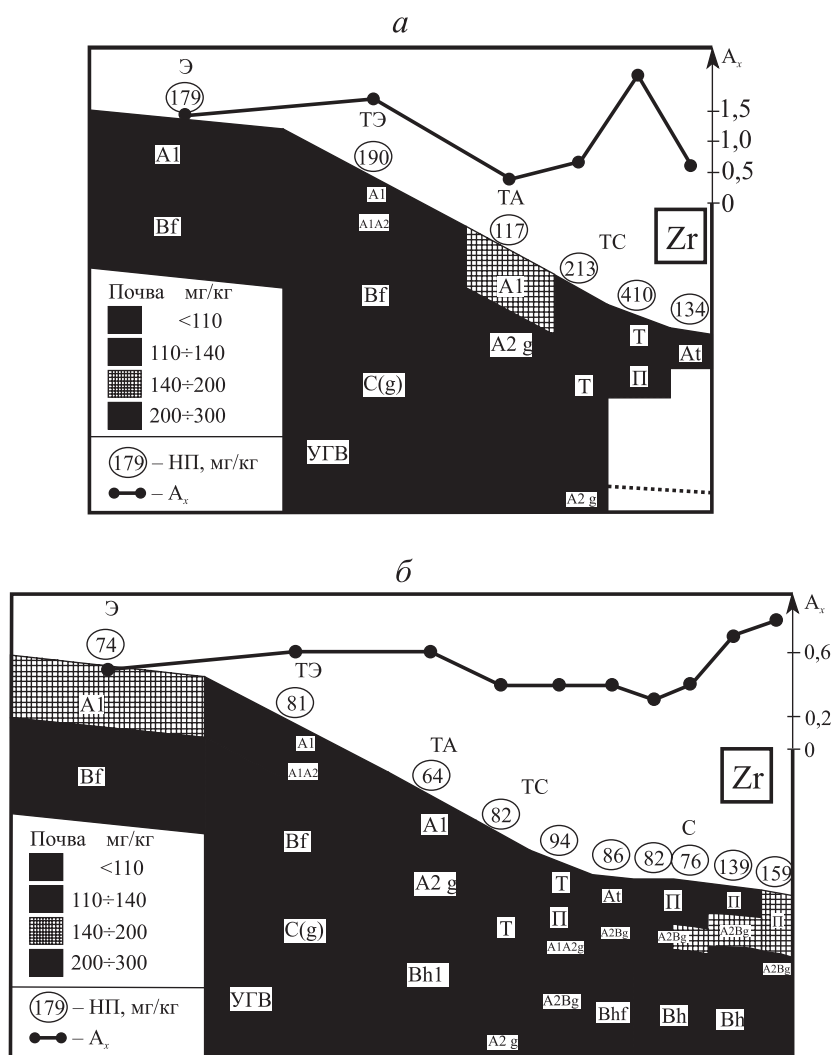


Рис. 2. Пространственное распределение Zr по катене летом (а) и осенью (б)

Таким образом, Zr концентрируется в почве барьерной геосистемы. Важно отметить, что в качестве геохимического барьера для Zr выступает вся почва барьерной геосистемы, а не только торфяной горизонт, как это наблюдалось для таких микроэлементов, как Zn, Ni, Co, Pb, Cu, V [4].

Распределение Zr в наземном покрове (НП), включающем мох, опад, фитомассу, характеризуется сезонной динамикой. Летом содержание Zr в наземном покрове изменяется от 117 (Н/ТА/е) до 410 мг/кг (Н-Н-Fe/ТС/fg), вслед за ним коэффициент биологического поглощения ( $A_x$ ) Zr изменяется от 0,4 (Н/ТА/е) до 2 (Н-Н-Fe/ТС/fg). Осенью содержание Zr уменьшается и составляет 64 мг/кг в Н/ТА/е и 159 мг/кг в Н-Fe/C/fg (минимальное и максимальные значения соответственно). Для циркония  $A_x$  изменяется от 0,3 до 0,7 в болотном комплексе, в барьерной геосистеме данный коэффициент составляет 0,4. Таким образом, прослеживается сезонная динамика в распределении  $A_x$  Zr в барьерной геосистеме: летом Zr концентрируется на фитоценоотическом барьере поглощения и является элементом биологического накопления, а осенью он относится к элементам биологического захвата и не накапливается в наземном покрове. При этом осенью в барьерной геосистеме и прилегающей к ней части болотного комплекса самые низкие значения  $A_x$  Zr приурочены к самому высокому содержанию элемента в почве; т. е. осенью в пространственном распределении Zr наблюдается эффект барьерной геохимической инверсии. Сезонность в проявлении барьерной геохимической инверсии прослеживалась и для Ca, Mn, Zn [4].

Таким образом, установлена концентрация Zr на комплексном барьере в почве и на фитоценоотическом барьере поглощения барьерной геосистемы. Сезонная динамика ландшафтов почти не сказывается на особенностях концентрации элемента в почве, но влияет на интенсивность биологического поглощения Zr наземным покровом: для Zr наблюдается сезонность в проявлении фитоценоотического барьера поглощения и барьерной геохимической инверсии.

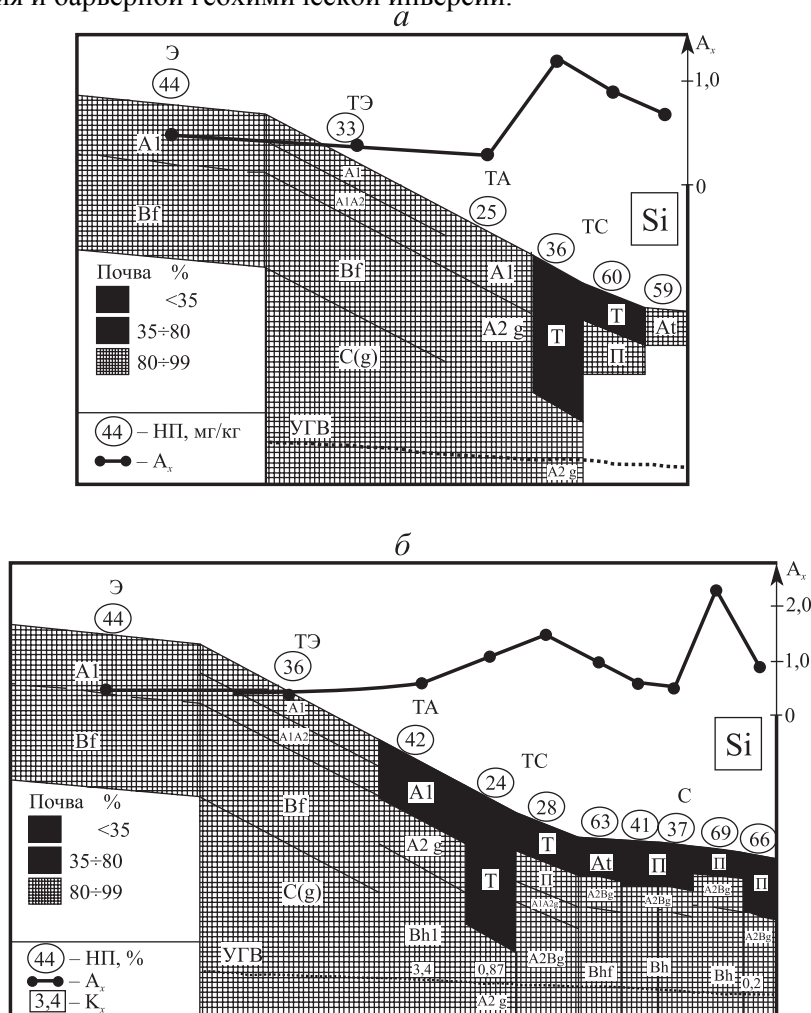


Рис. 3. Пространственное распределение Si по катене летом (а) и осенью (б)

Пространственное распределение еще одного геохимически инертного элемента Si в почве и наземном покрове катены показано на рис. 3. Летом в почвенном покрове катены на фоне в целом однородного распределения содержание Si в торфяном горизонте почв Н-Н-Fe/ТС/fg-комплекса минимально и составляет 30÷60 %, а интенсивность биологического поглощения в этом же комплексе

максимальная ( $A_x > 1$ ). Содержание элемента в наземном покрове катены изменяется от 25 до 60 % с максимумом в барьерной геосистеме Н–Н-Fe/ТС/fg. Таким образом, летом для Si наблюдается барьерная геохимическая инверсия: в почве барьерной геосистемы содержание элемента минимальное, в наземном покрове значение  $A_x$  максимальное.

Осенью по сравнению с летом в распределении элемента в почвенном покрове существенных изменений не происходит: минимальное содержание Si (менее 35 %) в торфяном горизонте Н–Н-Fe/ТС/fg-комплекса и в перегнойном горизонте Н-Fe/С/fg; от 35 до 80 % элемента содержится в торфяном и в гумусовом горизонтах Н-Fe/С/fg- и Н/ТА/е-комплексов, в остальной части почвенного покрова –  $>80$  % Si. В наземном покрове Н–Н-Fe/ТС/fg-комплекса удельное содержание элемента, как и в почве, минимальное и равно  $24 \div 28$  %, на остальной части катены этот показатель составляет от 36 до 69 %.

По А.И. Перельману [3], Si как малоподвижный в ландшафтах элемент относится к наименее биофильным элементам (его биофильность составляет  $6 \cdot 10^{-3}$  %). Согласно нашему исследованию, действительно, на большей части катены (в пределах геосистем Н/Э/е, Н/ТЭ/е, Н/ТА/е и части Н-Fe/С/fg) Si относится к элементам биологического захвата ( $A_x < 1$ ). Однако в барьерной геосистеме Н–Н-Fe/ТС/fg и в микрозападине Н-Fe/С/fg-комплекса значение  $A_x > 1$ , т. е. в данных ландшафтно-геохимических условиях элемент переходит в разряд элементов биологического накопления.

По данным [6], поглощение Si растениями обычно пропорционально его концентрации в растворе, что согласуется с нашими данными: содержание  $\text{SiO}_2$ , растворенного в почвенно-грунтовых водах, составляет в ТА-комплексе 27,25 мг/л, в ТС-комплексе – 21 мг/л, в поверхностных водах – 0,4 мг/л. Коэффициент водной миграции  $K_x$  кремния в почвенно-грунтовых водах ТА-комплекса равен 3,39, в ТС – 0,87, в поверхностных водах – 0,18. Высокое содержание кремнекислоты в Н/ТА/е- и Н–Н-Fe/ТС/fg-геосистемах, вероятно, является причиной его интенсивного биогенного поглощения наземным покровом. Уменьшение  $K_x$  Si в барьерной геосистеме косвенно указывает на его активное биогенное поглощение. Относительно высокое содержание кремнезема в почвенно-грунтовых водах и его интенсивное биологическое поглощение в барьерной геосистеме, вероятно, можно объяснить тем, что в условиях повышенного увлажнения и в присутствии органического вещества происходит восстановление водных окислов железа и высвобождение адсорбированных на них мономеров кремниевой кислоты. Данное предположение было высказано в [6] и так объясняет увеличение подвижности кремнезема в перегнойных горизонтах заливных почв поймы Припяти В.А. Кузнецов [7].

Таким образом, установлено влияние ландшафтной структуры на геохимию кремния. В барьерной геосистеме увеличивается интенсивность его биологического поглощения: Si переходит в разряд элементов биологического накопления. Он концентрируется на фитоценоотическом барьере поглощения барьерной геосистемы. В пространственном распределении кремния устойчиво прослеживается эффект барьерной геохимической инверсии. В перераспределении Si между компонентами ландшафта сезонная динамика не установлена.

Данное исследование показало, что Si и Zr накапливаются на фитоценоотическом барьере поглощения; для них установлен эффект барьерной геохимической инверсии, что указывает на важную роль ландшафтно-геохимической структуры в геохимии элементов.

1. Ландшафты Белоруссии / Под ред. Г.И. Марцинкевич, Н.К. Клицуновой. Мн., 1989.
2. Петухова Н.Н. Геохимия почв Белорусской ССР. Мн., 1987.
3. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М., 1975.
4. Страх Л.И. Геохимические барьеры краевой зоны болота Белорусского Полесья и концентрация на них Cs-137: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 1999.
5. Перельман А.И. Геохимия. М., 1989.
6. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М., 1989.
7. Кузнецов В.А. // Геохимия ландшафтов Припятского Полесья: Сб. ст. Мн., 1997. С. 63.
8. Авессаломова И.А. Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. М., 1989. С. 184.

Поступила в редакцию 14.02.12.

*Людмила Ивановна Смыкович* – кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры почвоведения и земельных информационных систем.