

УДК 550.42:504.4

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СУБАКВАЛЬНЫХ СИСТЕМ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

О. В. ЛУКАШЁВ¹⁾, Н. В. ЖУКОВСКАЯ¹⁾, Н. Г. ЛУКАШЁВА¹⁾, В. В. САВЧЕНКО²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

²⁾ООО «Неруд-проект», пр. Независимости, 169, 220114, г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены общие закономерности миграции и концентрации микроэлементов в гидросфере и выведения их в литосферу при седиментогенезе. На примере сильно выраженной геохимической обстановки (крупный город на малой реке) изучены техногеохимические особенности аккумуляции микроэлементов в донных отложениях. Показаны эффективность и ограничения в применении метода нормирования содержания химических элементов по Fe для донных отложений рек. Установлено повышение доли подвижных форм микроэлементов в донных отложениях водохранилища речного типа. На основе многомерного статистического анализа выявлены естественные и техногенные ассоциации химических элементов.

Ключевые слова: донные отложения; химические элементы; геохимический мониторинг; техногенное загрязнение; коэффициент концентрации; ассоциации химических элементов.

GEOCHEMICAL MONITORING OF SUBAQUEOUS SYSTEMS (THEORETICAL AND APPLIED ASPECTS)

O. V. LUKASHEV^a, N. V. ZHUKOVSKAYA^a, N. G. LUKASHEVA^a, V. V. SAVCHENKO^b

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

^bООО «Nerud-project», Nezavisimosti avenue, 169, 220114, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: 240660@mail.ru

The article has considered some general patterns of the trace elements migration and concentration in the hydrosphere and their removal in the lithosphere with sedimentation. Technological and geochemical features of trace elements accumulation in sediments have been studied by example of strongly expressed geochemical environment (city on a small river). The author has shown the effectiveness and limitations in applying the method of chemical elements normalization

Образец цитирования:

Лукашёв О. В., Жуковская Н. В., Лукашёва Н. Г., Савченко В. В. Геохимический мониторинг субаквальных систем: теоретические и прикладные аспекты // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 1. С. 146–170.

For citation:

Lukashev O. V., Zhukovskaya N. V., Lukasheva N. G., Savchenko V. V. Geochemical monitoring of subaqueous systems (theoretical and applied aspects). *J. Belarus. State Univ. Geogr. Geol.* 2017. No. 1. P. 146–170 (in Russ.).

Авторы:

Олег Валентинович Лукашёв – кандидат геолого-минералогических наук, доцент; доцент кафедры инженерной геологии и геофизики географического факультета.

Наталья Викторовна Жуковская – старший преподаватель кафедры почвоведения и земельных информационных систем географического факультета.

Наталья Григорьевна Лукашёва – лаборант II категории научно-исследовательской лаборатории экологии ландшафтов географического факультета.

Владимир Васильевич Савченко – кандидат геолого-минералогических наук; заместитель директора по науке.

Authors:

Oleg Lukashev, PhD (geology and mineralogy), docent; associate professor at the engineering geology and geophysics department, faculty of geography.

240660@mail.ru

Natallia Zhukovskaya, senior lecturer at the department of the soil sciences and land information systems, faculty of geography.

natazhuk@gmail.com

Natallia Lukasheva, laboratory assistant at the laboratory of landscape ecology, faculty of geography.

240660@mail.ru

Vladimir Savchenko, PhD (geology and mineralogy); deputy director for science.

savchenko@tut.by

on Fe in the river bottom sediments. The fraction increase of trace elements mobile forms in the bottom sediments of a river type reservoir has been determined. The author has revealed natural and anthropogenic trace elements associations in the bottom sediments by using multivariate statistical analysis.

Key words: bottom sediment; chemical elements; geochemical monitoring; technogenic contamination; concentration coefficient; chemical elements associations.

*К 110-летию со дня рождения
основоположника белорусской геохимии,
академика К. И. Лукашёва (1907–1987)*

Введение

Геохимический мониторинг субаквальных систем различного уровня требует четкого понимания основных закономерностей миграции и концентрации химических элементов в гидросфере и процессов их выведения в сопредельные среды (в первую очередь в литосферу в виде донных отложений при седиментогенезе). В настоящей статье дается обобщенная характеристика поведения микроэлементов в гидросфере в условиях глобального рассеяния, а также на примере Беларуси рассматриваются отдельные аспекты геохимического мониторинга речных систем в условиях сильно выраженной техно-геохимической обстановки.

Мировой океан и речные воды (основные закономерности)

Среди растворенных в морской воде химических элементов только 12 имеют концентрацию свыше 1 мг/дм^3 (Cl, Na, Mg, S, Ca, K, Br, C, Sr, B, Si, F). Их соотношение (как и большинства других) на различных участках акватории Мирового океана сохраняется приблизительно постоянным, что объясняется законом Форчхаммера (1865): «...количество различных элементов в морской воде не пропорционально тому количеству элементов, которое реки приносят в море, а обратно пропорционально той лёгкости, с которой элементы в морской воде переходят в нерастворимое состояние при химических или биохимических реакциях» [1]. Подобный подход позволяет упрощенно рассматривать химический состав Мирового океана (в рамках школьной задачи о непереполняющемся бассейне), в котором постоянство состава достигается за счет равенства прихода и выведения химических элементов. Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что элементы, определяющие основной солевой состав морской воды, имеют большие сроки их выведения в донные отложения (от $n \cdot 10^4$ до $n \cdot 10^8$ лет – выделены полужирным шрифтом).

Таблица 1

Время пребывания химических элементов в морской воде (составлено по [2])

Table 1

The residence time of the chemical elements in seawater (compiled on [2])

Время, кол-во лет	Элемент
<i>$n \cdot 10^8$</i>	Cl, Br
<i>$n \cdot 10^7$</i>	B, Na, Mg
<i>$n \cdot 10^6$</i>	Li, K , Rb, Sr , Ra, U
<i>$n \cdot 10^5$</i>	F , P, Ca , As, Mo, J, Cs, W, Au
<i>$n \cdot 10^4$</i>	Si , Sc, Ti, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Se, Ag, Ba, Hg, Bi
<i>$n \cdot 10^3$</i>	Cr, Sb, Tm
<i>$n \cdot 10^2$</i>	Al, Fe, Nb, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu, Pb, Th
<i>$n \cdot 10^1$</i>	Ce

Различия в извлечении микроэлементов из морской воды, по-видимому, в целом определяются разными величинами коэффициента седиментационной концентрации K_c , рассчитываемого как отношение концентрации элемента в осадках к его концентрации в сумме растворимых солей морской воды (табл. 2).

Общее представление о направленности перераспределения элементов между континентами и океаном дает также сопоставление соответствующих концентраций в сумме солей и гранитном слое (табл. 3).

Степень трансформации состава растворенных микроэлементов при переходе речных вод в морские может быть оценена различными способами: как соотношение абсолютных содержаний; соотношение

содержаний в сумме солей; соотношение нормированных по Fe концентраций (коэффициент обогащения) [3]. Последние два подхода представлены в табл. 4. Следует обратить внимание на то, что при резком уменьшении доли растворенных микроэлементов в сумме солей их относительная концентрация, по данным расчета коэффициента обогащения, для морских вод существенно возрастает. Исключения составляют Sc, Zr, Th и другие элементы, осаждающиеся в периферийной зоне Мирового океана [4].

Таблица 2

Концентрация химических элементов в донных отложениях океана
(составлено по [3])

Table 2

Chemical elements concentrations in oceanic sediments (compiled on [3])

K_c	Элемент
<i>Небиогенные глинистые илы</i>	
$n \cdot 10^5$	Nb < Ti < Zr < Y < Mn < Th, Sc
$n \cdot 10^4$	Cu < Cr < Ni < Ga < Co < Pb
$n \cdot 10^3$	Ge < Zn < V < Sn < Ba
$n \cdot 10^2$	Sb < Cd < As < Cs
$n \cdot 10^1$	Li < U < Rb < F < Ag < Se < Mo < Hg
n	B
$n \cdot 10^{-1}$	Sr
$n \cdot 10^{-2}$	Br
$n \cdot 10^{-3}$	J
<i>Биогенные карбонатные илы</i>	
$n \cdot 10^4$	Zr < Nb < Ga < Ti < Sc < Mn < Th
$n \cdot 10^3$	Cu < Cr < Ni < Co < Pb
$n \cdot 10^2$	Ge < Zn < Ba < Sn < V
$n \cdot 10^1$	Cd < As < F < Sb < Cs < Se
n	Li < Rb < U, Ag, Sr < Hg
$n \cdot 10^{-1}$	Mo < B
$n \cdot 10^{-2}$	J < Br

Таблица 3

Соотношение концентраций элементов в сумме солей Мирового океана
и гранитном слое (составлено по [4])

Table 3

Elements concentrations ratios in the sum of the World Ocean salts
and the granite layer (compiled on [4])

Коэффициент концентрации, кол-во раз	Элемент
$n \cdot 10^2$	Br
$n \cdot 10^1$	B
n	Sr < J
$n \cdot 10^{-1}$	Hg < Li < Mo < Au
$n \cdot 10^{-2}$	Cd, Se < U < As < Sb < F < Ag
$n \cdot 10^{-3}$	Cu < Co, Ga, Pb < Ge < Rb < Cs < Zn
$n \cdot 10^{-4}$	Cr < Sn, Bi < Ni < V < Ba
$n \cdot 10^{-5}$	Y < Mn
$n \cdot 10^{-6}$	Sc < Zr < Be < Nb < Ti
$n \cdot 10^{-7}$	Ce < Th

Трансформация состава растворенных микроэлементов при переходе речных вод в морские (составлено по [4] с дополнениями)

Table 4

Transformation of dissolved trace elements composition during evolution of river waters into the sea ones (compiled on [4] with additions)

Элемент	Концентрация в сумме солей, мг/кг		Соотношение Б/А, кол-во раз	Коэффициенты обогащения (нормирование по Fe)		Соотношение В/Г, кол-во раз
	Реки (А)	Океан (Б)		Реки (В)	Океан (Г)	
F	750	37,1	0,0495	65	19 100	294
Sr	667	231	0,346	18,8	372 000	19 787
Zn	167	0,14	0,000 838	21,4	1050	49,1
Br	167	1923	11,5	492	324 000 000	658 537
B	83	127	1,53	53,6	4 670 000	87 127
Mn	83	0,011	0,000 133	0,8	6,3	7,88
Cu	58	0,025	0,000 431	16,4	426	26,0
J	41	1,8	0,0439	538	1 340 000	2491
Ti	25	0,029	0,001 16	0,1	3,2	32
Zr	22	0,000 70	0,000 031 8	0,8	1,6	2,0
Li	17	4,9	0,288	3,6	60 200	16 722
Ni	17	0,014	0,000 824	4,2	208	49,5
As	17	0,074	0,004 35	56	14 300	255,4
Cr	8,3	0,005 7	0,000 687	1,6	62,8	39,3
Mo	8,3	0,29	0,0349	41,7	81 700	1959
Sb	8,3	0,0094	0,001 13	250	16 100	64,4
Pb	8,3	0,000 86	0,000 104	3,4	20	5,88
V	7,5	0,054	0,0072	0,6	267	445
Y	5,8	0,000 37	0,000 063 8	1	3,8	3,8
Sn	4,2	0,000 57	0,000 136	10	78,7	7,87
U	4,2	0,094	0,022 4	10	13 500	1350
Co	2,5	0,000 86	0,000 344	2,2	44	20
Ag	2,5	0,0029	0,001 16	346	22 300	64,5
Se	1,7	0,0026	0,001 53	76,9	6670	86,7
Cd	1,7	0,003 1	0,001 82	68,2	7270	107
Th	0,83	0,000 011	0,000 013 3	0,4	0,3	0,75
Hg	0,58	0,004 3	0,007 41	110	48 400	440
Sc	0,30	0,000 028	0,000 093 3	0,2	0,9	4,5

Примечание. В данном случае производились следующие пересчеты: рассчитывалось отношение концентраций конкретного элемента и Fe в земной коре; затем определялось отношение концентраций этих же элементов в речной или морской воде; полученное отношение делится на первое, вычисленное для земной коры [3].

Геохимический мониторинг в условиях техногенного загрязнения рек

Глобальные закономерности, кратко охарактеризованные выше, существенно нарушаются на конкретных локальных участках, испытывающих влияние сильно выраженных техногенных процессов. Рассмотрим подобное явление на примере г. Минска и р. Свислочи (техногеохимическая обстановка крупный город – малая река).

Техногенное загрязнение донных отложений р. Свислочи металлами в разные годы изучалось в работах [5–19]. Большой ретроспективный интерес в данном аспекте представляют результаты практически одномоментного опробования донных отложений р. Свислочи на всей протяженности ниже г. Минска, выполненного 26–28 августа 1987 г. О. В. Лукашёвым и В. В. Савченко. Полученные данные были дополнены материалами опробования донных отложений реки выше и на территории г. Минска летом того же года и в полном варианте публикуются впервые. Следует отметить, что вторая половина 1980-х гг. – эпоха максимального техногенного загрязнения р. Свислочи, существенно снизившегося в начале 1990-х.

До проведения рассматриваемых исследований авторы располагали только единичными данными определения содержания Cr и Ni в водах р. Свислочи (табл. 5), относившимися к 1983 г. (получены в лаборатории геохимии гипергенеза Института геохимии и геофизики АН БССР). Несмотря на известную статистическую необоснованность этих результатов, которые следует рассматривать только в качестве «моментальной фотографии» геохимического состояния рек на период отбора пробы, они однозначно позволяли выявить решающую роль сбросов Минской станции аэрации в загрязнении р. Свислочи металлами техногенного происхождения.

Таблица 5

Содержание растворенных Cr и Ni в водах р. Свислочи в 1983 и 1987 гг., мкг/дм³

Table 5

Dissolved Cr and Ni contents in the Svisloch River waters in 1983 and 1987, µg/dm³

Населенный пункт, место (номер пробы)	Cr	Ni
<i>1983 г.</i>		
Заславль (1)	0,8	0,5
Заславль (2)	2,6	–
<i>1987 г.</i>		
Впадение в вдхр. Заславское	1,2	1,5
Вдхр. Заславское, 500 м до плотины	1,8	1,1
Вдхр. Чижевка, верховье	3,9	4
Вдхр. Чижевка, средняя часть	3,3	4
Вдхр. Чижевка, 500 м до плотины	6	10
Вдхр. Чижевка, 400 м до плотины	3	3
200 м выше Минской станции аэрации	2,1	4
Канал от Минской станции аэрации	14	100
200 м ниже Минской станции аэрации	4	100
<i>1983 г.</i>		
Королищевичи (1)	100	4,7
Королищевичи (2)	9	5
Дукора (1)	100	9
Дукора (2)	60	15
Дукора (3)	9,5	9
Пуховичи (1)	100	15
Пуховичи (2)	100	14
Пуховичи (3)	0,1	1
Сосновый	0,1	4
Лापичи (1)	100	12
Лापичи (2)	40	13
Вязье (1)	15	10
Вязье (2)	15	12
Вязье (3)	2,5	12

В дальнейшем (1987–1989) вопрос загрязнения вод р. Свислочи рядом металлов (Be, Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Y, Ag, Yb, Pb) изучался в работе [6] при помощи фосфат-целлюлозных искусственных сорбентов. Благодаря значительно большему периоду осреднения (фактически задаваемому самими исследователями) были получены надежные интегральные оценки содержания металлов в речной воде, в целом подтвердившие ранее сделанные выводы (табл. 6).

Таблица 6

Содержание Cr и Ni в водах р. Свислочи, мкг/дм³, и на фосфат-целлюлозных сорбентах, мг/кг
(составлено по [6])

Table 6

Cr and Ni contents in the Svisloch River waters ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) and on the phosphate-cellulose sorbents (mg/kg)
(complied on [6])

Место отбора	Cr/Cr _{сорбент}	Ni/Ni _{сорбент}
<i>1987 г.</i>		
Впадение в вдхр. Заславское	1,2/10	1,5/10
Вдхр. Заславское, 500 м до плотины	1,8/11	1,1/–
Вдхр. Чижовка, верховье	3,9/10	4/13
Вдхр. Чижовка, средняя часть	3,3/15	4/14
Вдхр. Чижовка, 500 м до плотины	6/8,5	10/10
Вдхр. Чижовка, 400 м до плотины	3/9,5	3/11
200 м выше Минской станции аэрации	2,1/13	4/12
Канал от Минской станции аэрации	14/450	100/600
200 м ниже Минской станции аэрации	4/85	100/120
<i>1989 г.</i>		
Вдхр. Осиповичское	не опр./38	не опр./210
Вдхр. Осиповичское	не опр./20	не опр./140
Вдхр. Осиповичское, 500 м от ГЭС	не опр./14	не опр./190

Примечание. Не опр. – не определялось.

Опробование донных отложений р. Свислочи в 1987 г. производилось на следующих 7 основных участках (рис. 1): I – от северной окраины г. Минска до вдхр. Комсомольское озеро; II – от вдхр. Комсомольское озеро до вдхр. Чижовское; III – от вдхр. Чижовское до впадения в р. Свислочь стоков Минской станции аэрации; IV – от Минской станции аэрации вниз по течению 5 км; V – от д. Михановичи до устья р. Волмы; VI – от устья р. Титовки до вдхр. Осиповичское; VII – от вдхр. Осиповичское до р. Березины.

Всего было отобрано и проанализировано нейтронно-активационным методом 72 пробы (ПО «Латв-геология», г. Рига, аналитик Я. Д. Федоренко), из которых после отбраковки при статистических расчетах формировались выборки различного объема (61–64 и более проб). Примененный метод анализа позволил определить содержание 27 химических элементов (табл. 7). При интерпретации данных основное внимание О. В. Лукашэвым было обращено на взаимовлияние элементов группы Fe – Cr, Mn, Fe, Co, Ni, причем Cr и Ni рассматривались в качестве преимущественно техногенных, а Mn, Fe, Co, органическое вещество (ОВ) – естественных компонентов донных отложений [7–13]¹. Возможен и другой подход: исследование геохимических свойств наилок – специфических аллювиальных образований, формирующихся в руслах равнинных рек в результате осаждения на отмелях тонкодисперсного материала ОВ, – что было сделано для ряда рек Беларуси в работе [17].

Полученные данные систематизированы в табл. 8. Сопоставление концентраций Cr и Ni в водах и донных отложениях р. Свислочи (табл. 5, 6 и 8) свидетельствует о пространственном совпадении зон их максимального техногенного загрязнения, что, по-видимому, позволяет рассматривать речные отложения также в качестве вторичного источника загрязнения вод этими металлами.

Падение среднего содержания Cr и Ni в донных отложениях участков IV–VI, расположенных ниже сброса сточных вод Минской станции аэрации, в целом соответствует традиционному представлению о потоке рассеяния вещества от точечного источника. Однако на основании подобной модели невозможно объяснить тот факт, что максимальные концентрации Cr (2740 мг/кг) и Ni (430 мг/кг) были отмечены не у станции аэрации, а на расстоянии 25 км ниже по течению от нее, а также концентрации этих элементов в размере 1800 и 370 мг/кг соответственно регистрировались в 50 км ниже станции (участок V).

За данным противоречием кроется распространенная методическая ошибка – априорное приписывание объекту опробования естественного происхождения (в нашем случае донным отложениям) набора каких-либо неизменных, чуть ли не «стандартизованных» характеристик (как правило, в данный

¹В интерпретации данных также участвовал Д. Л. Творонович-Севрук.

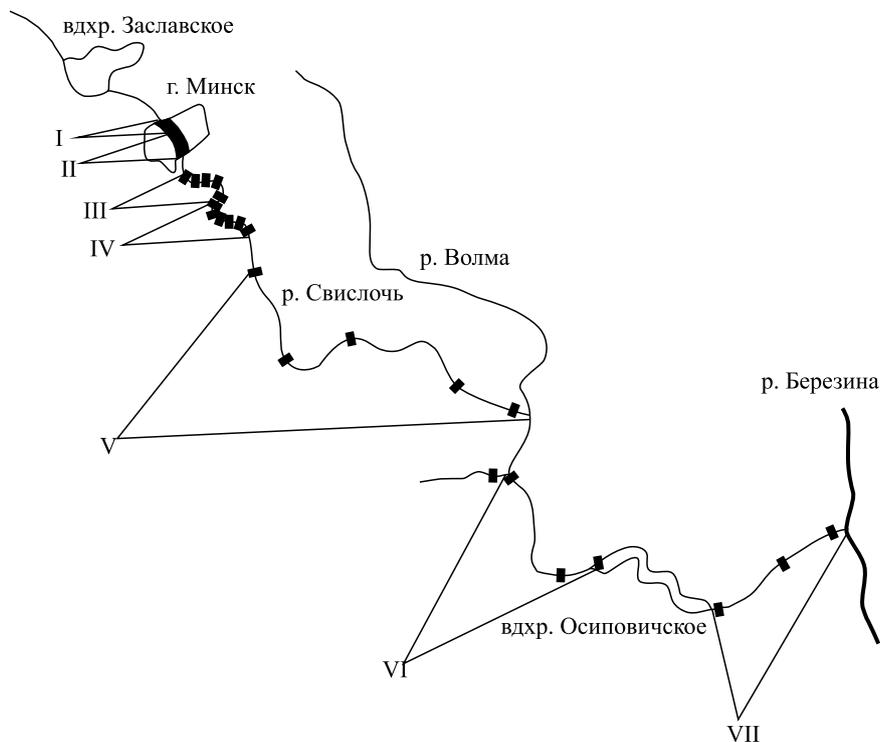


Рис. 1. Опробование донных отложений р. Свислочи (26–28 августа 1987 г.):
I–VII – участки опробования; ■ – места опробования

Fig. 1. Sampling locations of the Svisloch River bottom sediments (26–28 August 1987):
I–VII – sampling sections; ■ – sampling sites

момент непосредственно не изучаемых), которые, как подразумевается, практически будто бы вообще не меняются. Фактически исследователь изучает распределение в донных отложениях концентраций какого-либо элемента металла, не обращая внимания на соответствующую вариацию содержания ОВ и гидроксидов Fe – основных агентов, определяющих аккумулятивные свойства этих отложений по отношению к изучаемому металлу.

Таблица 7

Содержание элементов в донных отложениях р. Свислочи в 1987 г. и рек Европы в целом, мг/кг сухого вещества (составлено по [20])

Table 7

Trace elements contents in the Svisloch River bottom sediments in 1987 and Europe on the whole, mg/kg dry matter (compiled on [20])

Элемент	Река Свислочь		Реки Европы	
	<i>x</i>	минимальное – максимальное	<i>x</i>	минимальное – максимальное
Na, %	0,390	0,20–0,59	0,355	< 0,079–1,62
K, %	1,23	0,36–2,51	0,834	0,012–2,40
Ca, %	0,94	0,21–3,08	1,66	0,057–39,8
Sc	3,01	0,93–6,9	–	–
Cr	73,9	9,9–2735	92,8	< 3,0–3320
Mn	286,1	73–1052	868	< 77,5–18 359
Fe, %	1,00	0,27–3,47	1,25	0,0385–7,3
Co	2,8	0,99–14,4	11,2	< 2,0–216
Ni	12,5	1,4–427	21	1–1406
Zn	40,0	< 7–1 066	71	4–13 900
As	1,8	0,48–11,4	10,1	< 1,0–241
Se	0,017	0,0049–0,051	–	–

Окончание табл. 7
Ending table 7

Элемент	Река Свислочь		Реки Европы	
	<i>x</i>	минимальное – максимальное	<i>x</i>	минимальное – максимальное
Br	1,77	0,01–40,5	–	–
Zr	166	24–980	519	1,0–9940
Nb	11,3	2,6–42	36,6	1,1–524
Mo	0,35	< 0,1–2,45	1,34	0,12–117
Ag	0,35	0,03–0,92	–	–
Cd	0,45	0,16–1,39	0,53	< 0,02–43,1
Sb	0,41	0,04–4,1	1,07	20,0–34,1
Cs	0,90	0,36–2,7	–	< 1,0–68
Ba	376	4,84–999	417	8–5000
La	13,6	15,3–40	41,0	1,3–553
W	0,96	0,1–23,5	2,12	< 0,05–123
Ce	24,8	9,8–85	83	2,20–1080
Yb	0,44	0,1–1,1	3,09	0,1–42,8
Th	3,54	1,0–7,4	13,9	< 1,0–253
U	1,33	0,52–3,2	3,73	< 1,0–98,0

Вместе с тем о какой стабильности аккумулятивных свойств донных отложений по отношению к тем или иным микроэлементам может идти речь, если содержание упомянутых выше важнейших макрокомпонентов зачастую варьирует от пробы к пробе в 10–15 раз.

Значительную роль в данной ситуации играют также и факторы сугубо практического порядка: в большинстве случаев финансы и сроки проводимых исследований не позволяют осуществлять опробование и аналитические работы в объемах (количество проб), необходимых с точки зрения статистической достоверности получаемых результатов. Эффект недостаточно представительного опробования обычно проявляется следующим образом: например, на одном участке в основном были отобраны сильнозаиленные или ожелезненные пески, тогда как на другом при всем желании исследователя в отведенное графиком работы время обнаружить их не удалось. Естественно, что при равном загрязнении речной воды (или вообще его отсутствии) в первом случае будут получены более высокие показатели концентрации элементов и сделаны соответствующие, скорее всего, некорректные выводы.

Таблица 8

Содержание элементов в донных отложениях р. Свислочи по участкам, мг/кг сухого вещества

Table 8

Trace elements contents in the Svisloch River bottom sediments on sections, mg/kg dry matter

Элемент	Номер участка (число проб)						
	I (16)	II (6)	III (12)	IV (13)	V (10)	VI (6)	VII (9)
Na, %	0,40	0,33	0,459	0,42	0,34	0,39	0,33
K, %	1,35	1,46	1,46	0,90	1,04	1,18	1,15
Ca, %	0,80	0,83	1,41	1,19	1,17	0,99	0,82
Sc	2,31	2,63	3,68	3,36	4,03	2,6	1,75
Cr	20,8	15,5	75,9	334	358	220	27,6
Mn	192	291	574	366	421	271	175
Fe, %	0,73	0,92	1,55	1,48	1,80	1,24	0,53
Co	1,85	1,73	4,49	5,1	4,93	2,79	1,10
Ni	4,46	3,28	15,0	83	89	40	5,0
Zn	22,0	9,2	72,3	120	146	81	12

Элемент	Номер участка (число проб)						
	I (16)	II (6)	III (12)	IV (13)	V (10)	VI (6)	VII (9)
As	1,32	1,87	2,82	2,58	1,97	2,10	1,10
Se	0,011	0,011	0,023	0,026	0,030	0,022	0,011
Br	1,05	0,86	14,0	8,87	1,35	0,77	0,2
Zr	154	129	261	152	206	212	171
Nb	8,6	7,7	16,6	13,6	18,1	13,5	9,1
Mo	–	–	0,21	0,45	0,19	0,14	0,07
Ag	0,29	0,27	0,35	0,33	0,36	0,42	0,35
Cd	0,43	0,41	0,41	0,64	0,52	0,41	0,40
Sb	0,24	0,21	0,35	1,57	1,76	0,45	0,16
Cs	0,73	0,60	1,31	1,13	1,43	0,90	0,63
Ba	288	285	377	413	513	414	275
La	12,0	15,2	18,3	18,0	14,8	11,7	9,36
W	0,36	0,20	2,4	4,04	1,98	1,08	0,46
Ce	21,2	20,8	28,9	29,2	37,8	30,0	17,5
Yb	0,32	0,59	0,40	0,30	0,82	0,42	0,34
Th	2,72	2,75	4,16	3,58	5,03	3,53	2,49
U	1,18	1,18	1,74	1,83	1,27	1,09	1,10

В целях лучшего понимания данного вопроса рассмотрим со статистической точки зрения геохимическую ситуацию, существовавшую на р. Свислочи в момент опробования ее донных отложений в августе 1987 г.

Из табл. 9 следует, что валовые концентрации как техногенных (Cr, Ni), так и всех естественных компонентов (Mn, Fe, Co, органическое вещество) донных отложений р. Свислочи в сильной степени (коэффициент корреляции Пирсона $r > 0,7$) положительно коррелируют друг с другом. Исключение составляют средние корреляции (r – от 0,5 до 0,7) Mn с ОВ, Cr и Ni.

Поскольку практически все рассматриваемые компоненты донных отложений р. Свислочи статистически связаны между собой, целесообразно привести расчеты частных коэффициентов 1-го порядка (табл. 10), позволяющих исключить (элиминировать) влияние третьего фактора, – например, рассмотреть корреляцию Cr и ОВ без влияния фактора Fe, также связанного с органическим веществом, и так далее по стандартной формуле $r_{xy(z)} = (r_{xy} - r_{yz} \cdot r_{xz}) / \sqrt{(1 - r_{yz}^2)(1 - r_{xz}^2)}$ [21].

Таблица 9

Статистические связи между компонентами химического состава донных отложений р. Свислочи в 1987 г.
($p < 0,0001$, n – от 61 до 64)

Table 9

Pearson correlation coefficients between chemical composition components of the Svisloch River bottom sediments in 1987
($p < 0,0001$, n – from 61 to 64)

Химические элементы					Компонент
Mn	Cr	Fe	Co	Ni	
Коэффициент корреляции Пирсона					
+0,689	+0,833	+0,862	+0,900	+0,827	ОВ
	+0,582	+0,863	+0,791	+0,581	Mn
		+0,732	+0,812	+0,981	Cr
			+0,939	+0,760	Fe
				+0,831	Co

Таблица 10

Частные коэффициенты корреляции 1-го порядка содержания компонентов донных отложений р. Свислочи в 1987 г. ($p < 0,0001$, $n = 61$)

Table 10

Partial correlation coefficients between the components contents of the Svisloch River bottom sediments in 1987 ($p < 0,0001$, $n = 61$)

Взаимосвязь компонентов	Элиминируемый фактор	$r_{xy(z)}$
Cr – Fe	ОВ	+0,077
Cr – ОВ	Fe	+0,559
Ni – Fe	ОВ	+0,165
Ni – ОВ	Fe	+0,523
Mn – Fe	ОВ	+0,733
Mn – ОВ	Fe	–0,215
Co – Fe	ОВ	+0,736
Co – ОВ	Fe	+0,523
Ni – Cr	ОВ	+0,534
Ni – Cr	Fe	+0,959

Геохимическое значение приведенных статистических взаимосвязей может быть сформулировано следующим образом:

1) содержащееся в донных отложениях р. Свислочи ОВ (0,0–60 %) вне зависимости от локализации точки опробования и степени техногенного давления соответственно заметно влияет на аккумуляцию этими отложениями как техногенных (Cr, Ni), так и естественных (Fe, Co) компонентов;

2) соединения Fe, независимо от локализации точки опробования, существенно воздействуют на аккумуляцию естественных (Mn, Co) компонентов, тогда как аккумуляция техногенных Cr и Ni для всей выборки проб по реке в целом не обусловлена фактором Fe;

3) аккумуляция донными отложениями рассматриваемых техногенных компонентов (Cr и Ni) статистически связана в пределах всей р. Свислочи в очень высокой степени (r составляет +0,981), что, по-видимому, определяется их одновременным (параллельным) поступлением из одного основного техногенного источника (Минская станция аэрации) и сходными особенностями процессов аккумуляции (связь с ОВ).

Данный вопрос по отношению к Cr рассматривался в [8; 9]. Поскольку этот элемент является одним из основных металлов – загрязнителей вод и отложений р. Свислочи, остановимся на этой проблеме несколько подробнее.

Были предложены шесть механизмов аккумуляции Cr в донных отложениях рек.

1. *Динамический* – вне зависимости от природы загрязнения Cr взвешенного или влекомого материала рек изменение условий движения речного потока обуславливает возможность осаждения частиц и накопление элемента в донных отложениях.

2. *Сорбционный* – сорбенты: а) глинистые минералы и ОВ; б) гидроксиды Fe. В первом случае сорбируются катионные формы, во втором – анионные. Первоначально Cr может сорбироваться на взвесах.

3. *Щелочной гидролитический* – поступление кислых, обогащенных Cr^{3+} промышленных стоков в слабобокислую или нейтральную обстановку с последующим выпадением в осадок $Cr(OH)_3$. В чистом виде, вероятно, редок. Более типичны сорбция коллоидов $Cr(OH)_3$ на отрицательно заряженных сорбентах и совместное соосаждение с коллоидами $Fe(OH)_3$ при коагуляции в случае отсутствия больших количеств растворенных органических веществ.

4. *Восстановительный* – поступление промышленных стоков, содержащих Cr^{6+} , в восстановительную обстановку (недостаток кислорода, наличие H_2S , ОВ и т. д.). Образование труднорастворимых соединений Cr^{3+} с последующим выпадением в осадок или сорбцией на взвешенном материале.

5. *Комплексообразование с фульвокислотами* и последующее осаждение гидроксид-фульватов в результате разрушения высокомолекулярных гидрофильных комплексов или снижения их подвижности при рН, равном 6–8.

6. *Флокуляция коллоидов Fe (Cr) с гуминовыми кислотами* и последующей коагуляцией. При взаимодействии коллоидов гидроксидов Fe (Cr) с гуминовыми кислотами на поверхности флокул формируется слой отрицательно заряженных карбоксильных групп. Дальнейшая нейтрализация заряда

макрокатионами приводит к коагуляции органоминеральных частиц. Вероятно, в компенсации заряда могут участвовать и положительно заряженные гидроксиды Cr.

Таким образом, фиксация Cr в донных отложениях в каких-то определенных пропорциях связана с глинистыми минералами, соединениями Fe и ОВ. Постадийные вытяжки (последовательное извлечение из образца водорастворимой, адсорбированной, органической, оксидно-гидроксидной форм нахождения Cr), выполненные для проб из различных стран мира, показали, что в естественных условиях геохимической миграции Cr основное значение имеют *прочносвязанная* (в качестве изоморфной примеси в кристаллической решетке минералов) и *оксидно-гидроксидная* (фактор Fe) формы во *взвесах* и *оксидно-гидроксидная* (фактор Fe), *органическая* (фактор ОВ) и *прочносвязанная* формы в *донных отложениях*. В условиях техногенного загрязнения наблюдается интенсивный рост долевого участия *оксидно-гидроксидной* и *органической* форм нахождения Cr во *взвесах* и *органической* (что и было выявлено статистически) формы в *донных отложениях* при заметном снижении доли прочих форм. Иными словами, в техногенных обстановках лесной зоны умеренного климата основными механизмами аккумуляции элемента в современных речных отложениях являются 3–6-й, тогда как роль 2-го (сорбция) представляется второстепенной.

Для повышения точности оценки степени загрязнения речных систем Cr и другими элементами следовало бы использовать по возможности простой метод (или прием), позволяющий учитывать различие исследуемых проб по содержанию в них макрокомпонентов – ОВ, соединений Fe и других и сглаживать выбросы отдельных значений (см. рис. 1, участок V), связанных не столько со степенью техногенного давления на участке опробования, сколько со спецификой макросостава конкретных проб донных отложений.

Попутно отметим, что метод постадийных вытяжек [22] ввиду своей трудоемкости для массовых экспрессных анализов, к сожалению, явно не пригоден. В связи с этим для случая техногенного загрязнения р. Свислочи Cr и Ni была сделана попытка разграничения действия факторов Fe и ОВ [8; 9; 19]. Основная идея предложенного приема заключается в том, что, хотя для всей выборки данных валового содержания Cr и Ni в речных отложениях роль фактора Fe незначительна (см. табл. 10), для проб с содержанием органического вещества ниже некоторого предела (в данном случае установлено путем последовательного исключения из выборки максимальных значений) она может играть заметную роль. Нормализовав далее содержание Cr и Ni в этих пробах по Fe (т. е. рассчитав отношение Cr/Fe и Ni/Fe, например, 1/10 000 г), можно учесть влияние макросостава образцов (фактора Fe) на аккумуляцию данных элементов (табл. 11).

Таблица 11

Статистические взаимосвязи между величинами коэффициентов Cr/Fe, Ni/Fe, Co/Fe, Mn/Fe и содержанием ОВ и Fe в донных отложениях р. Свислочи в 1987 г.

Table 11

Pearson correlation coefficients between the Cr/Fe, Ni/Fe, Co/Fe, Mn/Fe ratios and the organic matter and Fe contents in the Svisloch River bottom sediments in 1987

Cr/Fe	Ni/Fe	Co/Fe	Mn/Fe	Компонент
<i>n</i> = 61				
+0,786	+0,731	+0,297	–0,125	ОВ
+0,672	+0,636	+0,154	–0,022	Fe
После отбраковки проб с содержанием органического вещества >10 %, <i>n</i> = 51				
+0,592	+0,584	+0,126	–0,076	ОВ
+0,573	+0,525	–0,049	0,022	Fe

Примечание. Полуужирный шрифт – $p < 0,0001$; курсив – $p < 0,02$.

Таким образом, предлагается: а) исключать из рассмотрения пробы, содержащие ОВ в количестве более 10 %¹; б) для оставшихся в выборке проб рассчитывать величину отношения Cr/Fe и Ni/Fe (1/10 000 г), используемую при оценке загрязнения (фактически выделяются образцы донных

¹Аналогичные статистические расчеты, выполненные для прочих изучавшихся элементов, показывают, что исключение проб с содержанием ОВ более 10 % следует производить также для Sc, Zr, Nb, Mo, Ag, Sb, W, Yb, Th, U (табл. 12).

отложений с преимущественным действием *щелочного гидролитического* механизма аккумуляции Cr и Ni [8; 9]). Для Mn и Co этого делать не следует, так как нормализованные по Fe содержания этих элементов от фактора ОВ не зависят.

Рассмотрим, как изменятся наши оценки геохимической ситуации, существовавшей на р. Свислочи в 1987 г., при переходе от традиционной методики оценки уровня загрязнения донных отложений (выбор фонового участка, определение среднего значения содержания изучаемого элемента на фоновом участке и на загрязненных, расчет коэффициентов концентрации – отношения среднего содержания на загрязненных участках к фоновому, в данном случае – участок I) к предлагаемой (табл. 12, рис. 2–5).

Сразу же обращает на себя внимание «сглаживающий» эффект предлагаемых расчетов, заметно нивелирующих случайности, возможно, недостаточно полного опробования. В первую очередь это проявляется для Mn и Co – элементов, рассматриваемых нами в качестве естественных компонентов донных отложений р. Свислочи (рис. 4 и 5). Исходя из традиционного подхода, следовало бы говорить о «загрязнении» отложений Mn на участке III (от вдхр. Чижовское до Минской станции аэрации) и Co на участках III–V (от вдхр. Чижовское до устья р. Волмы), что на самом деле скорее объяснимо повышенным содержанием Fe (естественный фактор, влияющий на аккумуляцию этих элементов) в отложениях участков III–VI (см. табл. 8).

Аналогичное, но менее выраженное «сглаживание» наблюдается и для техногенных Cr и Ni (см. рис. 2 и 3). Исходя из данных опробования 1987 г., можно утверждать (естественно, применительно к тому периоду): 1) донные отложения р. Свислочи на участке II (центральная и промышленная части г. Минска) относительно слабо загрязнялись Cr и Ni; 2) вдхр. Чижовское выступало в качестве незначительно выраженного отстойника – очистителя речных вод (уч. III); 3) ниже Минской станции аэрации вплоть до вдхр. Осиповичское (уч. IV–VI) существовала зона сплошного относительно равномерного техногенного загрязнения донных отложений Cr и Ni; 4) вдхр. Осиповичское служило следующим, более крупным и эффективным отстойником-очистителем.

Таблица 12

Распределение среднего содержания элементов и коэффициентов их концентрации в донных отложениях р. Свислочи

Table 12

Distribution of trace elements average contents and their concentration coefficients in the Svisloch River bottom sediments

Наименование показателя	Участок						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Sc							
Sc, мг/кг	2,31	2,63	3,68	3,36	4,03	2,6	1,75
Sc_x/Sc_I	1	1,14	1,59	1,45	1,74	1,13	0,76
$Sc/Fe_{(<10\%)}$	3,26	2,90	2,56	2,66	2,75	2,01	3,40
$(Sc/Fe)_x/(Sc/Fe)_I$	1	0,89	0,79	0,82	0,84	0,62	1,04
Cr							
Cr, мг/кг	20,8	15,5	75,9	334	358	220	27,6
Cr_x/Cr_I	1	0,7	3,6	16,1	17,2	10,6	1,3
$Cr/Fe_{(<10\%)}$	30	16,4	75,7	191	210	136	44
$(Cr/Fe)_x/(Cr/Fe)_I$	1	0,6	2,5	6,4	7,0	4,5	1,5
Mn							
Mn, мг/кг	192	291	574	366	421	271	175
Mn_x/Mn_I	1	1,52	2,99	1,91	2,19	1,41	0,91
Mn/Fe	269	310	353	249	280	246	342
$(Mn/Fe)_x/(Mn/Fe)_I$	1	1,15	1,31	0,93	1,04	0,91	1,27
Co							
Co, мг/кг	1,85	1,73	4,49	5,1	4,93	2,79	1,10
Co_x/Co_I	1	0,94	2,43	2,76	2,66	1,51	0,59

Наименование показателя	Участок						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Co/Fe	2,9	3,5	3,2	2,6	2,9	2,5	2,2
$(Co/Fe)_x/(Co/Fe)_I$	1	1,21	1,10	0,90	1,00	0,86	0,76
Ni							
Ni, мг/кг	4,46	3,28	15,0	83	89	40	5,0
Ni_x/Ni_I	1	0,74	3,36	18,61	19,96	8,97	1,12
Ni/Fe _(<10%)	6,7	4,3	11,7	43	56	30,5	11,9
$(Ni/Fe)_x/(Ni/Fe)_I$	1	0,64	1,75	6,42	8,36	4,55	1,78
Zn							
Zn, мг/кг	22,0	9,2	72,3	120	146	81	12
Zn_x/Zn_I	1	0,42	3,29	5,45	6,64	3,68	0,55
Zn/Fe	55,4	90,0	132	68,9	21,4	25,0	10,6
$(Zn/Fe)_x/(Zn/Fe)_I$	1	1,62	2,38	1,24	0,39	0,45	0,19
As							
As, мг/кг	1,32	1,87	2,82	2,58	1,97	2,10	1,10
As_x/As_I	1	1,42	2,14	1,95	1,49	1,59	0,83
As/Fe	1,68	1,87	1,94	2,17	1,28	1,67	2,06
$(As/Fe)_x/(As/Fe)_I$	1	1,11	1,15	1,29	0,76	0,99	1,23
Se							
Se, мг/кг	0,011	0,011	0,023	0,026	0,030	0,022	0,011
Se_x/Se_I	1	1,00	2,09	2,36	2,73	2,00	1,00
Se/Fe	0,015	0,018	0,018	0,017	0,022	0,017	0,013
$(Se/Fe)_x/(Se/Fe)_I$	1	1,20	1,20	1,13	1,47	1,13	0,87
Br							
Br, мг/кг	1,05	0,86	14,0	8,87	1,35	0,77	0,2
Br_x/Br_I	1	0,82	13,33	8,45	1,29	0,73	0,19
Br/Fe	1,69	1,02	8,84	8,18	0,87	0,55	0,53
$(Br/Fe)_x/(Br/Fe)_I$	1	0,60	5,23	4,84	0,51	0,33	0,31
Zr							
Zr, мг/кг	154	129	261	152	206	212	171
Zr_x/Zr_I	1	0,84	1,69	0,99	1,34	1,38	1,11
Zr/Fe _(<10%)	198	138	224	136	138	202	333
$(Zr/Fe)_x/(Zr/Fe)_I$	1	0,70	1,13	0,69	0,70	1,02	1,68
Nb							
Nb, мг/кг	8,6	7,7	16,6	13,6	18,1	13,5	9,1
Nb_x/Nb_I	1	0,90	1,93	1,58	2,10	1,57	1,06
Nb/Fe _(<10%)	10,6	8,3	14,2	11,2	13,8	11,1	17,8
$(Nb/Fe)_x/(Nb/Fe)_I$	1	0,78	1,34	1,06	1,30	1,05	1,68
Ag							
Ag, мг/кг	0,29	0,27	0,35	0,33	0,36	0,42	0,35
Ag_x/Ag_I	1	0,93	1,21	1,14	1,24	1,45	1,21
Ag/Fe _(<10%)	0,43	0,26	0,26	0,21	0,28	0,34	0,65

Продолжение табл. 12
Extension table 12

Наименование показателя	Участок						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
$(Ag/Fe)_x/(Ag/Fe)_I$	1	0,60	0,60	0,49	0,65	0,79	1,51
Cd							
Cd, мг/кг	0,43	0,41	0,41	0,64	0,52	0,41	0,40
Cd_x/Cd_I	1	0,95	0,95	1,49	1,21	0,95	0,93
Cd/Fe	0,63	0,50	0,36	0,42	0,34	0,32	0,83
$(Cd/Fe)_x/(Cd/Fe)_I$	1	0,79	0,57	0,67	0,54	0,51	1,32
Sb							
Sb, мг/кг	0,24	0,21	0,35	1,57	1,76	0,45	0,16
Sb_x/Sb_I	1	0,88	1,46	6,54	7,33	1,88	0,67
Sb/Fe _(<10%)	0,38	0,20	0,26	0,88	0,59	0,33	0,34
$(Sb/Fe)_x/(Sb/Fe)_I$	1	0,53	0,68	2,32	1,55	0,87	0,89
Cs							
Cs, мг/кг	0,73	0,60	1,31	1,13	1,43	0,90	0,63
Cs_x/Cs_I	1	0,82	1,79	1,55	1,96	1,23	0,86
Cs/Fe	0,99	0,71	0,85	0,84	0,84	0,75	0,99
$(Cs/Fe)_x/(Cs/Fe)_I$	1	0,72	0,86	0,85	0,85	0,76	1,00
Ba							
Ba, мг/кг	288	285	377	413	513	414	275
Ba_x/Ba_I	1	0,99	1,31	1,43	1,78	1,44	0,95
Ba/Fe	403	305	317	333	389	343	538
$(Ba/Fe)_x/(Ba/Fe)_I$	1	0,76	0,79	0,83	0,97	0,85	1,33
La							
La, мг/кг	12,0	15,2	18,3	18,0	14,8	11,7	9,36
La_x/La_I	1	1,27	1,53	1,50	1,23	0,98	0,78
La/Fe	16,9	17,9	12,7	12,6	9,55	10,4	18,2
$(La/Fe)_x/(La/Fe)_I$	1	1,06	0,75	0,75	0,57	0,62	1,08
W							
W, мг/кг	0,36	0,20	2,4	4,04	1,98	1,08	0,46
W_x/W_I	1	0,56	6,67	11,22	5,50	3,00	1,28
W/Fe _(<10%)	0,55	0,20	1,32	1,83	1,14	0,72	0,60
$(W/Fe)_x/(W/Fe)_I$	1	0,36	2,40	3,33	2,07	1,31	1,09
Ce							
Ce, мг/кг	21,2	20,8	28,9	29,2	37,8	30,0	17,5
Ce_x/Ce_I	1	0,98	1,36	1,38	1,78	1,42	0,83
Ce/Fe	26,6	24,9	20,4	21,7	24,5	26,6	33,4
$(Ce/Fe)_x/(Ce/Fe)_I$	1	0,94	0,77	0,82	0,92	1,00	1,26
Yb							
Yb, мг/кг	0,32	0,59	0,40	0,30	0,82	0,42	0,34
Yb_x/Yb_I	1	1,84	1,25	0,94	2,56	1,31	1,06
Yb/Fe _(<10%)	0,43	0,62	0,30	0,26	0,68	0,32	0,67
$(Yb/Fe)_x/(Yb/Fe)_I$	1	1,44	0,70	0,60	1,58	0,74	1,56

Наименование показателя	Участок						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Th							
Th, мг/кг	2,72	2,75	4,16	3,58	5,03	3,53	2,49
Th_x/Th_1	1	1,01	1,53	1,32	1,85	1,30	0,92
$Th/Fe_{(<10\%)}$	3,33	2,87	3,16	3,03	3,63	3,35	4,47
$(Th/Fe)_x/(Th/Fe)_1$	1	0,86	0,95	0,91	1,09	1,01	1,34
U							
U, мг/кг	1,18	1,18	1,74	1,83	1,27	1,09	1,10
U_x/Th_1	1	1,00	1,47	1,55	1,08	0,92	0,93
$U/Fe_{(<10\%)}$	1,63	1,32	1,36	1,43	0,92	1,1	2,3
$(U/Fe)_x/(U/Fe)_1$	1	0,81	0,83	0,88	0,56	0,67	1,41

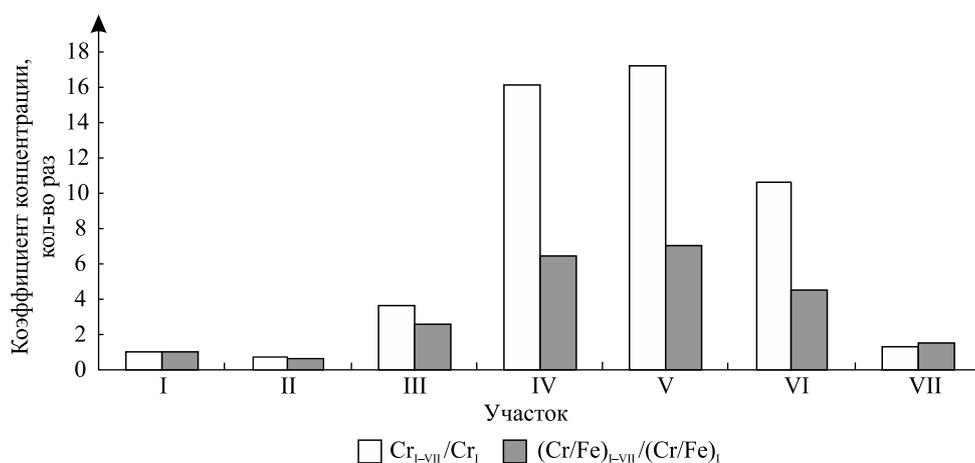


Рис. 2. Коэффициенты концентрации Cr в донных отложениях на участках I–VII р. Свислочи (1987), рассчитанные по традиционной (□) и предлагаемой (■) методикам

Fig. 2. Cr concentration coefficients in bottom sediments of the Svisloch River sections I–VII (1987), calculated by the traditional (□) and proposed (■) methods

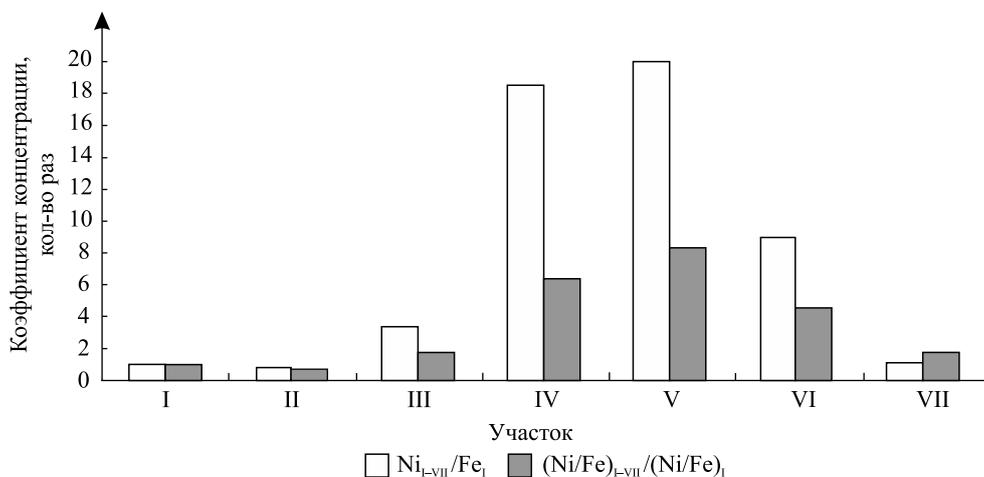


Рис. 3. Коэффициенты концентрации Ni в донных отложениях участков I–VII р. Свислочи (1987), рассчитанные по традиционной (□) и предлагаемой (■) методикам

Fig. 3. Ni concentration coefficients in bottom sediments of the Svisloch River sections I–VII (1987), calculated by the traditional (□) and proposed (■) methods

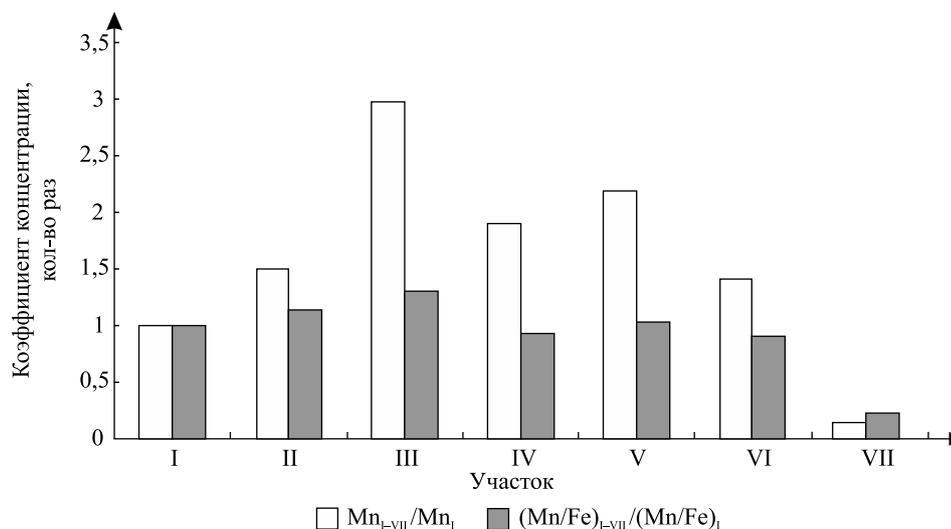


Рис. 4. Коэффициенты концентрации Mn в донных отложениях участков I–VII р. Свислочи (1987), рассчитанные по традиционной (□) и предлагаемой (■) методикам
Fig. 4. Mn concentration coefficients in bottom sediments of the Svisloch River sections I–VII (1987), calculated by the traditional (□) and proposed (■) methods

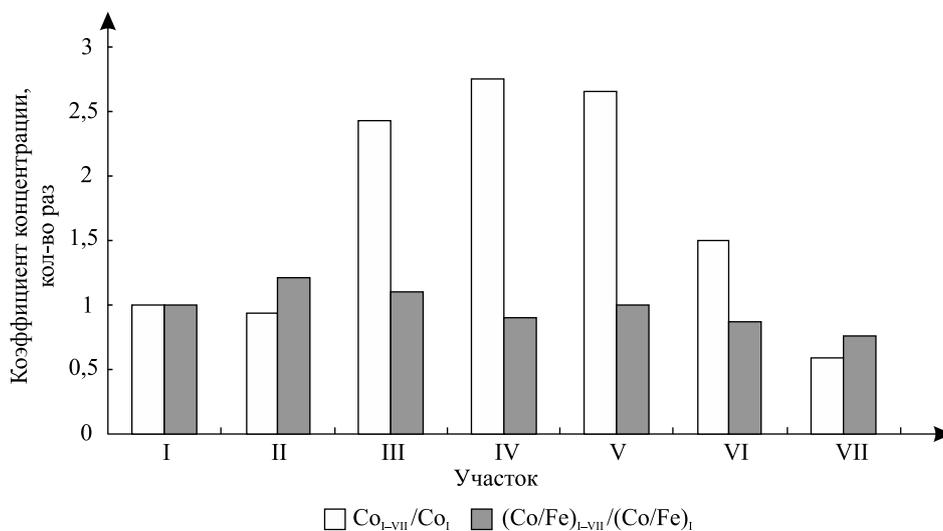


Рис. 5. Коэффициенты концентрации Co в донных отложениях участков I–VII р. Свислочи (1987), рассчитанные по традиционной (□) и предлагаемой (■) методикам
Fig. 5. Co concentration coefficients in bottom sediments of the Svisloch River sections I–VII (1987), calculated by the traditional (□) and proposed (■) methods

В рамках проводимого авторами изучения ассоциаций химических элементов в компонентах ландшафтов Беларуси было выполнено соответствующее исследование рассматриваемых донных отложений (без вдхр. Осиповичское). Ассоциации химических элементов выделялись с помощью факторного анализа методом главных компонент с последующим варимакс-вращением (табл. 13, рис. 6 и 7). Пригодность данных для факторного анализа подтверждается высоким значением критерия Кайзера – Мейера – Олкина ($KMO = 0,908$) и теста сферичности Бартлетта ($\chi^2 = 1868$; $df = 190$; $p < 0,000 n$). В результате факторного анализа выделены две главные компоненты (два фактора) с собственными значениями больше 1, на долю которых приходится 77 % общей дисперсии (см. табл. 13).

Фактор 1 определяет 66 % общей дисперсии и описывает варьирование большинства исследуемых химических элементов: Ca, U, Zr, Sc, Th, Ag, Nb, As, La, Mn, Fe. Фактор определяет природную составляющую в содержании химических элементов.

Фактор 2 описывает лишь 11 % варьирования всей системы и ассоциируется с Ni, Cr, Zn, W, Sb, Co, Se. Второй фактор интерпретирован как антропогенный. Содержание элементов данной ассоциации в значительной степени увеличивается в пределах III–VI участков.

Содержание Fe, Cs, Ce, Cd в равной степени определяется природными и антропогенными факторами.

Таблица 13

Факторные нагрузки двух главных компонент химических элементов в донных отложениях р. Свислочи в 1987 г.

Table 13

Principal component loadings of trace elements in the Svisloch River bottom sediments in 1987

Фактор	Химические элементы																				
	Ca	U	Zr	Sc	Th	Ag	Nb	As	La	Mn	Fe	Cd	Ni	Cr	Zn	W	Sb	Co	Se	Cs	Ce
1	0,85	0,84	0,81	0,80	0,80	0,77	0,77	0,75	0,71	0,71	0,69	0,43	—	—	—	0,26	0,28	0,48	0,43	0,62	0,63
2	0,37	0,31	—	0,45	0,31	—	0,37	0,41	0,52	0,5	0,66	0,38	0,94	0,93	0,88	0,87	0,86	0,81	0,66	0,65	0,64

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены ведущие компоненты для каждой переменной; нагрузки, не являющиеся статистически значимыми, опущены.

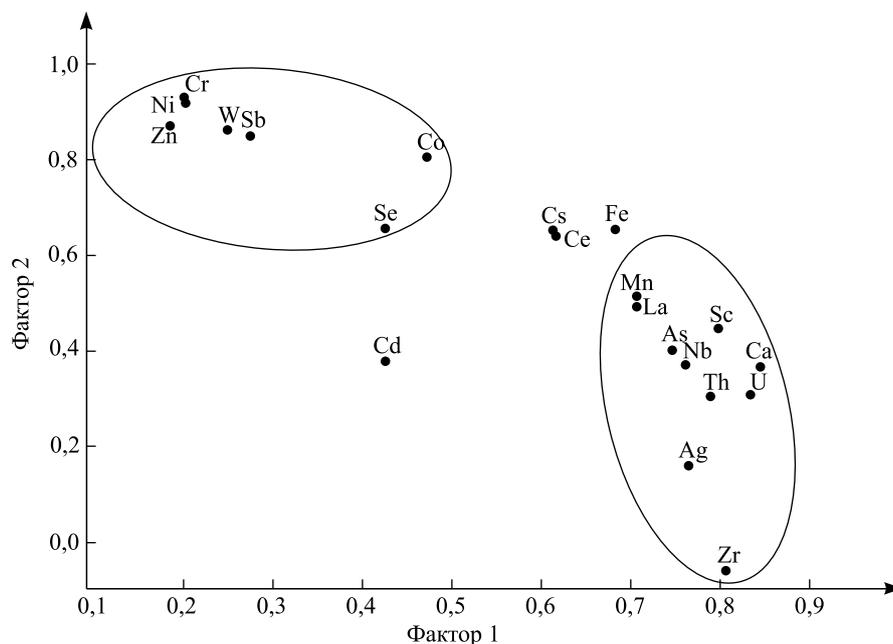


Рис. 6. График факторных нагрузок в проекции на плоскость факторного пространства, задаваемого осями факторов 1 и 2
Fig. 6. Principal component analysis loading plot for trace elements in the Svisloch River bottom sediments

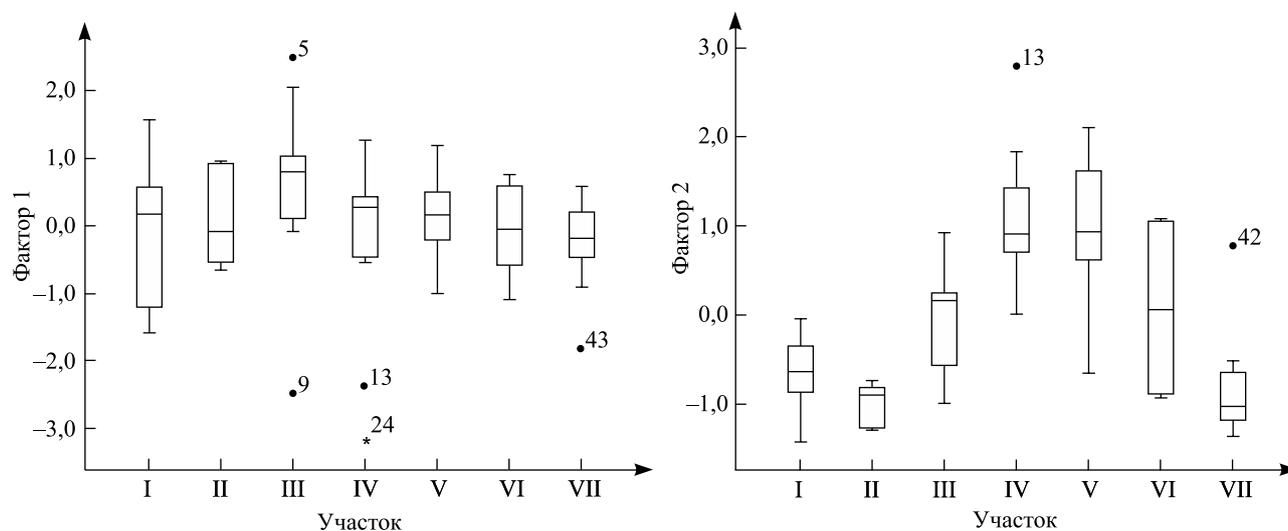


Рис. 7. Варьирование выделенных факторов в пределах участков р. Свислочи
Fig. 7. Variation of the identified factors within the Svisloch River sections

Геохимический мониторинг в условиях техногенного загрязнения речных водохранилищ

Геохимические условия расположенного на р. Свислочи вдхр. Осиповичское существенно отличаются от таковых для остальной части реки (рис. 8). Вследствие значительного техногенного загрязнения оно неоднократно исследовалось (последний раз детально – в 2004 г.) [5; 11; 12; 16].

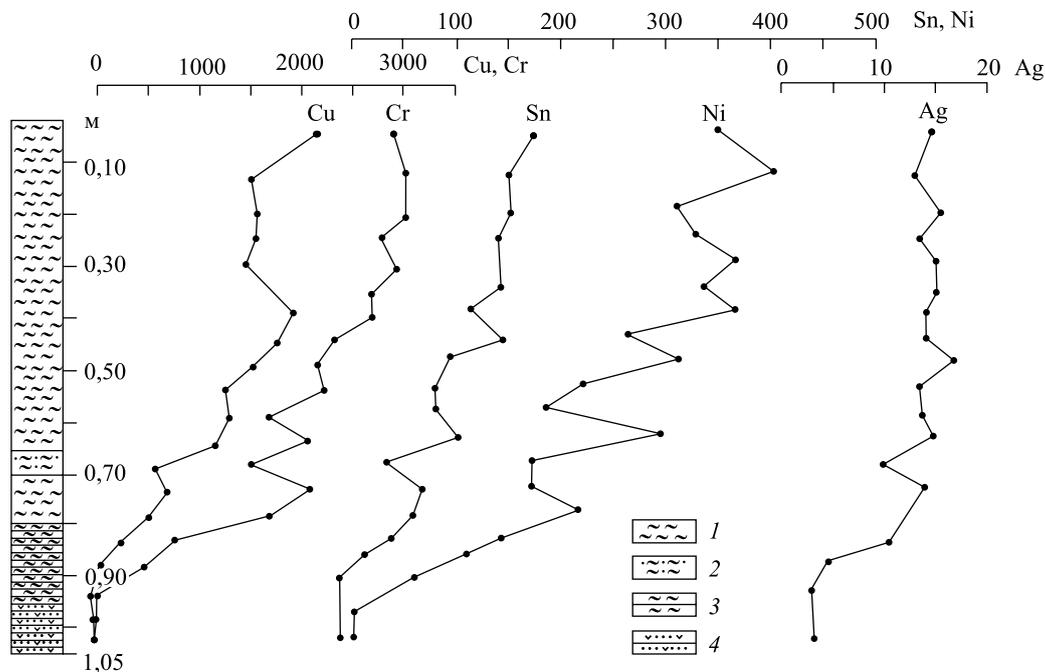


Рис. 8. Распределение Cr, Ni, Cu, Ag, Sn в толще донных отложений вдхр. Осиповичское, мг/кг (составлено по [16]):

1 – техногенный ил; 2 – техногенный опесчаненный ил; 3 – глинистый ил; 4 – глина опесчаненная ожелезненная
Fig. 8. Distribution of Cr, Ni, Cu, Ag and Sn in sediments thickness of Osipovichi Reservoir, mg/kg (complied on [16]):
1 – technogenic silt; 2 – technogenic gritty silt; 3 – clayey silt; 4 – gritty ferruginous clay

Осиповичское водохранилище – один из относительно крупных искусственных водоемов Беларуси (по площади занимает 20-е место), создано в 1953 г. в Осиповичском районе Могилёвской области в результате подпора плотиной Осиповичской ГЭС вод р. Свислочи на расстоянии 43,6 км от ее впадения в р. Березину. Площадь водохранилища – 11,87 км², длина – 23,7 км, ширина на среднем участке – от 200 до 300 м, на нижнем – от 800 до 1200 м. Максимальная глубина водоема – 8,5 м, средняя – 1,5 м. Полный объем водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ), равном 149,50 м, – 17,50 млн м³ [23–25].

Водоохранилище было предназначено для выработки электроэнергии на Осиповичской ГЭС (2250 кВт), водообеспечения прудов рыбного хозяйства «Свислочь» (площадь прудов 3,82 км²), Осиповичского картонно-рубероидного завода (в 1969 г.), регулирования стока нижней части р. Свислочи для лесосплава и др. [23; 24].

Следует отметить, что, согласно имеющейся классификации [26], все ныне существующие водохранилища Беларуси в подавляющем большинстве должны быть отнесены к малым и очень малым. Вместе с тем в рамках Беларуси рассматриваемый водоем может классифицироваться как небольшое водохранилище (при объеме W и площади водного зеркала F, приведенных к НПУ: средние: W – от 500 до 100 млн м³, F – от 100 до 25 км²; небольшие: W – от 100 до 10 млн м³, F – от 25 до 3 км²; малые: W – <10 млн м³, F – < 3 км² [23]).

По ряду морфологических признаков в пределах Беларуси выделяются три типа водохранилищ: 1) поозерский; 2) центральных водораздельных возвышенностей и прилегающих равнин; 3) полесский [23]. Осиповичское водохранилище относится ко второму типу, для которого характерны: а) вытянутая форма с приплотинным расширением; б) высокие (до 10 м) берега, отличающиеся сложным геологическим строением (флювиогляциальные, моренные и другие отложения); в) преимущественно речные водохранилища.

По соотношению морфометрических и гидрологических показателей водохранилища Беларуси подразделяются на пять гидроморфологических типов: малые мелководные; малые и небольшие неглубокие; средние сложные (долинные); среднеглубокие; глубокие (озерные и озерно-речные) [23].

Малые мелководные водохранилища (к которым по данной классификации относится вдхр. Осиповичское), характерные для водораздельных областей, отличаются средними глубинами (< 2 м) и высоким показателем удельных затоплений (> 0,5 м²/м³). Соотношение глубоководной и мелководной частей ложа < 1. Малые средние глубины и большое количество мелководий в сочетании с высоким показателем удельных затоплений благоприятствуют здесь развитию водной растительности, ускоряют процессы накопления ОБ, способствуют быстрому зарастанию ложа и деградации водоема [25].

В проведенных нами исследованиях донных отложений вдхр. Осиповичское (2004) основное внимание было уделено условно-подвижным формам Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb (вытяжка HCl в концентрации 1 моль/л с атомно-абсорбционным окончанием) (табл. 14). Статистическая обработка данных показывает, что практически между всеми изученными компонентами существуют тесные корреляционные связи (табл. 15), причем содержание условно-подвижных форм металлов статистически достоверно связано с содержанием органического вещества в пробе (r составляет от +0,810 до 0,944, $p < 0,0001$) вне зависимости от локализации точки опробования. Отсюда, по-видимому, следует вывод, что в настоящее время вдхр. Осиповичское достаточно равномерно и повсеместно загрязнено условно-подвижными формами техногенных Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb. При этом фиксируемый в том или ином случае уровень техногенного загрязнения напрямую зависит от случайностей опробования – присутствуют или нет в рассматриваемой выборке образцы донных отложений с высоким содержанием ОБ. Пространственное распределение величины суммы условно-подвижных форм техногенных металлов в донных отложениях водохранилища показано на рис. 9, из которого следует, что максимальные значения данного показателя характерны в настоящее время для всей акватории водохранилища.

Таблица 14

Статистические характеристики содержания условно-подвижных форм элементов в донных отложениях вдхр. Осиповичское, мг/кг ($n = 24$)

Table 14

Descriptive statistics of mobile forms trace elements concentrations in Osipovichi Reservoir bottom sediments, mg/kg ($n = 24$)

Элемент	x (lim)	σ_x	s_x
ОБ, %	16,3 (2,9–42,8)	12,2	2,48
Cr	209 (4,6–598)	189	38,5
Mn	1 126 (80–3 300)	973	199
Fe, %	2,56 (0,26–5,19)	1,90	0,389
Ni	41,0 (2,1–110)	30,1	6,15
Cu	117 (1,9–321)	110	22,4
Zn	364 (16–886)	302	61,6
Cd	2,17 (<0,02–4,9)	1,71	0,350
Pb	18,3 (0,76–49)	14,9	3,05

Примечание. x (lim) – Средняя (пределы колебания); σ_x – стандартное отклонение; s_x – ошибка среднего.

Таблица 15

Коэффициенты корреляции между органическим веществом и условно-подвижными формами металлов в донных отложениях вдхр. Осиповичское ($p < 0,0001$, $n = 28$)

Table 15

Pearson correlation coefficients between organic matter and the mobile forms of trace elements concentrations in Osipovichi Reservoir bottom sediments ($p < 0,0001$, $n = 28$)

Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Компонент
+0,821	+0,880 +0,900	+0,932	+0,944	+0,810	+0,854	+0,903	+0,868	ОБ
		+0,926	+0,812	+0,985	+0,984	+0,951	+0,979	Cr
	+0,950	+0,848	+0,925	+0,881	+0,924	+0,924	+0,913	Mn
		+0,934	+0,937	+0,952	+0,974	+0,974	+0,948	Fe
				+0,815	+0,861	+0,937	+0,855	Ni
					+0,973	+0,960	+0,959	Cu
						+0,964	+0,978	Zn
							+0,978	Cd

Валовое содержание. Как указывалось выше, первое подробное изучение степени техногенного загрязнения донных отложений водохранилищ р. Свислочи металлами было выполнено в конце 1980-х – начале 1990-х гг. В. В. Савченко (табл. 16). Приводимые им данные свидетельствуют о существенном загрязнении вдхр. Осиповичское (по сравнению с фоновым вдхр. Заславское) Cr, Ni, Cu, Sn, Pb и другими элементами и преимущественном загрязнении верховья водоема по сравнению с приплотинным участком. Вместе с тем следует отметить, что последний вывод относится к началу 1990-х гг. и результатами выполненного в 2004 г. опробования не подтверждается.

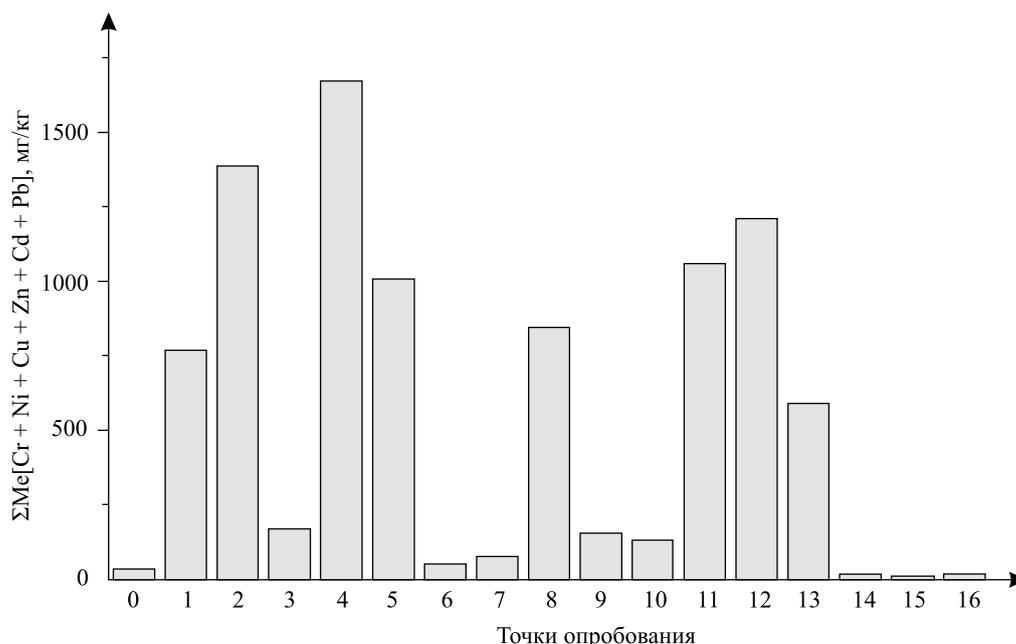


Рис. 9. Распределение суммы условно-подвижных форм техногенных металлов в донных отложениях вдхр. Осиповичское, мг/кг:

расположение точек опробования: 0 – д. Цель; 1 – непосредственно выше моста автотрассы Минск – Бобруйск; 3 – 1 км ниже т. 2; 4 – д. Озерище; 5 – 0,8 км ниже т. 4 (параллельно не опробовалась); 6 – 2 км ниже т. 4; 7 – 2 км ниже т. 6; 8 – 1 км выше д. Зборск; 9 – 0,1 км ниже д. Зборск; 10 – 0,1 км ниже д. Верейцы; 11 – 1,9 км ниже т. 10; 12 – 2 км ниже т. 11; 13 – 0,08 км выше плотины ГЭС; 14 – 0,09 км ниже плотины ГЭС; 15 – мост у д. Липень; 16 – д. Устиж

Fig 9. Location of sampling sites:

0 – vil. Tsel; 1 – directly above the highway bridge Minsk – Bobruisk; 3 – 1 km downstream s. 2; 4 – vil. Ozerishche; 5 – 0,8 km downstream s. 4; 6 – 2 km downstream s. 4; 7 – 2 km downstream s. 6; 8 – 1 km above vil. Zborsk; 9 – 0,1 km downstream vil. Zborsk; 10 – 0,1 km downstream vil. Vereytsy; 11 – 1,9 km downstream s. 10; 12 – 2 km downstream s. 11; 13 – 0,08 km above hydroelectric dam; 14 – 0,09 km downstream hydroelectric dam; 15 – bridge near the vil. Lipen; 16 – vil. Ustizh

Таблица 16

Валовое содержание металлов в донных отложениях (илах) водохранилищ р. Свислочи, мг/кг (составлено по [16] с добавлением)

Table 16

Trace elements total contents in bottom sediments (silts) of the Svisloch' reservoirs, mg/kg (compiled on [16] with addition)

Элемент	Заславское (n = 20), 1980-е гг.	Осиповичское			
		Начало 1990-х гг.			2004 г.
		Верховье (n = 27)	Низовье (n = 7)	В целом (n = 34)	В целом (n = 14)
Be	0,6	1,0	0,8	0,96	0,86
Ti	1600	2000	1800	1960	2020
V	34	93	63	87	31
Cr	23	2 800	910	2410	490
Mn	770	1800	1900	1820	1780
Co	6,2	8,8	8,7	8,8	7,5

Элемент	Заславское ($n = 20$), 1980-е гг.	Осиповичское			
		Начало 1990-х гг.			2004 г.
		Верховье ($n = 27$)	Низовье ($n = 7$)	В целом ($n = 34$)	В целом ($n = 14$)
Ni	15	560	330	510	120
Cu	18	1400	410	1200	185
Y	17	27	32	28	12
Zr	230	260	350	280	240
Ag	н. о.	19	6,9	17	1,4
Sn	н. о.	140	29	120	11
Ba	300	970	720	920	340
Yb	1,7	2,5	3,0	2,6	1,0
Pb	19	86	46	78	36

Нами также было проведено определение валового содержания (методом эмиссионного спектрального анализа, ЭСА) ряда элементов в донных отложениях вдхр. Осиповичское, имеющих с точки зрения техногенного загрязнения как первостепенное (Cr, Ni, Cu, Pb), так и второстепенное значение. Как и для условно-подвижных форм изученных металлов (см. выше), для валовой концентрации отдельных элементов (Be, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ag, Sn, Pb) в той или иной степени проявляется роль содержания в пробе органического вещества ($n = 28$, $Fe - r = +0,935$, $Ni - r = +0,860$, $Mn - r = +0,858$, $Cu - r = +0,804$, $V - r = +0,774$, $Cr - r = +0,736$, $Pb - r = +0,734$, $p < 0,0001$; $Co - r = +0,620$, $Ag - r = +0,654$, $p < 0,001$; $Be - r = +0,532$, $Sn - r = +0,505$, $p < 0,01$). Аккумуляция Ti, Sr, Y, Zr, Ba, Yb с ОВ донных отложений, по нашим данным, не связана ($r = |0,069 - 0,366|$, $p > 0,05$). Отсюда закономерно следует вывод, аналогичный вышеприведенному для условно-подвижных форм: в настоящее время вдхр. Осиповичское достаточно равномерно и повсеместно загрязнено техногенными Cr, Ni, Cu, Pb (валовое содержание). При этом фиксируемый в том или ином случае уровень техногенного загрязнения напрямую зависит от случайностей опробования – присутствуют или нет в рассматриваемой выборке образцы донных отложений с высоким содержанием органического вещества.

Статистические характеристики валового содержания металлов в донных отложениях вдхр. Осиповичское без дифференциации их по литологическому составу (пески, илы) представлены в табл. 17.

Таблица 17

Статистические характеристики валового содержания металлов в донных отложениях вдхр. Осиповичское, мг/кг ($n = 24$)

Table 17

Descriptive statistics of trace elements total contents in Osipovich Reservoir bottom sediments, mg/kg ($n = 24$)

Элемент	x (lim)	σ_x	s_x
ОВ, %	16,3 (2,9–42,8)	12,2	2,48
Be	0,71 (0,5–1,3)	0,24	0,05
Ti	1 935 (450–4300)	903	184
V	22,4 (5–58)	15,1	3,1
Cr	306 (10–1000)	283	57,8
Mn	1 216 (240–3300)	937	191
Fe, %	2,74 (0,72–5,2)	1,73	0,353
Co	5,83 (1,9–18)	3,97	0,810
Ni	82,6 (12–230)	59,9	12,2
Cu	120 (8,5–320)	107	21,8
Sr	120 (100–220)	33,7	6,88
Y	10,6 (5–25)	4,22	0,861
Zr	309 (90–860)	206	42,1

Окончание табл. 17
Ending table 17

Элемент	x (lim)	σ_x	s_x
Ag	0,987 (0,35–2,7)	0,696	0,142
Sn	8,24 (5–25)	5,38	1,10
Ba	342 (210–500)	67,3	13,7
Yb	0,964 (0,5–1,9)	0,295	0,060
Pb	26,1 (8,6–69)	18,3	3,73

Средние показатели валового содержания ряда элементов непосредственно в илах ($n = 14$), опробованных в 2004 г., включены в сводную табл. 16.

При рассмотрении данных табл. 16, характеризующих содержание металлов в илах водохранилища в начале 1990-х гг. и в 2004 г., сразу обращает на себя внимание следующая закономерность: 1) средняя выборочная концентрация элементов естественного происхождения – Be, Ti, Mn, Co, Zr – за прошедшее время практически не изменилась (полученные показатели отличаются не более чем в 1,2 раза и, по-видимому, подтверждают сопоставимость двух одновременных опробований); 2) средняя концентрация техногенных элементов заметно снизилась (V – в 2,8, Cr – в 4,9, Ni – в 4,3, Cu – в 6,5 раза, Ag – в 12, Sn – в 11 раз и Pb – в 2,2 раза), что может быть связано с уменьшением поступления данных веществ с водами р. Свислочи от Минской станции аэрации по сравнению с началом 1990-х гг.

Ориентировочные данные, позволяющие судить о доле участия условно-подвижных форм металлов ($C_{\text{усл.-подв}}$) в валовом их содержании ($C_{\text{вал}}$) для проб донных отложений вдхр. Осиповичское и р. Свислочи, представлены в табл. 18. Эти результаты следует рассматривать как оценочные, поскольку содержание условно-подвижных форм и валового содержания металлов определялось различными методами (атомно-абсорбционного анализа, ААА, и ЭСА), часто имеющими сильную невязку. Тем не менее заметно, что образцы, характеризующиеся высоким содержанием ОБ, как правило, показывают очень большое доленое участие условно-подвижных форм (в табл. 18 обозначено полужирным шрифтом как **1,00**). Подобные пробы встречаются на всей акватории водохранилища.

Таблица 18

Долевое участие (соотношение) условно-подвижных форм элементов донных отложений вдхр. Осиповичское в валовом их содержании ($C_{\text{усл.-подв}}/C_{\text{вал}}$)

Table 18

The proportion of mobile forms trace elements in Osipovichi Reservoir sediments from their total contents ($C_{\text{mobile}}/C_{\text{total}}$)

Номер пробы (место)	ОБ, %	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Pb
0 (П)	2,9	0,588	0,354	0,446	0,276	0,386	0,358
1 (П)	23,8	1,00	1,00	1,00	0,758	1,00	1,00
1 (Ц)	15,2	0,709	1,00	1,00	0,513	0,653	0,831
1 (Л)	29,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2 (П)	27,6	0,688	1,00	1,00	0,569	1,00	1,00
2 (Ц)	16,7	0,771	1,00	1,00	0,635	1,00	1,00
2 (Л)	25,7	1,00	1,00	1,00	0,674	1,00	1,00
3 (Ц)	14,5	0,057	1,00	0,53	0,331	0,547	0,744
4 (Ц)	30,7	0,778	1,00	1,00	0,349	1,00	0,626
5 (ПСт)	43,5	0,798	0,368	1,00	0,047	0,130	0,92
6 (Ц)	2,9	0,758	0,463	0,667	0,40	0,379	0,122
7 (Ц)	2,9	0,967	0,36	0,475	0,407	0,275	0,180
8 (Ц)	2,9	0,46	0,267	0,323	0,117	0,221	0,084
8 (Л)	23,3	0,464	1,00	1,00	0,342	1,00	0,436
9 (П)	5,4	0,877	0,925	0,979	0,618	1,00	0,598
9 (Ц)	6,3	1,00	0,545	0,76	0,313	1,00	0,398

Номер пробы (место)	ОВ, %	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Pb
9 (Л)	4,5	0,589	0,226	0,327	0,181	0,713	0,151
10 (Ц)	4,1	1,00	0,775	0,679	0,383	1,00	0,24
11 (Ц)	19,0	0,626	1,00	1,00	0,529	1,00	0,556
12 (П)	30,8	1,00	1,00	1,00	0,939	1,00	1,00
12 (Ц)	38,4	1,00	1,00	1,00	0,644	1,00	1,00
12 (Л)	42,8	0,685	1,00	1,00	0,481	1,00	0,901
13 (П)	24,4	0,527	0,824	1,00	0,459	1,00	0,719
13 (Ц)	6,4	0,688	0,85	0,604	0,379	0,944	0,451
13 (Л)	12,3	0,625	0,859	1,00	0,372	0,968	0,564
14 (П)	2,9	0,329	0,564	0,408	0,18	0,269	0,242
15 (П)	2,9	0,167	0,256	0,311	0,189	0,11	0,020
16 (П)	2,9	0,349	0,293	0,323	0,18	0,291	0,148

Примечания. 1. Расположение точек отбора проб приведено на рис. 9. 2. П – правый берег; Л – левый берег; Ц – центр; Ст – старица.

Были также изучены ассоциации химических элементов в донных отложениях вдхр. Осиповичское (табл. 19) [12]. В результате факторного анализа выделены 3 главных фактора (компоненты), объясняющие 85 % общей дисперсии.

Таблица 19

Значения факторных нагрузок главных компонент химических элементов в донных отложениях вдхр. Осиповичское в 2004 г.

Table 19

Principal component loadings of trace elements in Osipovich Reservoir bottom sediments in 2004

Элемент	Фактор		
	1	2	3
Cu	0,955	–	–
Pb	0,953	–	–
Fe	0,939	–	–
Cr	0,938	–	–
Ni	0,922	–	–
V	0,909	–	–
Mn	0,892	–	–
Ag	0,843	–	–
Co	0,748	–	–
Be	0,690	0,554	–
Y	–	0,927	–
Yb	–	0,894	–
Ti	–	–	0,910
Zr	–	–	0,854
Ba	–	–	0,505
Вклад, %	58	14	13

Примечания. 1. Представлены только значимые факторные нагрузки при $p < 0,01$.
2. Полужирным шрифтом выделены ведущие компоненты для каждой переменной.

С фактором 1, описывающим 58 % общей дисперсии, положительно связано содержание большинства изученных химических элементов – Cu, Pb, Fe, Cr, Ni, V, Mn, Ag, Co, Be, отдельные из которых в данной геохимической обстановке имеют явное техногенное происхождение (стоки г. Минска). Установлена сильная прямая зависимость содержания элементов данной ассоциации от содержания органического вещества ($r = 0,9$, $p < 0,001$).

Фактор 2 (14 % общей дисперсии) отражает поведение Y и Yb (весьма характерная естественная парагенетическая ассоциация элементов).

Фактор 3 (13 % общей дисперсии) характеризуется высокими нагрузками Ti, Zr, Ba (еще одна характерная естественная ассоциация элементов).

Поскольку практически все элементы первой ассоциации связаны как с ОВ донных отложений (Be, Co в средней степени (r составляет от 0,50 до 0,60); V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Ag, Pb в сильной (r составляет от 0,75 до 0,87)), так и с Fe (Co в средней степени ($r = 0,56$); Be, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ag, Pb в сильной (r составляет от 0,73 до 0,91)), целесообразно рассчитывать частные коэффициенты корреляции, позволяющие уточнить, содержанием какого макрокомпонента (ОВ или Fe) при прочих равных условиях в первую очередь обусловлены концентрации исследуемых химических элементов. Выполненные расчеты показали, что фиксируемое содержание Ni в донных отложениях в современной техногеохимической обстановке вдхр. Осиповичское во многом определяется соответствующей концентрацией ОВ ($r = +0,6$), тогда как Be, V, Cr, Mn, Cu, Ag, Pb – концентрацией Fe (r составляет от +0,6 до 0,8).

Заключение

Таким образом, рассмотрение различных аспектов геохимического мониторинга субаквальных систем разного уровня показывает, что в данной области существует ряд направлений, представляющих большой теоретический и практический интерес. Переход от глобального уровня изучения миграции/концентрации микроэлементов к региональному (локальному) требует разработки простых детальных приемов оценки уровня техногенного загрязнения донных отложений, учитывающих специфику их макросостава. Один из таких приемов, основанный на нормировании содержания микроэлементов по Fe (на примере Cr, Ni, Mn, Co), был подробно описан в настоящей статье применительно к трансаквальной системе (донные отложения р. Свислочи).

Библиографические ссылки

1. Forchhammer G. On the composition of sea-water in the different parts of the ocean // Philos. Transact. of the Royal Society of London. 1865. Vol. 155. P. 203–262.
2. Шонф Т. Палеоокеанология. М., 1982.
3. Сугавара К. Миграция элементов в гидросфере и атмосфере // Химия земной коры : в 2 т. М., 1964. Т. 2. С. 469–478.
4. Добровольский В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М., 1983.
5. Лукашѐв В. К., Антоненко Л. И., Савченко В. В. Микроэлементы в донных отложениях водохранилищ // Докл. АН БССР. 1989. Т. 33, № 5. С. 458–460.
6. Лукашѐв В. К. Искусственные сорбенты в прикладной и экспериментальной геохимии. Минск, 1992.
7. Лукашѐв О. В. Распределение хрома в водах и донных отложениях р. Свислочи // Проблемы рационального использования и охраны природной среды : тез. докл. конф. (Минск, 10–12 апр. 1990). Минск, 1990. С. 92.
8. Лукашѐв О. В. К вопросу об индикационных свойствах донных отложений (основные закономерности аккумуляции хрома) // Геохимия техногенеза : тез. докл. II Всесоюз. совещ. (Минск, 2–4 апр. 1991). Минск, 1991. С. 158–161.
9. Лукашѐв О. В. Геохимия хрома в зоне гипергенеза (на примере Белоруссии и смежных территорий). Минск, 1993.
10. Tvoronovich-Sevruk D. L., Lukashev O. V., Savchenko V. V. Methodological aspects of geochemical monitoring of river deposits // 6th Int. Symp. & Exhib. on Environmental. Contamination in Central & Eastern Europe and the Commonwealth of Independent States : pap. (Prague, 1–4 Sept. 2003). Prague, 2003 (CD-ROM, file 402).
11. Оценка техногенного загрязнения донных отложений Осиповичского водохранилища металлами / О. В. Лукашѐв [и др.] // Природные ресурсы. 2007. № 3. С. 74–79.
12. Геохимические ассоциации элементов в донных отложениях Осиповичского водохранилища / О. В. Лукашѐв [и др.] // Мониторинг окружающей среды : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. (Брест, 25–27 сент. 2013 г.). Брест, 2013. Ч. 1. С. 37–39.
13. Содержание химических элементов в современных донных отложениях рек Беларуси (техногеохимический аспект) / О. В. Лукашѐв [и др.] // Природопользование. 2015. Вып. 27. С. 109–117.
14. Савченко В. В. Техногенный поток рассеяния р. Свислочи // Докл. АН Беларуси. 1992. Т. 36, № 1. С. 67–71.
15. Трансформация донных осадков рек при техногенном воздействии / В. В. Савченко [и др.] // Докл. АН Беларуси. 1993. Т. 37, № 6. С. 99–103.
16. Савченко В. В. Микроэлементы в илах водохранилищ р. Свислочи // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 4. С. 444–447.
17. Савченко В. В. Донный наилот рек: генезис, минералого-геохимический состав, индикация загрязнения // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 2. С. 199–205.
18. Савченко В. В., Гурч Е. П., Головатый С. Е. Техногеохимические исследования аллювиальных осадков в Беларуси: состояние и проблемы // Природные ресурсы. 1999. № 4. С. 60–71.

19. Твороневич-Севрук Д. Л. Закономерности распределения элементов группы железа в современных аллювиальных отложениях Беларуси. Минск, 2013.
20. Geochemical Atlas of Europe. Part 1 : Background information, methodology and maps [Electronic resource]. Geological Survey of Finland, 2005. URL: <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/> (date of access: 03.10.2016).
21. Венецкий И. Г., Кильдышев Г. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М., 1975.
22. Кузнецов В. А., Шимко Г. А. Метод постадийных вытяжек при геохимических исследованиях. Минск, 1990.
23. Водохранилища Белоруссии: природные особенности и взаимодействие с окружающей средой / под ред. В. М. Широкова. Минск, 1991.
24. Беларуская савецкая энцыклапедыя : у 12 т. Мінск, 1969. Т. 1.
25. Белорусская Советская Социалистическая Республика : энциклопедия. Минск, 1978.
26. Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. Пермь, 1977.

References

1. Forchhammer G. On the composition of sea-water in the different parts of the ocean. *Philos. Transact. of the Royal Society of London*. 1865. Vol. 155. P. 203–262.
2. Shopf T. Paleooceanologia. Mosc., 1982 (in Russ.).
3. Sugavara K. Migratsiya elementov v gidrosfere i atmosphere. *Khimiya zemnoi kory* : in 2 vol. Mosc., 1964. Vol. 2. P. 469–478 (in Russ.).
4. Dobrovolskii V. V. Geografiya mikroelementov. Global'noe rasseyanie. Mosc., 1983 (in Russ.).
5. Lukashov V. K., Antonenko L. I., Savchenko V. V. Mikroelementy v donnykh otlozheniyakh vodokhranilishch [Trace elements in bottom sediments of water reservoirs]. *Doklady AN BSSR*. 1989. Vol. 33, No. 5. P. 458–460 (in Russ.).
6. Lukashov V. K. Iskusstvennye sorbenty v prikladnoi i eksperimental'noi geokhimi. Minsk, 1992 (in Russ.).
7. Lukashov O. V. Raspreделение khroma v vodakh i donnykh otlozheniyakh r. Svisloch' [Cr distribution in waters and bottom sediments of the river Svisloch]. *Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnoi sredy* : tez. dokl. konf. (Minsk, 10–12 Apr. 1990). Minsk, 1990. P. 92 (in Russ.).
8. Lukashov O. V. K voprosu ob indikatsionnykh svoistvakh donnykh otlozhenii (osnovnye zakonomernosti akumulatsii khroma) [Concerning some indicator properties of bottom sediments (the main regularities of Cr accumulation)]. *Geokhimiya tekhnogeneza* : tez. dokl. II Vsesoyuz. soveshch. (Minsk, 2–4 Apr. 1991). Minsk, 1991. P. 158–161 (in Russ.).
9. Lukashov O. V. Geokhimiya khroma v zone gipergeneza (na primere BeloRuss.ii i smezhnykh territorii). Minsk, 1993 (in Russ.).
10. Tvoronovich-Sevruck D. L., Lukashov O. V., Savchenko V. V. Methodological aspects of geochemical monitoring of river deposits. *6th Int. Symp. & Exhib. on Environmental "Contamination in Central & Eastern Europe and the Commonwealth of Independent States"*. Prague, 2003. (CD-ROM, file 402).
11. Lukashov O. V., Tvoronovich-Sevruck D. L., Savchenko S. V., et al. Otsenka tekhnogenogo zagryazneniya donnykh otlozhenii Osipovichskogo vodokhranilishcha metallami [Pollution assessment of Osipovich reservoir bottom sediments with metals]. *Prirodnye resursy*. 2007. No. 3. P. 74–79 (in Russ.).
12. Lukashov O. V., Zhukovskaya N. V., Lukashova N. G., et al. Geokhimicheskie assotsiatsii elementov v donnykh otlozheniyakh Osipovichskogo vodokhranilishcha. *Monitoring okruzhayushchei sredy* : materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. : in 2 vol. (Brest, 25–27 Sept. 2013). Brest, 2013. Vol. 1. P. 37–39 (in Russ.).
13. Lukashov O. V., Zhukovskaya N. V., Lukashova N. G., et al. Soderzhanie khimicheskikh elementov v sovremennykh donnykh otlozheniyakh rek Belarusi (tekhnogeokhimicheskii aspekt) [The trace elements contents in modern bottom sediments of the Belarusian rivers (technological and geochemical aspects)]. *Prirodopol'zovanie*. 2015. Vol. 27. P. 109–117 (in Russ.).
14. Savchenko V. V. Tekhnogennyi potok rasseyaniya r. Svisloch' [Anthropogenic leakage fluxes of the river Svisloch]. *Doklady AN BSSR*. 1992. Vol. 36, No. 1. P. 67–71 (in Russ.).
15. Savchenko V. V., Shimanovich S. L., Murashko L. I., et al. Transformatsiya donnykh osadkov rek pri tekhnogenom vozdeistvii [Anthropogenic impact on the transformation of rivers bottom sediments]. *Doklady AN BSSR*. 1993. Vol. 37, No. 6. P. 99–103 (in Russ.).
16. Savchenko V. V. Mikroelementy v ilakh vodokhranilishch r. Svislochi [Trace elements in silts of the river Svisloch water reservoirs]. *Vodnye resursy*. 1996. Vol. 23. No. 4. P. 444–447 (in Russ.).
17. Savchenko V. V. Donnyi nailok rek: genesis, mineralogo-geokhimicheskii sostav, indikatsiya zagryazneniya [River bottom silt: Genesis, mineralogical and geochemical composition, indication of contamination]. *Vodnye resursy*. 1998. Vol. 25, No. 2. P. 199–205 (in Russ.).
18. Savchenko V. V., Gurch E. P., Golovyatij S. E. Tekhnogeokhimicheskie issledovaniya allyuvial'nykh osadkov v Belarusi: sostoyanie i problem [Technological and geochemical research of alluvial sediments in Belarus: status and challenges]. *Prirodnye Resursy*. 1999. No. 4. P. 60–71 (in Russ.).
19. Tvoronovich-Sevruck D. L. Zakonomernosti raspredeleniya elementov grupy zheleza v sovremennykh allyuvial'nykh otlozheniyakh Belarusi. Minsk, 2013 (in Russ.).
20. Geochemical Atlas of Europe. Part 1 : Background information, methodology and maps [Electronic resource]. *Geological Survey of Finland*, 2005. URL: <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/> (date of access: 03.10.2016).
21. Venetskii I. G., Kil'dyshev G. S. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika. Mosc., 1975 (in Russ.).
22. Kuznetsov V. A., Shimko G. A. Metod postadiinykh vytyazhek pri geokhimicheskikh issledovaniyakh. Minsk, 1990 (in Russ.).
23. Vodokhranilishcha BeloRuss.ii: prirodnye osobennosti i vzaimodeistvie s okruzhayushchei sredoi. Ed. by V. M. Shirokova. Minsk, 1991 (in Russ.).
24. Belaruskaya savetskaya entsyklopedyya : in 12 vol. Minsk, 1969. Vol. 1 (in Russ.).
25. BeloRuss.kaya Sovetskaya Sotsialisticheskaya Respublika : entsiklopediya. Minsk, 1978 (in Russ.).
26. Matarzin Y. M., Bogoslovskii B. B., Matskevich I. K. Spetsifika vodokhranilishch i ikh morfometriya. Perm', 1977 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.11.2016.
Received by editorial board 22.11.2016.