

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ГЕАХІМІЯ
GEOCHEMISTRY

УДК 556.314.550.361(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466>

Поступила в редакцию 10.04.2018
Received 10.04.2018

Л. Н. Рябова, И. А. Залыгина

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
(НА ПРИМЕРЕ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Аннотация. Необходимость проведения геохимических исследований донных отложений обусловлена тем, что они позволяют оперативно оценивать состояние окружающей среды в пределах водосбора водотоков, так как состав донных отложений наследует геохимические черты компонентов окружающего ландшафта. В работе впервые представлены новые данные по содержанию в донных отложениях микроэлементов, сульфатов, хлоридов, нитратов, нефтепродуктов, СПАВ и фенолов, полученные при комплексных геохимических исследованиях в Брестской области. Установлены уровни концентраций определяемых ингредиентов для отложений основных типов водоемов. Отмечено максимальное накопление соединений азота, хлоридов, фосфатов и микроэлементов (никеля, кобальта, ванадия, хрома, меди, цинка и марганца) в отложениях рек, сульфаты и свинец концентрируются в большей степени в донных отложениях мелиоративных каналов. Построена карта загрязнения донных отложений территории Брестской области масштаба 1:200000. Установлено, что геохимическое состояние донных отложений в водоемах Брестской области находится в основном в удовлетворительном состоянии, степень загрязненности тяжелыми металлами оценивается как допустимая и только 3,0 % попадает в категорию опасного уровня загрязнения.

Ключевые слова: донные отложения, химические вещества, коэффициент загрязнения, концентрация, карта загрязнения

Для цитирования. Рябова, Л. Н. Критерий оценки экологического состояния донных отложений (на примере Брестской области) / Л. Н. Рябова, И. А. Залыгина // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 455–466. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466>

L. N. Ryabova, I. A. Zalygina

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**CRITERION FOR THE ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL CONDITION OF BOTTOM SEDIMENTS
(ON THE EXAMPLE OF THE BREST REGION)**

Abstract. Geochemical parameters of bottom sediments allow quick estimating the state of the environment within the catchment of watercourses, as the composition of bottom sediments inherits the geochemical features of the components of the surrounding landscape. New data on the content of trace elements, sulfates, chlorides, nitrates, petroleum products, synthetic surfactants and phenols in the bottom sediments, obtained during complex geochemical studies in the Brest region, are presented. The concentration levels of the determined ingredients for sediments of the main types of reservoirs were determined. The maximum accumulation of nitrogen compounds, chlorides, phosphates and trace elements (nickel, cobalt, vanadium, chromium, copper, zinc and manganese) was marked in the sediments of rivers, while sulfates and lead are concentrated to a greater extent in the bottom sediments of the drainage channels. The map of pollution of bottom deposits of the territory of the Brest region of scale 1:200000 was constructed. It was found that the geochemical state of bottom sediments in the reservoirs of the Brest region is mainly in satisfactory condition, the degree of pollution by heavy metals was estimated as permissible with only 3.0 % belonging to the category of dangerous pollution level.

Keywords: ground sedimentations, chemicals, contamination coefficient, concentration, contamination map

For citation. Ryabova L. N., Zalygina I. A. Criterion for the assessment of the ecological condition of bottom sediments (on the example of the Brest region) *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 455–466 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466>

Введение. Научные исследования осадков крупных водоемов были начаты во второй половине XVIII века. С утверждением новой отрасли знаний в науках о Земле – почвоведения, исследователи начали проявлять особый интерес к донным отложениям как к природным объектам, обладающим рядом признаков, идентичных почвам. В настоящее время, опираясь на учение о геохимии ландшафтов Б. Б. Полынова [1], выделяют субаквальные ландшафты с наличием субаквальных (подводных) почв. К ним применяются методология и методики исследований, разработанные в почвоведении [2].

Состав донных отложений рек и ручьев наследует состав почв берегов, так как формируется в результате смешивания рыхлых образований, слагающих верхнюю кромку земной поверхности, снесенными поверхностными водами в русла водотоков. Поэтому данные о составе аллювия позволяют оперативно оценить состав и экологию почвенного покрова в пределах бассейнов водосбора водотоков [3]. Одним из способов решения этой задачи является установление величин соотношения между содержаниями химических элементов в почве и речным аллювием. Такой подход был реализован американскими геохимиками для оценки состава почв на площади 35 тыс. км² в северной части штата Висконсин (США) [4].

Процесс формирования донных отложений включает в себя разрушение минеральных агрегатов и вынос частиц водным потоком. Истирание минеральных частиц различного состава протекает с различной интенсивностью, что приводит к изменению исходных содержаний элементов в привнесенном материале. Минеральные частицы, устойчивые к механическому истиранию (касситерит, циркон и др.), обогащают потоки рассеяния слагающих их элементов. И наоборот, элементы, входящие в состав малоплотных и легко разрушаемых минеральных агрегатов, будут выноситься из донных осадков. Современный активный слой донных отложений, занимающий пограничное положение между лито- и гидросферой, представляет собой мощный комплексный механический и физико-химический барьер, на котором происходит концентрация многих химических элементов, в том числе техногенного происхождения [5].

На территории Беларуси геохимия донных отложений водоемов в настоящее время изучена пока недостаточно. Донные отложения рассматриваются в одних работах как продукт литогенеза [6, 7], в других – техногенеза [8], при этом геохимическая связь почвенных образований и донных отложений не рассматривается. Проведенные нами в последние годы комплексные геохимические исследования в Брестской области ландшафтов (почвы, породы зоны аэрации, донные отложения, поверхностные и грунтовые воды) позволили сопоставлять геохимические показатели по этим природным объектам и установить местные кларки концентрации химических элементов в этих природных объектах [9, 10].

Цель настоящей работы – на основании полученных новых данных по геохимии донных отложений на территории Брестской области установить в них уровни концентраций микроэлементов, водорастворимых соединений (сульфаты, хлориды, фосфаты, соединения азота), органических соединений (нефтепродукты, фенолы, СПАВ). Построить эколого-геохимическую карту загрязнения донных отложений химическими веществами в масштабе 1:200 000.

Объекты и методы исследований. В рамках проведения комплексных геохимических исследований на территории Брестской области 2013–2015 гг. были изучены донные отложения рек, озер, водохранилищ, мелиоративных каналов. Отбор проб (231) для лабораторных исследований осуществлялся сотрудниками Института природопользования НАН Беларуси в процессе экспедиционных работ. Химические анализы выполнялись в Центральной лаборатории ГП «НПЦ по геологии», имеющей аккредитацию на проведение таких работ. Определение обменной кислотности в донных отложениях проводили в вытяжке 1N KCl методом потенциометрии (ГОСТ 26423-85). Изучение содержания водорастворимых веществ в донных отложениях выполняли с помощью водных вытяжек. Сульфаты определяли гравиметрическим методом (ГОСТ 26426-85), хлориды – с использованием титриметрии

(ГОСТ 26425-85); азотистые соединения – фотоколориметрическим методом (ГОСТ 18826-73, ГОСТ 4192-82, ГОСТ 4192-82). Определение нефтепродуктов в образцах донных отложений производили флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» (М 03-03-2007).

Анализ микроэлементного состава донных отложений выполняли с использованием эмиссионного спектрального метода. Определялись концентрации более 30 элементов (никеля, кобальта, марганца, титана, хрома, свинца, циркония, меди, цинка, бериллия, ниобия, скандия, молибдена, галлия, иттрия, иттербия, таллия, гафния, висмута, сурьмы, селена, олова, бора, лития и др.). По ряду элементов (W, In, Ge, Sb, U, Th, As, Sb, Cd, Hg) концентрации оказались ниже чувствительности метода исследования.

Геохимические данные обрабатывали методами математической статистики. Анализировали результаты статистической обработки для всей выборки в целом, а также по отдельным выборкам геохимических данных, сформированных по отложениям основных типов водных объектов и отложениям различного гранулометрического состава. Оценку экологического состояния донных осадков осуществляли с использованием статистической обработки всей полученной информации.

Построение геохимических карт, отражающих геоэкологическое состояние донных отложений, осуществляли с использованием программного обеспечения «Map Info 8.5» на электронной (цифровой) топографической основе Брестской области масштаба 1:200000 с использованием геохимических данных по 231 пробе донных отложений.

Результаты исследований и их обсуждение. Полученная геохимическая информация свидетельствует о широком разбросе данных по всем определяемым ингредиентам в донных отложениях (табл. 1). Выявлена высокая вариабельность результатов определений концентраций водорастворимых соединений (коэффициенты вариации по среднему квадратическому отклонению составляют более 100 %). Наиболее высокими коэффициентами вариации характеризуются соединения: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_2^- > \text{PO}_4^{3-} > \text{NO}_3^-$.

Соединения азота. Донные отложения характеризуются преобладанием в солевом составе в 50 % проб аммонийной формы азота над нитратной. Содержания нитратов выше ПДК не выявлено. Наиболее часто встречаемые концентрации NH_4^+ определены в интервале 3,5–7,0 мг/кг, NO_3^- 2,0–6,6 мг/кг. Нитритный азот в донных отложениях присутствует в небольших количествах, максимальное количество проб имеет содержание от 0,1–2,0 мг/кг.

Таблица 1. Статистические показатели определяемых ингредиентов в донных отложениях Брестской области

Table 1. Statistical indicators of the identified ingredients in the sediments of the Brest region

Наименование ингредиента	Среднее, мг/кг (n = 231)	Ошибка среднего, (±) мг/кг	Минимум, мг/кг	Максимум, мг/кг	Медиана, мг/кг	Стандартное отклонение, мг/кг	Коэффициент вариации, %
pH	7,01	0,04	3,36	8,28	7,06	0,62	9
NH_4^+	9,04	0,76	1,0	131,3	6,30	11,58	128
NO_3^-	8,45	0,60	0	70,2	5,80	9,06	107
NO_2^-	0,73	0,08	0,05	7,50	0,30	1,15	159
SO_4^{2-}	621,50	77,22	1,5	9382,2	127,60	1173,64	189
Cl^-	60,89	14,30	4,9	3078,8	30,50	217,379	357
PO_4^{3-}	1,01	0,08	0,05	8,40	0,67	1,25	115

Самые высокие суммарные концентрации соединений азота (нитратный, аммонийный, нитритный) зафиксированы в донных отложениях Малоритского района, Прилукский канал – 134 мг/кг; менее значительные в Каменецком районе, р. Правая Лесная – 93; в Брестском, р. Копаювка – 82; в Пружанском, водохранилище на р. Поплава – 75 и в мелиоративном канале – 70 мг/кг.

Сульфаты. Содержания сульфатов в донных отложениях характеризуются широким разбросом концентраций – от менее 2 до 9 382,2 мг/кг. Высокие концентрации SO_4^{2-} приурочены к территориям мелиорированных торфяников, наименьшие – к зонам песчаных отложений. Характерной чертой донных отложений Брестской области является значительное превышение концентраций подвижных сульфатов над их содержаниями в почвах и торфяниках. Это объясняется, по мнению А. Л. Жуховицкой [11], повышенной продуктивностью сульфатредукции в тех водоемах, где в придонных слоях создается режим кислородной недостаточности. В целом концентрация сульфатов в донных отложениях зависит не только от абсолютного содержания в них органического вещества, но и в большей мере от интенсивности тех процессов, которые протекают на контакте осадка и водной массы.

Хлориды. Содержание хлоридов в донных отложениях характеризуются максимальной вариабельностью, коэффициент вариации составляет 357 %. Концентрации этих соединений изменяются в пределах 4,9–3078,8 мг/кг (табл. 2). Наиболее встречаемые концентрации 25–65 мг/кг.

Таблица 2. Средние концентрации водорастворимых соединений в донных отложениях основных типов водоемов на территории Брестской области, мг/кг

Table 2. Average concentrations of water-soluble compounds in the bottom sediments of the main types of water bodies in the territory of the Brest region, mg/kg

Тип водоема	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	SO_4^{2-}	Cl^-	PO_4^{3-}
Река (n = 127)	$\frac{8,6}{0,5-75,0}$	$\frac{9,4}{0,1-70,2}$	$\frac{0,9}{0,1-7,5}$	$\frac{623,2}{1,0-6143,7}$	$\frac{77,9}{10,2-3078,8}$	$\frac{1,4}{0,1-8,4}$
Канал (n = 61)	$\frac{11,3}{0,7-131,3}$ 0,7–	$\frac{7,1}{0-48,1}$	$\frac{0,5}{0,03-5,3}$	$\frac{1220,3}{1,0-9382,2}$	$\frac{48,7}{4,9-305,4}$	$\frac{0,8}{0,05-7,1}$
Озеро (n = 21)	$\frac{8,9}{1,0-30,0}$	$\frac{4,8}{1,0-26,8}$	$\frac{0,6}{0,1-3,0}$	$\frac{214,5}{2,0-1462,9}$	$\frac{35,9}{10,0-165,6}$	$\frac{1,0}{0,1-3,6}$
Пруд (n = 11)	$\frac{5,7}{1,0-8,8}$	$\frac{9,6}{1,5-23,9}$	$\frac{0,8}{0,07-1,8}$	$\frac{180,3}{1,0-703,7}$	$\frac{30,9}{14,7-50,9}$	$\frac{0,9}{0,2-2,4}$
Водохранилище (n = 11)	$\frac{4,6}{0,7-10,0}$	$\frac{7,6}{3,5-20,4}$	$\frac{0,2}{0,07-0,3}$	$\frac{71,0}{2,1-275,7}$	$\frac{23,0}{10,2-35,1}$	$\frac{1,3}{0,05-2,9}$

Примечание. В числителе – средние содержания, в знаменателе – пределы концентраций.

Фосфаты. Концентрация фосфатов варьирует от 0,05 до 8,40 мг/кг. Наиболее часто встречаемые концентрации в донных отложениях в пределах 0,55–0,8 мг/кг, что значительно ниже чем в почвах.

Самые низкие содержания PO_4^{3-} в донных отложениях чаще всего приурочены к зонам формирования торфяников – менее 0,1 мг/кг, самые высокие – к территориям с песчаными, реже супесчаными почвами. Это свидетельствует о внесении чрезмерно высоких доз фосфорных минеральных удобрений на поля и, как следствие, интенсивных процессах зафосфачивания агротехногенных ландшафтов.

Наибольшие содержания фосфатов отмечены в донных отложениях в Столинском районе, р. Моства – 8,4 мг/кг; в Дрогичинском, канал Воловельский – 7,1; в Березовском районе, р. Ясельда – 6,3 мг/кг.

Данные по выборке средних содержаний ингредиентов в донных отложениях основных типов водоемов свидетельствуют, что в среднем кислотно-щелочные условия (рН) варьируют в пределах 6,8 (каналы) – 7,3 (пруды). По средним концентрациям водорастворимых соединений в донных отложениях (табл. 2) видно, что максимальное накопление в них соединений (азота, хлоридов и фосфатов) характерно для рек, сульфаты концентрируются в большей степени в отложениях мелиоративных каналов.

Микроэлементный состав донных отложений (табл. 3) отличается достаточно стабильными показателями их концентрации, коэффициенты вариации менее 100 %, за исключением кобальта. Высокими показателями вариабельности характеризуются редкие и рассеянные элементы, встречаемость которых менее 50 %. Медианные концентрации микроэлементов в большинстве случаев выше средних значений, что связано с ограниченным количеством проб, содержания микроэлементов в которых находятся в поле высоких значений.

Т а б л и ц а 3. Статистические показатели распределения микроэлементов в донных отложениях Брестской области, мг/кг

Table 3. Statistical indicators of trace element distribution in bottom sediments of the Brest region, mg/kg

Наименование ингредиента	Среднее (n = 231)	Ошибка среднего, (±)	Минимум	Максимум	Медиана	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
Ni	9,55	0,57	0,50	30,0	10,00	6,73	70
Co	5,91	0,64	н/опр.	50,00	5,00	7,50	127
V	10,24	0,76	0,50	50,0	8,50	8,93	87
Mn	299,64	15,03	30,0	1000,0	300,00	176,51	59
Ti	876,67	48,7	30,00	2000,0	1000,0	572,13	65
Cr	25,60	1,65	н/опр.	100,0	20,00	19,38	76
Pb	9,55	0,46	0,50	50,0	10,00	5,40	56
Mo	0,53	0,02	0,50	3,0	0,50	0,22	42
Zr	137,00	7,72	0,50	300,0	150,00	90,65	66
Nb	4,78	0,22	н/опр.	10,0	5,00	2,54	53
Cu	7,36	0,39	1,00	30,0	7,00	4,59	62
Zn	23,19	1,14	н/опр.	70,0	15,00	13,36	58
Ge	0,0036	0,0036	н/опр.	0,50	0	0,04	175
La	3,01	0,75	н/опр.	50,0	0	8,85	294
Ba	207,62	13,56	н/опр.	3000,0	0	438,59	211
P	614,49	71,18	н/опр.	5000,0	500,00	600,19	98
Li	3,62	0,58	н/опр.	30,0	0,50	4,55	126
Sr	33,95	2,78	0,50	200,0	0,50	43,85	129
B	7,33	0,41	1,50	20,0	7,00	3,56	49

Примечание. н/опр. – концентрация ниже чувствительности метода исследований.

Полученные данные по содержанию нормируемых элементов (Ni, Co, V, Mn, Cr, Pb, Zn, Cu) в донных отложениях Брестской области показали, что приоритетными загрязнителями являются кобальт, концентрации которого превышают гигиенические нормы для почв [12, 13] в 3,6 %, никеля – 2,9 %, цинка – 2,2 % от общего количества образцов.

Средние содержания и разброс концентраций микроэлементов в донных отложениях основных типов водоемов приведены в табл. 4. В соответствии с величиной коэффициентов суммарного накопления микроэлементов (R_7 – Ni, Co, V, Cr, Pb, Cu, Zn) для донных отложений составлен ряд водных объектов в порядке убывания величины этого коэффициента (мг/кг): реки (132,1) – каналы (102,9) – пруды (98,6) – водохранилища (89) – озера (77,6).

Т а б л и ц а 4. Средние концентрации микроэлементов в донных отложениях основных типов водоемов Брестской области, мг/кг

Table 4. Average concentrations of trace elements in bottom sediments of the main types of water bodies in the Brest region, mg/kg

Тип водного объекта	Ni	Co	V	Mn	Cr	Pb	Cu	Zn
Река (n = 127)	<u>13,8</u> 0,7–70	<u>8,6</u> 0–50	<u>22,1</u> 1–70	<u>377,6</u> 100–5000	<u>30,3</u> 0,7–200	<u>13,7</u> 1–50	<u>11,3</u> 2–30	<u>32,3</u> 0–200
Канал (n = 61)	<u>11,2</u> 1–20	<u>6,9</u> 0,5–50	<u>13,0</u> 2–50	<u>291,4</u> 100–1000	<u>27,3</u> 7–70	<u>12,1</u> 0,7–50	<u>9,9</u> 2–20	<u>23,5</u> 0–50

Продолжение табл. 4

Тип водного объекта	Ni	Co	V	Mn	Cr	Pb	Cu	Zn
Озеро (n = 21)	$\frac{8,2}{0,7-70}$	$\frac{3,7}{0-30}$	$\frac{12,6}{0,7-50}$	$\frac{225,0}{30-500}$	$\frac{20,1}{0-100}$	$\frac{8,7}{0,7-30}$	$\frac{6,7}{1-20}$	$\frac{17,6}{0-30}$
Пруд (n = 11)	$\frac{9,3}{1-20}$	$\frac{6,2}{0,5-20}$	$\frac{13,4}{1-30}$	$\frac{175,0}{100-300}$	$\frac{29,4}{10-70}$	$\frac{14,0}{2-30}$	$\frac{9,4}{3-15}$	$\frac{16,9}{0-30}$
Водохранилище (n = 11)	$\frac{7,2}{1-15}$	$\frac{1,4}{0,7-5}$	$\frac{9,0}{3-30}$	$\frac{190,9}{100-300}$	$\frac{18,4}{7-50}$	$\frac{14,3}{7-30}$	$\frac{9,8}{3-15}$	$\frac{29,5 \pm 2,3}{22-50}$

Примечание. В числителе – средние содержания, в знаменателе – пределы концентраций.

Максимальные средние концентрации никеля, кобальта, ванадия, хрома, меди, цинка и марганца установлены в донных отложениях рек. Марганец и медь отличаются существенным количеством сорбционно-карбонатных (легкоподвижных) и органоминеральных (умеренно подвижных) соединений, что может быть следствием формирования карбонатов и свежих оксидных пленок в результате окисления 2-х и 3-х валентного марганца под защитой органических комплексов. Никель и хром отличаются достаточно тесной корреляцией с карбонатами и легкорастворимыми органическими хелатами, а геохимическое поведение Co в речной среде очень схоже с поведением марганца [14]. Максимальное содержание свинца характерно для донных отложений прудов.

В целом можно отметить, что накопление микроэлементов в донных отложениях во многом определяется их гранулометрическим составом, количеством органического вещества и его составом.

Органические соединения в донных отложениях. Концентрации нефтепродуктов, СПАВ и фенолов в донных отложениях изменяются в широких пределах (табл. 5). Превышение ПДК нефтепродуктов выявлено в 12,3 % от общего количества проб.

Таблица 5. Содержание нефтепродуктов, СПАВ и фенолов в донных отложениях водоемов Брестской области, мг/кг

Table 5. Content of petroleum products, synthetic surfactants and phenols in bottom sediments of water bodies of the Brest region, mg/kg

Ингредиент	Среднее (n = 231)	Ошибка среднего (\pm)	Минимум	Максимум	Медиана	Встречаемость, %
Нефтепродукты	45,92	11,52	0,19	1268,78	4,97	70,3
СПАВ	0,008	0,0008	<0,025	0,126	0,01	56,5
Фенолы	0,0003	0,00004	<0,0001	0,0030	0,0002	10,9

Присутствие СПАВ в донных отложениях определено в 56,5 % от общего количества проб. Наиболее часто встречается концентрация менее 0,025 мг/л. Самая высокая концентрация СПАВ определена в донных отложениях р. Стырь в Пинском районе – 0,346 мг/л. Содержание фенолов в донных отложениях зафиксировано в 10,9 % проб, их содержание не превышает 0,003 мг/кг.

Различия в содержании химических веществ в донных отложениях водоемов обусловлены как антропогенными, так и естественными причинами – различиями в гранулометрическом составе и содержании органического вещества. Полученные данные были сгруппированы в соответствии с гранулометрическим составом осадков: пески, суглинки и глины, ил. Установлено, что концентрации водорастворимых соединений варьируют в широких пределах, высоких коэффициентов корреляции их концентраций от состава донных отложений не выявлено, что можно объяснить интенсивностью процессов вымывания легкоподвижных водорастворимых соединений потоками воды. Исключение составляет содержание фосфатов, максимальная средняя концентрация которых отмечена в песчаных отложениях. Для них характерны и наименьшие значения

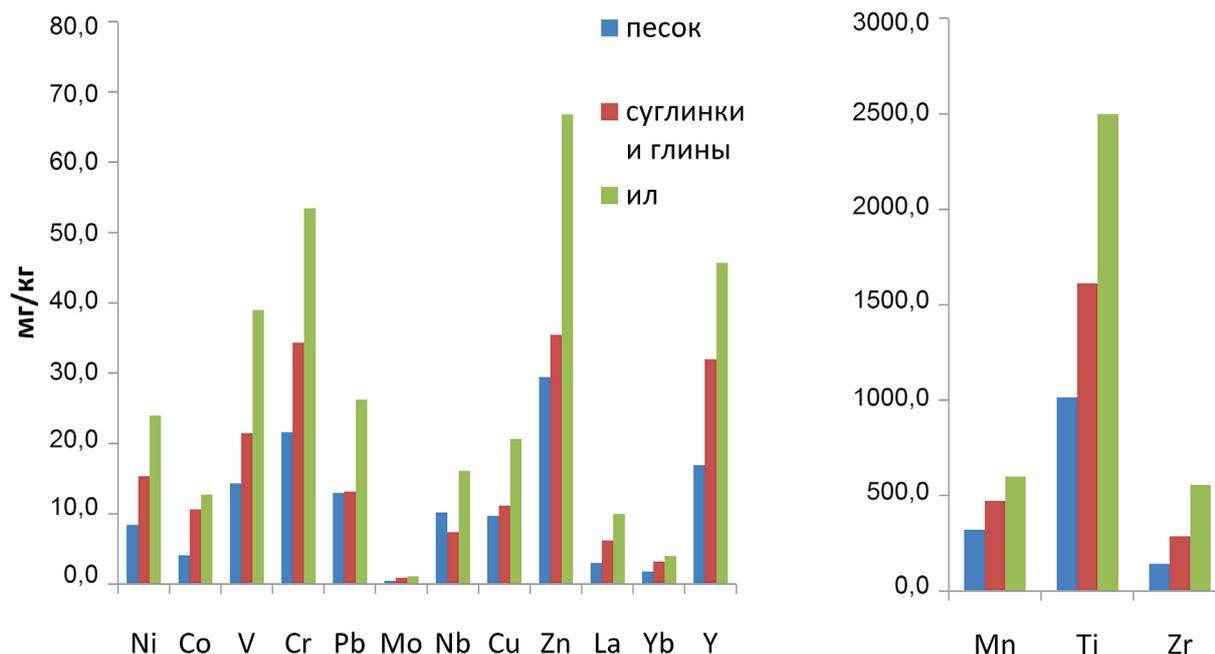


Рис. 1. Содержание микроэлементов в донных отложениях различного гранулометрического состава

Fig. 1. The content of trace elements in bottom sediments of different granulometric size composition

коэффициента вариации фосфатов – 98 %. Это связано с зафосфачиванием легких почв при проведении агромерелиоративных мероприятий и частичным выносом из них фосфатов с поверхностными водами.

Содержание микроэлементов в донных отложениях четко коррелируется с их гранулометрическим составом. Максимальные концентрации микроэлементов отмечены в илистых отложениях, минимальные – в песчаных (рис. 1). Коэффициенты вариации содержаний микроэлементов в песчаных и суглинистых отложениях имеют небольшие отличия, а илистые отложения характеризуются коэффициентами вариаций элементов в разы меньшими.

На основании проведенного анализа и обобщения полученных данных было выполнено построение геохимических карт масштаба 1:200000: загрязнения донных отложений водорастворимыми соединениями (нитраты, нитриты, аммоний, сульфаты, хлориды) и с учетом комплексного показателя антропогенного загрязнения (суммарный показатель загрязнения донных отложений тяжелыми металлами Z_c) [15].

На рис. 2 представлен генерализованный фрагмент карты загрязнения химическими веществами донных отложений в точках опробования, содержащий информацию о суммарном загрязнении донных отложений тяжелыми металлами по коэффициенту загрязнения (Z_c), превышении ПДК/ОДК тяжелых металлов, нефтепродуктов, сульфатов и хлоридов, а также присутствие в донных отложениях фенолов.

При расчете суммарного показателя загрязнения для каждого образца донных отложений подбирались фоновые концентрации в соответствии с геохимическими особенностями литологического состава отложений и почвенного покрова территории в точке опробования.

Полученные результаты химических анализов показали, что значения суммарного показателя загрязнения донных отложений Брестской области по восьми нормируемым элементам (Ni, Co, Mn, Cr, Pb, Cu, Zn, V) варьируют в пределах от менее единицы до 24,6. Согласно оценочной шкале опасности загрязнения, по суммарному показателю практически все исследуемые отложения относятся к категории допустимого загрязнения тяжелыми металлами ($Z_c < 16$) и только 3,0 % попадает в категорию опасного уровня загрязнения ($Z_c > 16$) (табл. 6).

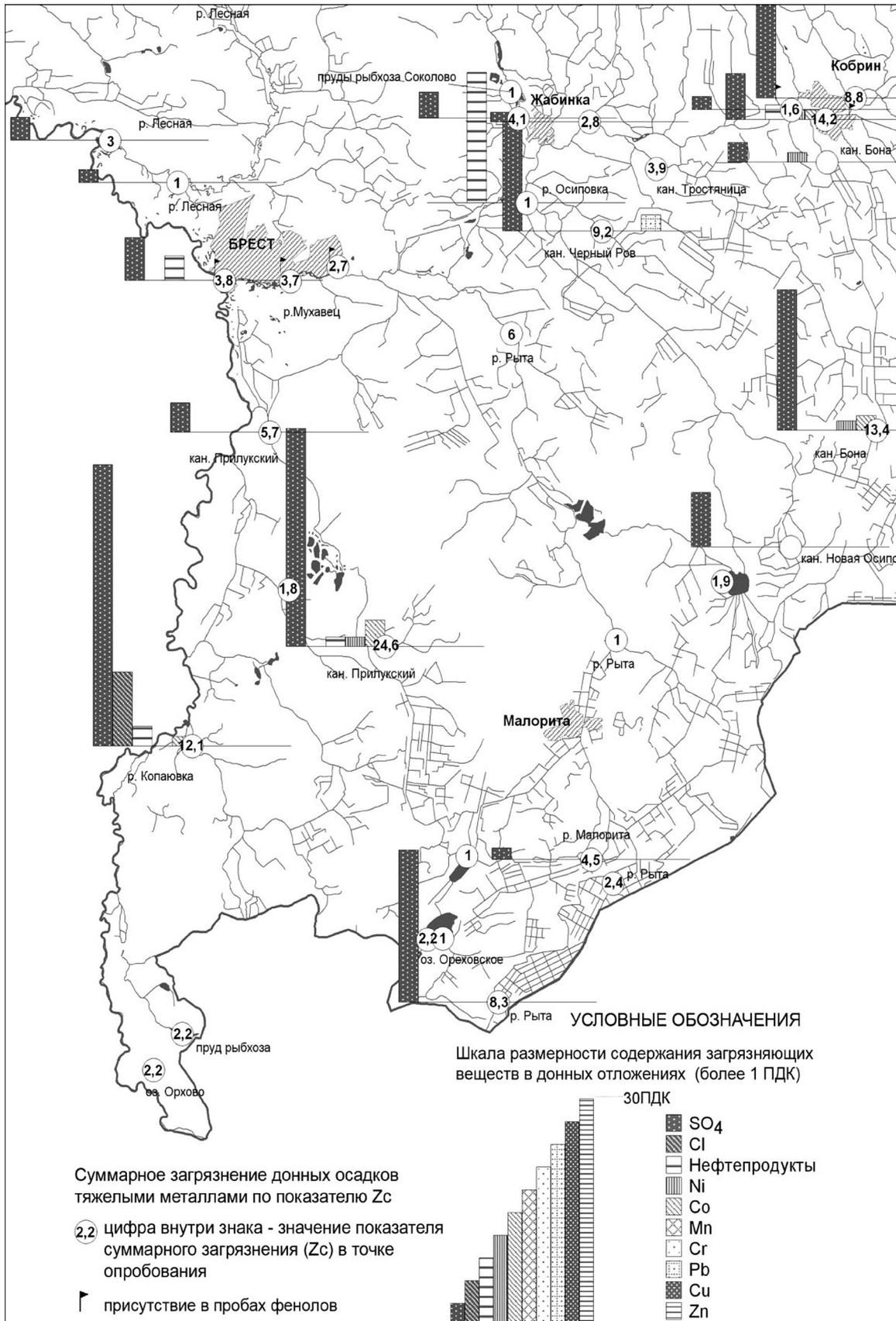


Рис. 2. Фрагмент карты загрязнения химическими веществами донных отложений на территории Брестской области (уменьшено, масштаб оригинала 1:200000)

Fig. 2. Fragment of a pollution map of Brest region bottom sediments with chemicals (reduced, original scale 1:200000)

Таблица 6. Уровень загрязнения донных отложений Брестской области тяжелыми металлами
Table 6. The level of contamination of Brest region bottom sediments with heavy metals

Уровень загрязнения донных отложений тяжелыми металлами	Количество проб	Процент от общего количества
Фактически незагрязненные донные отложения	120	51,9
Слабо загрязненные	68	29,5
Средний уровень загрязнения	27	11,7
Умеренно опасный уровень загрязнения	9	3,9
Опасный уровень загрязнения	7	3,0

На геохимический состав донных отложений, степень их загрязнения оказывают влияние как агротехногенез, так и промышленные производства. В первом случае загрязнение донных отложений проявляется в повышенных концентрациях прежде всего нитратов, хлоридов, сульфатов и реже микроэлементов. Большое влияние на формирование геохимии донных отложений оказывают урбанизация и промышленность, за счет поверхностного стока с территории городов. Отобранные образцы в пределах городской черты, выше и ниже по течению реки, позволяют выявить тенденцию в накоплении специфически городских ассоциаций элементов в донных отложениях. Абсолютные содержания химических веществ в этих отложениях приведены в табл. 7 и 8.

Таблица 7. Содержание химических веществ в донных отложениях рек (выше и ниже по течению от городов) в Брестской области, мг/кг

Table 7. Content of chemicals in the bottom sediments of the rivers (upstream and downstream from cities) in the Brest region, mg/kg

Место отбора проб	pH	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	Нефтепродукты	Фенолы	СПАВ
Брестский р-н, д. Ямно, р. Мухавец, в 0,5 км выше г. Бреста	7,2	6,30	6,20	1,80	24,70	30,50	0,37	2,32	0,002	0,025
Брестский р-н, г. Брест, р. Мухавец при слиянии с р. Западный Буг, Брестская крепость	7,5	15,00	6,60	1,00	650,20	61,10	0,28	120,64	0,005	0,025
Пинский р-н, г. Пинск, р. Пина до слияния с р. Припятью	7,8	3,50	5,00	0,07	45,27	59,65	0,40	2,55	0,003	0,025
Пинский р-н, г. Пинск, р. Пина, в 0,5 км ниже г. Пинска	7,3	10,50	6,50	0,07	283,94	44,74	0,10	120,58	0,01	0,025
Ляховичский р-н, д. Станчаки, р. Ведьма, в 0,3 км выше г. Ляховичи	7,64	6,30	35,50	5,30	53,50	73,54	2,70	96,48	0,00	0,025
Ляховичский р-н, г. Ляховичи, р. Ведьма, в 0,7 км ниже г. Ляховичи	7,04	5,00	1,00	0,80	637,83	166,69	2,40	249,32	0,00	0,045

Сравнительный анализ отношений концентраций определяемых ингредиентов, отобранных ниже городов по течению рек, по сравнению к концентрациям в донных отложениях, отобранных выше по течению рек, свидетельствует, что в донных отложениях рек во всех рассмотренных случаях отмечается отчетливая тенденция превышения содержаний в отложениях, отобранных ниже городов, свинца в 1,4–4,0 раза, цинка – 1,4–3,3, аммонийного азота – 1,8–3,0, сульфатов – до 142, нефтепродуктов – 2,6–52,0, фенолов – до 4 раз.

Таблица 8. Содержание микроэлементов в донных отложениях рек (выше и ниже по течению от городов) в Брестской области, мг/кг

Table 8. Content of trace elements in the bottom sediments of rivers (upstream and downstream from cities) in the Brest region, mg/kg

Место отбора проб	Ni	Co	V	Mn	Ti	Cr	Pb	Li	Zr	Nb	Cu	Zn	Yb	Y	Ga	B
Брестский р-н, д. Ямно, р. Мухавец, в 0,5 км выше г. Бреста	10	7,5	5	100	1000	30	7	10	10	7	10	22	0,75	7	5	3
Брестский р-н, г. Брест, р. Мухавец при слиянии с р. Западный Буг, Брестская крепость	10	7,5	10	200	500	20	10	10	30	3	7	30	0,75	7	5	5
Пинский р-н, г. Пинск, р. Пина до слияния с р. Припятью	15	10	50	500	3000	30	10	10	1000	10	10	30	0,75	10	7	30
Пинский р-н, г. Пинск, р. Пина, в 0,5 км ниже г. Пинска	20	15	50	700	3000	50	20	10	1500	10	20	100	1	20	7	30
Ляховичский р-н, д. Станчаки, р. Ведьма, в 0,3 км выше г. Ляховичи	15	10	70	700	2000	50	15	7	1500	10	15	30	2	30	7	30
Ляховичский р-н, г. Ляховичи, р. Ведьма, в 0,7 км ниже г. Ляховичи	20	3	50	1500	2000	50	50	10	700	10	15	100	1	20	7	40

Приведенные материалы показали, что геохимическое состояние донных отложений (по содержанию в них тяжелых металлов) находится в удовлетворительном состоянии, степень загрязненности тяжелыми металлами оценивается в большинстве случаев как допустимая. При этом отмечается высокая корреляционная связь химического состава донных отложений и почвенного покрова. В местах с высоким уровнем загрязнения почв выявлены и значительные коэффициенты загрязнения донных отложений, ассоциативный ряд накапливающихся элементов в большинстве случаев аналогичный.

Заключение. Таким образом, установлено, что донные отложения, являясь продуктом как аллювиального литогенеза, так и сноса химических элементов в растворенном и взвешенном состоянии с прилегающих территорий, выступают как геохимический барьер, на котором концентрируются ассоциации тех же элементов, что и в почвенном покрове. При этом концентрации микроэлементов в донных отложениях в большинстве случаев ниже, чем в почвенном покрове (за счет их вымывания водными потоками). Согласно оценочной шкале опасности загрязнения, по суммарному показателю практически все исследуемые отложения относятся к категории допустимого загрязнения тяжелыми металлами ($Z_c < 16$) и только 3,0 % попадают в категорию опасного уровня загрязнения ($Z_c > 16$).

Самые низкие содержания соединений фосфора в донных отложениях водоемов чаще всего приурочены к зоне формирования торфяников, наиболее высокие – к территориям с песчаными, реже супесчаными почвами. Все это свидетельствует о внесении чрезмерно высоких доз фосфорных минеральных удобрений на поля и, как следствие, интенсивных процессах зафосфачивания компонентов агротехногенных ландшафтов. Характерная черта геохимии донных отложений – высокие концентрации сульфатов, превышающие во много раз их содержания в компонентах окружающего ландшафта. Результаты геохимических исследований позволили построить карту загрязнения химическими веществами донных отложений Брестской области в масштабе 1:200 000.

Выполненные сотрудниками Института природопользования НАН Беларуси геохимические исследования в Брестской области имеют важное социальное значение, поскольку являются ос-

новой для разработки и принятия управленческих решений по снижению антропогенной химической нагрузки на компоненты ландшафтов. Это позволило бы обеспечивать соблюдение нормативных требований, а также снизить риск негативного химического воздействия на население.

Список использованных источников

1. Польшов, Б. Б. Учение о ландшафтах / Б. Б. Польшов. – М.: АН СССР, 1956. – 234 с.
2. Дмитриев, Е. А. Почва и почвоподобные тела / Е. А. Дмитриев // Почвоведение. – 1996. – № 3. – С. 310–319.
3. Воробьев, С. А. Оценка состава почв по данным опробования донных отложений водотоков / С. А. Воробьев // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М. А. Глазовской). Докл. Всерос. науч. конф., Москва, 4–6 апреля 2012 г. / Географический факультет МГУ. – М., 2012. – С. 79–81.
4. Cannon, W. Some statistical relationships between stream sediment and soil geochemistry in northwestern Wisconsin – can stream sediment compositions be used to predict compositions of soils in glaciated terranes. / W. Cannon, L. Woodruff, S. Pimley // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2004. – Vol. 81, N 1–3. – P. 29–46. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00211-5](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00211-5)
5. Янин, Е. П. Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города (формирование, состав, геохимические особенности) / Е. П. Янин. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 100 с.
6. Кузнецов, В. А. Геохимия аллювиального литогенеза / В. А. Кузнецов. – Минск: Наука и техника, 1973. – 280 с.
7. Лазаренко, А. А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны и Оки) / А. А. Лазаренко. – М.: Наука, 1964. – 236 с.
8. Лукашев, О. В. Оценка техногенного загрязнения донных отложений Осиповичского водохранилища металлами / О. В. Лукашев // Природные ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 74–79.
9. Рябова, Л. Н. Геохимическая характеристика почвенного покрова Припятского Полесья в Брестской области / Л. Н. Рябова, И. А. Залыгина // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2015. – № 3. – С. 101–112.
10. Рябова, Л. Н. Комплексные эколого-геохимические исследования природно-техногенных систем в Беларуси / Л. Н. Рябова, И. А. Залыгина // Семнадцатые Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М., 2015. – С. 433–437.
11. Жуховицкая, А. Л. Геохимия озер Беларуси / А. Л. Жуховицкая, В. А. Генералова. – Минск, Наука и техника, 1991. – 202 с.
12. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы 2.1.7.12-1.-2004: утв. Постановлением главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 16.10.2004 // Сб. нормативных документов по разделу коммунальной гигиены. – Минск, 2005. – С. 25–45.
13. Гигиеническая оценка почвы населенных мест: инструкция 2.1.7.11-12-5-2004: утв. Постановлением главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 03.03.2004 // Сб. нормативных документов по гигиенической оценке почвы населенных мест. – Минск, 2004. – С. 2–38.
14. Мур, Дж., Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния: пер. с англ. / Дж Мур, С. Рамурти. – М.: Мир, 1987. – 288 с.
15. Саэт, Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

References

1. Polynov B. B. The doctrine of the landscapes. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1956. 234 p. (in Russian).
2. Dmitriev E. A. Soil and soil-like bodies. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 1996, no 3, pp. 310–319 (in Russian).
3. Vorob'ev S. A. Assessment of soil composition according to the bottom sediment testing of watercourses. *Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv (k 100-letiyu M. A. Glazovskoi). Dokl. Vseros. nauch. konf., Moskva, 4–6 aprelya 2012 g.* [Geochemistry of landscapes and geography of soils (to the 100th anniversary of M. A. Glazovskaya). Reports of the all-Russian scientific conference]. Moscow, 2012, pp. 79–81 (in Russian).
4. Cannon W., Woodruff L., Pimley S. Some statistical relationships between stream sediment and soil geochemistry in northwestern Wisconsin – can stream sediment compositions be used to predict compositions of soils in glaciated terranes. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, vol. 81, no. 1–3, pp. 29–46. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00211-5](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00211-5)
5. Yanin, E. P. *Technogenic river silts in the zone of industrial city influence (formation, composition, geochemical features)*. Moscow, Institute of mineralogy, geochemistry and crystal chemistry of rare elements, 2002. 100 p. (in Russian).
6. Kuznetsov V. A. *Geochemistry of alluvial lithogenesis*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1973. 280 p. (in Russian).
7. Lazarenko A. A. *Lithology of alluvium of plain rivers of humid zone (on the example of Dnieper, Desna and Oka)*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 236 p. (in Russian).
8. Lukashev O. V. Estimation of technogenic pollution of bottom sediments of Osipovichi reservoir by metals. *Prirodnyie resursyi = Natural Resources*, 2007, no 3, pp. 74–79 (in Russian).
9. Ryabova L. N., Zalygina I. A. Geochemical characteristics of the soil cover of Pripyat Polesie in the Brest region. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 2015, no 3, pp. 101–112 (in Russian).

10. Ryabova L. N., Zalygina I. A. Complex ecological and geochemical studies of natural and man-made systems in Belarus. *Semnadtsatye Sergeevskie chteniya. Inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie problemy gorodskikh aglomeratsii: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii* [Seventeenth Sergeev Readings. Engineering-geological and geoecological problems of urban agglomerations. Materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geocology, engineering geology and hydrogeology]. Moscow, 2015, pp. 433–437 (in Russian).

11. Zhukhovitskaya A. L., Generalova V. A. *Geochemistry of the lakes of Belarus*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1991. 202 p. (in Russian).

12. The list of maximum permissible concentrations (MPC) and approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil: hygienic standards 2.1.7.12-1.-2004: Resolution of the chief state sanitary doctor of the Republic of Belarus 16.10.2004. *Collection of normative documents on the section of communal hygiene*. Minsk, 2005, pp. 22–45

13. Hygienical estimation of soil of the inhabited places: instruction 2.1.7.11-12-5-2004: Resolution of the main state health-officer of Republic of Belarus 03.03.2004. *Collection of normative documents by hygienical estimation of soil of the inhabited places*. Minsk, 2004, pp. 2–38 (in Russian).

14. Moore J., Ramamoorthy S. *Heavy Metals in Natural Waters. Applied Monitoring and Impact Assessment*. New York, Berlin: Springer-Verlag, 1983. 288 p.

15. Saet, Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. *Geochemistry of the environment*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (in Russian).

Информация об авторах

Рябова Лариса Николаевна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, Институт природопользования, Национальная академия наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ryabova@ecology.basnet.by

Залыгина Ирэн Анатольевна – науч. сотрудник, Институт природопользования, Национальная академия наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zz345@mail.ru

Information about authors

Larisa N. Ryabova – Ph. D. (Geology), Senior Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ryabova@ecology.basnet.by

Irene A. Zalygina – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zz345@mail.ru