

Проведённые исследования свидетельствуют, что наилучшими индикаторами являются погружённые растения. В водных объектах в меньшей степени подверженных загрязнению содержание поллютантов в макрофитах находится на уровне фоновых величин или незначительно их превышает. Растительность на участках, испытывающих интенсивное антропогенное воздействие и загрязнение, накапливает элементы в концентрациях, превышающих фоновые величины в десятки раз. Особенно высокими коэффициентами концентрации характеризуются Ti, Zn, Cu и Pb, содержание которых многократно превышает фоновые значения для территории Беларуси, наименьшими – Ni, V и Cr. По величине индекса содержания металлов в растениях заметно выделяется КУ Королищевичи р. Свислочь. Те же закономерности прослеживаются и в содержании металлов в донных отложениях. Специфика такого распределения кроется в особенностях водосборов рек и наличия источников поступления металлов, связанных главным образом с воздействием локальных техногенных источников. Расположение наиболее загрязнённых участков свидетельствует о техногенных изменениях, вызванных влиянием крупных городов, и необходимости реабилитации данных водных объектов.

Библиографические ссылки

1. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжёлые металлы в природных водах. М. : Мир, 1987.
2. Власов Б. П., Грищенко Н. Д. Содержание тяжёлых металлов в водных растениях водоёмов и водотоков Беларуси по данным мониторинга // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. 2011. № 3. С. 117–121.
3. Власов Б. П., Грищенко Н. Д., Рудаковский И. А., Ковальчик Н. В., Жуковская Н. В. Мониторинг водной растительности // Мониторинг раст. мира в Республике Беларусь: результаты и перспективы / Под общ. ред. А. В. Пугачевского, А. В. Судника. Минск : Беларус. навука, 2019. С. 71–99.
4. Жуковская Н. В., Власов Б. П., Ковальчик Н. В. Содержание тяжёлых металлов в высшей водной растительности водоёмов и водотоков Беларуси: пространственные и видовые особенности // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2019. № 1. С. 22–34.
5. Власов Б. П., Жуковская Н. В., Ковальчик Н. В. Содержание микроэлементов в донных отложениях водоёмов и водотоков Беларуси по данным мониторинга // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 2. С. 152–162.
6. Vlasov B., Gigevich G. Estimation of pollution of lakes of Belarus under the contents of heavy metals in water plants and bottom sediments // Limnological rev. 2006. Vol. 6. P.289–294.

УДК 550.42:504.61(476)

СОПРЯЖЁННОЕ ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ГИДРОБИОНТОВ ОСИПОВИЧСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (МЕТОДИЧЕСКИЙ АСПЕКТ)

О. В. Лукашёв, Д. Л. Творонович-Севрук, Н. Г. Лукашёва

Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Республика Беларусь; lukashev@bsu.by

На основе многолетних исследований дана оценка техногенного загрязнения Осиповичского водохранилища химическими элементами-металлам.

Ключевые слова: донные отложения; гидробионты; металлы; водохранилище.

Осиповичское водохранилище (далее ОсВ) – один из относительно крупных искусственных водоёмов Беларуси (табл. 1, приведены водоёмы с площадью >1,0 км²), создано в 1953 г. в Осиповичском р-не Могилёвской обл. в результате подпора плотиной Осиповичской ГЭС вод р. Свислочь на расстоянии 43,6 км от её впадения в р. Березину. Площадь водохранили-

ща – 11,87 км², длина – 23,7 км, ширина на среднем участке – 200–300 м, на нижнем – 800–1 200 м. Максимальная глубина водоёма – 8,5 м, средняя – 1,5 м. Полный объём водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ), равном 149,50 м – 17,50 млн м³ [1–3].

Таблица 1 – Основные характеристики водохранилищ Беларуси (при НПУ) [3]

Водный объект/бассейн *	Водохранилище	F, км ²	W*, млн м ³
р. Друйка/Западная Двина	Браславское	104,3	584,7/104,3
р. Виля/Нёман	Вилейское	77,0	260/235
кан. Дегтярёвка/Западная Двина	Освейское**	52,8	104/60
р. Дрысвята/Западная Двина	«Дружба народов»	44,50	313/27,4
оз. Лукомское/Западная Двина	Лукомской ГРЭС	36,7	243/26,8
р. Вята/Западная Двина	Хоробровка	31,97	128,7/27,7
р. Свислочь/Днепр	Заславльское	26,86	103/50
р. Юнга/Западная Двина	Селявское	24,5	61/3,2
р. Морочь/Припять	Краснослободское	23,65	69,5/50
р. Друть/Днепр	Чигиринское	23,4	62,6/11,9
р. Туровлянка/Западная Двина	Гомельское**	23,24	98,4/11,3
р. Случь/Припять	Солигорское	23,10	55,9/38
р. Оресса/Припять	Любанское	22,05	39,5/32,5
р. Ясельда/Припять	Селец	20,7	56,3/41,5
р. Жегулянка/Припять	Берёза-1	18,68	33,3/14,5
р. Оболь/Западная Двина	Езерищенское	17,08	65,4/11,95
р. Бобрик, оз. Погостское/Припять	Погост	16,16	54,5/44,8
р. Лань/Припять	Локтыши	15,90	50,2/30
р. Зельвянка/Нёман	Зельвенское	11,90	28/17,6
р. Свислочь/Днепр	Осиповичское	11,87	17,5/5,7
р. Улла/Западная Двина	Лепельское	10,24	74,7/20
р. Днепр/Днепр	Днепробрагинское	9,68	42,8/3,14
р. Цна, кан. Стрижевский/Припять	Велута	7,60	31/23,8
р. Рита, оз. Луково/Западный Буг	Луковское	5,40	23,2/13,9
р. Щара/Нёман	Миничи	5,40	7,5/6,0
р. Волма/Днепр	Петровичское	4,80	15/11
р. Друть/Днепр	Тетеринское	4,61	13,8/3,9
р. Птичь/Припять	Левки	4,40	23,6/16
р. Рудея/Днепр	Рудея	3,85	8,4/4,1
р. Случь/Припять	Рудня	3,76	14,1/8,8
р. Усяжа/Днепр	Дубровское	3,45	22,4/19
кан. из Вилейско-Минской вс/Днепр	Резервное	3,45	21,6/15
р. Лоша/Нёман	Лошанское	3,45	5,4/3,9
р. Переволока/Западный Буг	Беловежская Пуца	3,32	2,1/1,1
р. Ясельда/Припять	Корнадское	3,18	6,2/5,1
р. Темра/Припять	Либерполь	2,92	4,2/3,1
кан. Витчинский, р. Лань/Припять	Собельское	2,87	14,2/13,6
р. Дрысвята/Западная Двина	«Путь к коммунизму»	2,82	14,5/0,4
р. Свислочь/Днепр	Чижовское	2,80	5,6/ –
р. Вить, кан. Великоборский/Припять	Великоборское	2,70	8,9/6,9
р. Уборть/Припять	Свидное	2,16	5,7/4,6
р. Свислочь/Днепр	Дрозды	2,09	5,8/3,6
р. Двиноса/Нёман	Плещеницкое	2,04	5,4/4,1
р. Джидинье/Припять	Джидинье	2,01	7/4,3
р. Бобрик/Припять	Возрождение	1,98	9,4/7
р. Зельвянка/Нёман	Паперня	1,80	2/0,4
р. Средняя Брагинка/Припять	Муровенское	1,72	7,5/6,4
р. Вяча/Днепр	Вяча	1,68	5,1/ –

Водный объект/бассейн *	Водохранилище	F, км ²	W *, млн м ³
р. Добосна/Днепр	Добосна	1,68	1,9/1,4
кан. Днепровско-Нёманский/Припять	Оброво	1,60	7,1/5,9
р. Щара/Нёман	Домановское	1,52	1,8/0,4
р. Ошмянка/Нёман	Рачунское	1,50	2,9/1,2
кан. Ореховский/Западный Буг	Днепробугское	1,47	7,1/5,3
р. Палуж/Днепр	Палужское	1,46	2,8/1,6
р. Млынок/Припять	Княжеборское	1,44	2,3/1,9
р. Ипуть/Днепр	Милославичское	1,43	1,8/0,7
д. Быстрая/Днепр	Горы	1,31	2,3/2,2
р. Березина/Нёман	Саковщинское	1,29	1,5/–
р. Лохозва/Нёман	Гать	1,26	3,2/2,3
р. Щара/Нёман	Чемельнское	1,26	1,8/1,8
р. Нища/Западная Двина	Клястицкое	1,25	2,5/0,6
р. Мытва/Припять	Бобруйковское	1,22	1,8/1
р. Молчадь/Нёман	Гезгальское	1,21	1,2/0,2
р. Россь/Нёман	Волповское	1,18	1,7/0,1
р. Припять, кан. Невельский/Припять	Жидче	1,16	5,1/4,6
р. Черница/Западная Двина	Добромысленское	1,16	2,3/0,5
р. Крапивенка/Днепр	Крапивенка	1,08	3,3/2,9
р. Плисса/Днепр	Смолевичской ГРЭС	1,08	1,8/0,3
р. Клева/Днепр	Гореничское	1,08	1,2/1,2
р. Милянка/Нёман	Репихово	1,07	2,1/1,4
р. Лоша/Нёман	Яновское	1,06	2,3/1,4
р. Несета/Днепр	Ореховка	1,02	2,5/2,1
р. Сервечь/Нёман	Кутовщина	1,01	1,4/0,9
р. Вить/Припять	Судково	1,00	3/2

* – Объём: полный/полезный

** – Зарегулированное озеро

Водохранилище было предназначено для выработки электроэнергии на Осиповичской ГЭС, водообеспечения прудов рыбного хозяйства «Свислочь» (площадь прудов 3,82 км²), Осиповичского картонно-рубероидного завода (1969 г.), регулирования стока нижней части р. Свислочь для лесосплава и др. [1, 3].

Следует отметить, что, согласно существующей классификации [4], все ныне существующие водохранилища Беларуси в подавляющем большинстве должны быть отнесены к «малым» и «очень малым» (табл. 2). Вместе с тем, в рамках Беларуси данный водоём может классифицироваться как «небольшое водохранилище» (при объёме W и площади водного зеркала F, приведённых к НПУ: средние: W – 500–100 млн м³, F – 100–25 км²; небольшие: W – 100–10 млн м³, F – 25–3 км²; малые: W – <10 млн м³, F – <3 км² [3]).

Таблица 2 – Классификация водохранилищ по их размерам [4]

Категория водохранилищ	Площадь водного зеркала, км ²	Полный объём, млн м ³
Исключительно большие	>5 000	50 000
Очень большие	5 000–2 000	50 000–10 000
Большие	2 000–500	10 000–5 000
Средние	500–100	5 000–1 000
Малые	100–20	1 000–100
Очень малые	20–2	100–10
Исключительно малые	<2	<10

По ряду морфологических признаков в пределах Беларуси выделяются три типа водохранилищ: 1) поозёрский; 2) центральных водораздельных возвышенностей и прилегающих равнин; 3) полесский [3]. ОсВ 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.

Место ОсВ в типологической схеме водохранилищ показано в табл. 3 (курсив).

Таблица 3 – Типология водохранилищ [4]

А. Географическое положение				
I. Расположение в широтных зонах				
1. Полярная область	2. Умеренные широты		3. Аридная область	
II. Расположение в высотных зонах				
1. Равнина	2. Плоскогорье	3. Предгорная область	4. Горная область	5. Водораздел
Б. Особенности водных объектов, на которых создаются водохранилища				
I. Величина водных объектов				
1. Малая река (озеро)	2. Средняя река (озеро)		3. Большая река (озеро)	
II. Тип водных объектов				
1. Речные	2. Озёрные	3. Озёрно-речные	4. В естественных отрицательных формах рельефа	5. В искусственных котловинах
III. Особенности режима рек и озёр				
1. Река с весенним половодьем (озеро с весенним наполнением)	2. Река с летним половодьем (озеро с летним наполнением)		3. Река с паводочным режимом (озеро, наполняемое паводочным стоком)	
В. Геоморфологические особенности и очертания в плане				
I. Положение в долинах				
1. Русловое	2. Долинное речное	3. Долинное озёрное	4. В нескольких речных долинах	5. В нескольких озёрных котловинах
II. Форма и конфигурация в плане				
1. Линейно-вытянутое простое	2. Линейно-вытянутое сложное	3. Разветвлённое (древовидное)	4. Округлое простое	5. Округлое сложное
Г. Характер использования стока и особенности эксплуатации				
I. Особенности использования стока				
1. Единичное на естественном притоке с основной реки	2. Единичное на естественном притоке с нескольких рек	3. На естественном притоке, выполняющее функцию регулятора в каскаде (верховое)	4. «Звено» каскада, расположенное ниже водоемов-регуляторов на зарегулированном стоке с основной реки	5. «Звено» каскада на зарегулированном стоке с основной реки при значительном боковом притоке
II. Характер регулирования стока				
1. Суточный	2. Недельный	3. Сезонный (годовой)	4. Многолетний	
III. Особенности реализации плана эксплуатации				
1. С постоянным планом эксплуатации		2. С изменяемым планом эксплуатации		
Д. Характер использования				
1. Комплексное использование		2. Отраслевое использование		

По соотношению морфометрических и гидрологических показателей водохранилища Беларуси подразделяются на пять гидроморфологических типов: 1) малые мелководные; 2) малые и небольшие неглубокие; 3) средние сложные (долинные); 4) среднеглубокие; 5) глубокие (озёрные и озёрно-речные) [3].

Малые мелководные водохранилища (к которым по данной классификации относится ОсВ), 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 органических веществ (ОВ), способствуют быстрому зарастанию ложа и деградации водоёма [3].

Форма и размеры чаши водохранилищ, величина водосбора определяют их регулируемую ёмкость и водообмен. Наименьшие величины полезной удельной (0,2–0,3) и регулирующей (0,001) ёмкости присущи ОсВ (а также Тетеринскому и Чигиринскому водохрани-

лищам), характеризующимся высокими показателями удельного водосбора и условного водообмена (табл. 4).

Средний многолетний баланс ОсВ по данным периодов 1958–1975 гг. и 1976–1980 гг. следующий (%). Приход: поверхностный приток (р. Свислочь, р. Гравка, около 10 мелких водотоков, функционирующих в период сильных дождей и половодья) – 98,8 (99,1), осадки – 1,0 (0,7), аккумуляция – 0,2 (0,2). Расход: испарение – 0,9 (0,7), потребление рыбного хозяйства 0,8 (0,6), поверхностный сток через гидроузел – 94,2 (93,3). Невязка – 4,1 (5,4) [3]. Для водохранилища характерны относительно слабовыраженные фазы уровня режима: зимняя сработка, весеннее наполнение, летне-осенняя сработка. Обеспеченность среднего многолетнего уровня в течение года (63,9 %) и безледоставный период (66,4 %) отличаются незначительно. Уровень большинства водохранилищ суточного, недельно-суточного и сезонного регулирования в значительной степени зависит от режима работы ГЭС. ОсВ является типичным водоёмом такого типа (кривые обеспеченности свидетельствуют о плавном режиме уровня) [3].

Таблица 4 – Гидроморфологические характеристики типичных водохранилищ центральных водораздельных возвышенностей Беларуси [3]

Показатель		Вилейское	Заславское	Осиповичское	Чигиринское	Тетеринское
НПУ, м		159,00	211,10	149,50	142,50	173,50
Глубина сработки уровня, м		6,00	6,00	0,50	0,50	0,50
Объём W, млн м ³	полный	260,0	103,0	17,50	60,00	8,30
	полезный	235,00	99,50	5,80	10,30	2,00
Площадь F, км ²	при НПУ	77,00	26,86	11,90	21,20	4,54
	при УМО	13,00	3,80	9,50	20,20	3,90
Длина L при НПУ, км		26,5	9,2	23,7	17,0	9,8
Ширина B при НПУ, км	средняя	2,9	2,9	0,5	1,2	0,5
	максимальная	3,6	4,5	1,2	2,4	0,8
Глубина h при НПУ, м	средняя	3,4	3,8	1,5	2,8	1,8
	максимальная	15,0	8,0	8,5	8,1	8,8
Удельное затопление, $f_{уд} = F/W$, м ² /м ³		0,30	0,26	0,68	0,35	0,54
Соотношение $k = F_{пелагиаль}/F_{литораль}$		1,8	4,3	0,4	2,0	0,5
Площадь водосбора S, км ²		4 043	596	4 370	3 700	818
Удельный водосбор, $\Delta S = S/F$		52	22	386	175	180
Среднеголетний сток V_0 , млн м ³		975	117	790	800	171
Условный водообмен, $d = V_0/W$		3,7	1,1	45,1	13,1	20,6
Коэффициент регулирования ёмкости, $\beta = W_{полез}/V_0$		0,20	0,85	0,007	0,013	0,012
Год ввода		1975	1956	1953	1960	1955
Вид регулирования		сезон.	сезон.	сут.	сут.	сут.

Гидробиологической особенностью ОсВ является его эвтрофность (величина биомассы зообентоса 50–100 кг/га). Для периода с середины июня по сентябрь характерно массовое развитие синезелёных водорослей («цветение воды»). Фитомасса доминирующих видов макрофитов на стадии стабилизации растительности по данным 1975–1978 гг. составляла (кг сырого вещества/м²): манник водяной – 2,6–8,1, аир обыкновенный – 5,1, тростник австралийский – 1,7–6,8, рогоз широколистный – 3,6–5,9, камыш озёрный – 2,0–6,2, кубышка жёлтая – 0,3–2,5, рдест плавающий – 2,5, рдест блестящий – 0,8, рдест гребенчатый – 0,7, рдест стеблеобъемлющий – 0,9, роголистник погружённый – 4,9 [3]. Всего в составе водной раститель-

ности 52 вида. Водохранилище интенсивно зарастает водокрасом обыкновенным, стрелолистом, элодеей канадской, телорезом, рдестами, кувшинками, ряской и водорослями [5].

Общая минерализация воды ОсВ составляет 330–370 мг/л [5]. Основные элементы многолетнего годового баланса биогенных и органических веществ представлены в табл. 5. Внутригодовое распределение биогенного стока в нижнем бьефе водохранилища в основном такое же, как и на верхнем участке р. Свислочь, но абсолютные величины значительно ниже. Значительное насыщение воды кислородом в летний период создаёт благоприятные условия для развития окислительных процессов. В это время водохранилище аккумулирует 58 % поступающего NH_4 , 52 % $\text{P}_{\text{общ}}$, 63 % $\text{Fe}_{\text{общ}}$, 42 % ОВ [3]. Эколого-геохимические последствия данного явления рассматриваются далее.

Режим ОВ в нижнем бьефе гидроузла ОсВ описывается следующими уравнениями регрессии:

$$\text{BO}_{\text{нб}} = 5,58 + 0,74\text{BO}_{\text{р}}, \quad (1)$$

$$\text{ПО}_{\text{нб}} = 1,90 + 0,75\text{ПО}_{\text{р}}, \quad (2)$$

где $\text{BO}_{\text{нб}}$, $\text{ПО}_{\text{нб}}$ – среднееголетние бихроматная и перманганатная окисляемости в нижнем бьефе водохранилища за расчётный месяц рассматриваемого периода, мг $\text{O}_2/\text{л}$; $\text{BO}_{\text{р}}$, $\text{ПО}_{\text{р}}$ – соответствующие среднееголетние бихроматная и перманганатная окисляемости р. Свислочи, мг $\text{O}_2/\text{л}$. Аналогичная зависимость для внутригодового изменения содержания нитратного азота: $\text{NO}_{3\text{нб}} = 0,14 + 1,22\text{NO}_{3\text{р}}$ [3].

Следует также кратко остановиться на некоторых показателях, характеризующих влияния самого ОсВ на окружающую среду.

Развитие ложа большинства равнинных водохранилищ проходит стадии активного перестроения берегов и ложа (становление), затухания интенсивности перестроений и аккумуляции наносов в глубоководной зоне (стабилизация).

Протяжённость абразионных берегов ($L_{\text{абр}}$) ОсВ при общей длине береговой линии 55,3 км составляет 2,0 км, аккумулятивных ($L_{\text{акк}}$) – 1,8 км, отношение $L_{\text{акк}}/L_{\text{абр}} = 0,9$, что свидетельствует о стабилизации процесса формирования его береговых склонов [3].

Заиление малых водохранилищ Беларуси, как правило, происходит от верховьев к плотине. В связи с наличием в русловой ложбине гидродинамической оси, в верхней её части заиление менее интенсивно. Так, по данным 1980 г. ($n = 48$), средняя мощность донных отложений ОсВ составляла 10,4 см при вариации данных отдельных измерений от 0,03 до 80 см. В верхней части водохранилища средняя мощность отложений на ложе составляла 38,1 см, на русловой части ложа – 0,0 см, в средней части – 11,9 см и 0,0 см, в нижней части – 2,2 см и 20,0 см соответственно. Средняя скорость осадконакопления в водохранилище для расчётного периода 1960–1980 гг. – 0,51 см/год.

Из приведённых данных следует, что по мере продвижения водных масс к плотине и выравнивания скоростей течения в ложе и русловой ложбине, увеличения ветрового волнения на акватории происходит рассеивание материала и уменьшение мощности отложений. Максимальная мощность донных отложений в нижнем приплотинном районе наблюдается в русловой ложбине.

Высокая аккумуляционная способность верхней части водохранилища объясняется укрытостью водоёма, незначительным волнением и, в силу этих обстоятельств, слабо выраженной зоной взмучивания.

Мощность отложений в приплотинной части речных водохранилищ связана с проточностью водоёмов. С увеличением величины условного водообмена мощность отложений уменьшается.

Таблица 5 – Многолетний годовой баланс биогенных и органических веществ в ОсВ, т [3]

Компонент	Поступление	Сток	Аккумуляция	Аккумуляция, %
Год в целом				
N (NH ₄)	3 561	2 481	1 080	30,3
N (NO ₃)	474	666	-192	-40,5
N _{орг}	2 368	2 100	268	11,3
P (PO ₄)	160	75	85	53,1
P _{общ}	461	259	202	43,8
Fe _{общ}	1 078	667	411	38,1
ОВ	21 207	17 155	4 052	19,1
Зима				
N (NH ₄)	990	929	61	6,2
N (NO ₃)	69	87	-18	-26,1
N _{орг}	412	390	22	5,3
P (PO ₄)	38	26	12	31,6
P _{общ}	107	73	34	31,8
Fe _{общ}	260	233	27	10,4
ОВ	3 753	3 148	605	16,1
Весна				
N (NH ₄)	1 167	712	455	39,0
N (NO ₃)	220	318	-98	-44,5
N _{орг}	808	686	122	15,1
P (PO ₄)	47	23	24	51,1
P _{общ}	154	93	61	39,6
Fe _{общ}	307	255	52	16,9
ОВ	7 284	6 931	353	4,8
Лето				
N (NH ₄)	646	273	373	57,7
N (NO ₃)	108	119	-11	-10,2
N _{орг}	561	498	63	11,2
P (PO ₄)	32	10	22	68,8
P _{общ}	101	49	52	51,5
Fe _{общ}	217	80	137	63,1
ОВ	5 819	3 375	2 444	42,0
Осень				
N (NH ₄)	758	567	191	25,2
N (NO ₃)	77	142	-65	-84,4
N _{орг}	487	426	61	12,5
P (PO ₄)	44	16	28	63,6
P _{общ}	99	44	55	55,6
Fe _{общ}	214	99	115	53,7
ОВ	4 381	3 702	679	15,5

На 1980 г. (27 лет существования водохранилища) общий объём заиления составил 1,23 млн м³, средняя скорость осадконакопления – 0,0456 млн м³/год. Отсюда следует, что при полном объёме ОсВ 17,5 млн м³ период его полного заиления составляет 384 лет (к 2337 г.) [3].

Таким образом, к настоящему времени ОсВ прошло следующие две стадии своего эволюционного развития: (1) стадию возникновения новых ландшафтов, частично наследующих доминантные признаки от прежней природной обстановки (завершение стадии – пространственное расселение высшей водной растительности и формирование устойчивой структуры грунтовых комплексов – относится к концу 1970-х гг.); и (2) стадию окончательного формирования водохранилища – отработки отмелей, устойчивого закрепления мелководий высшей водной растительностью, стабильного видового состава, большой продуктивности фитоцено-

зов, чёткой выраженности геоботанических участков и поясности растительных формаций (стадия завершена или близка к завершению). Впереди у водохранилища (3) озеровидная и (4) болотная стадии [3].

При проектировании ОсВ рассматривались варианты многолетнего, сезонного и недельного регулирования стока. Для осуществления многолетнего регулирования стока при условии равномерного потребления воды турбинами ГЭС потребовалось бы создание полезной ёмкости водохранилища объёмом 196 млн м³. По этой причине окончательно был принят вариант суточного регулирования. В структуре затопленных площадей на пашню (озимая рожь) приходилось 6 %, сенокосы и выпасы – 50 %, болота – 18 %, мелколесье и кустарники – 26 % [3].

Условно-подвижные формы нахождения элементов (далее УПФ) (табл. 6, рис. 1–9). В связи с уникальным положением ОсВ (на относительно небольшой реке, принимающей стоки г. Минска), О. В. Лукашёвым с сотрудниками в различные годы (1987, 2004, 2011–2015 и др.) было проведено детальное изучение закономерностей его загрязнения рядом химических элементов-металлов.

Таблица 6 – Статистические характеристики содержания УПФ элементов в донных отложениях ОсВ, мг/кг сухого вещества (вытяжка 1 М НСl, n = 24)

Компонент	x (lim)	σ_x	s_x
ОВ, %	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.

Статистическая обработка данных показала, что содержание УПФ всех 8-ми изученных металлов статистически достоверно связано с содержанием ОВ в пробе ($r = +0,810–944$, $p < 0,0001$, $n = 24$), вне зависимости от локализации точки опробования. Данная закономерность также подтверждается статистической зависимостью содержания суммы УПФ (все изученные (3); без Fe (4); только «техногенные» Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb (5)) от содержания ОВ. Соответствующие уравнения регрессии для ОсВ и примыкающих участков р. Свислочь ($p < 0,0001$, $n = 29$):

$$\Sigma Me \text{ [мг/кг]} = 596 + 1618ОВ [\%], \quad (3)$$

где $\Sigma Me = Cr + Mn + Fe + Ni + Cu + Zn + Cd + Pb$;

$$\Sigma Me \text{ [мг/кг]} = -67,5 + 121,5ОВ [\%], \quad (4)$$

где $\Sigma Me = Cr + Mn + Ni + Cu + Zn + Cd + Pb$;

$$\Sigma Me \text{ [мг/кг]} = 51,0 + 39,5ОВ [\%], \quad (5)$$

где $\Sigma Me = Cr + Ni + Cu + Zn + Cd + Pb$.

Пространственное распределение величины суммы УПФ «техногенных» Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb в донных отложениях водохранилища показано на рис. 10 – высокие значения данного показателя характерны в настоящее время для различных участков всей его акватории (верховье – тт. 1, 2, средняя часть – тт. 4, 5, 8, низовье – тт. 11–13).

Если рассматривать изменение характера речных осадков за счёт замедления стока (илы вместо песков) и параллельное накопление поступающих от г. Минска загрязнителей в качестве интегрального «геохимического эффекта», можно отметить, что, по сравнению с ниже лежащим участком р. Свислочь (д. Вязье–д. Устиж), ОсВ обуславливает обогащение донных отложений УПФ Cr в 106 раз, Mn – в 15, Fe – в 14, Ni – в 26, Cu – в 68, Zn – в 51, Cd – в 217 и Pb – в 24 раза. Даже пески (объекты с незначительной аккумуляцией УПФ элементов) Осиповичского водохранилища (тт. 6–8) обогащены этими формами по сравнению с песками р. Свислочь (д. Вязье–д. Устиж) Cr в 4,6 раза, Mn – в 2,0, Fe – в 2,2, Ni – в 2,6, Cu – в 2,8, Zn – в 4,2, Cd – в 8 и Pb – в 1,6 раза.

Таким образом, в настоящее время ОсВ достаточно равномерно и повсеместно загрязнено УПФ Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb. Фиксируемый в том или ином случае уровень техногенного загрязнения напрямую зависит того, присутствуют или нет в рассматриваемой выборке образцы донных отложений с высоким содержанием ОБ.

Ряска (табл. 7, рис. 10–27). Крупные вдольбереговые поля ряски *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L. – одна из характерных особенностей акватории ОсВ от д. Лапичи до нижнего расширенного его участка. Т. к. указанный биологический объект распространён по всей акватории, параллельно с опробованием донных отложений производился и его отбор. Выбор ряски в качестве объекта исследования также связан с перспективой развития данного водоёма. Генетический ряд развития водной растительности ОсВ в период 1977–2010 гг. имел следующий вид: аир обыкновенный → манник водный; рдест блестящий → роголистник погружённый; виды рясок → кубышка жёлтая. Как отмечается в работе [6, С. 102]: «*наступление последней стадии развития водохранилища – отмирания (перерождения), в которую, собственно, уже и вступает водоём, приведёт к замене сформировавшихся лимнических ассоциаций на водно-болотные и болотные виды. На месте водохранилища будет наблюдаться болотный массив с чётко выраженным руслом реки.*»

Данные содержания 16 химических элементов в ряске приведены в табл. 7. Статистическая обработка полученных показателей свидетельствует о том, что в химическом составе ряски среди металлов основную роль играют (мг/кг): Fe (1 726) > Mn (964) > Ti (153) – элементы «естественного» происхождения. Прочие микроэлементы располагаются в следующем ряду: Ba (87) > Zn (74) > Sr (59) > Ni (37) > Cu (20) > Cr (12) > Sn (7,3) > Pb (2,6) > Co, V (2,4) > Mo (0,55) > Ag (0,13). Среди них к «техногенным» уверенно могут быть отнесены Zn, Ni, Cu, Cr, Sn, Pb, Mo, Ag. Заметно, что аккумуляция элементов ряской носит избирательный («фракционирующий») характер – так, например, если для УПФ металлов в донных отложениях было характерно соотношение Cr > Cu > Ni, то для ряски установлено обратное соотношение Ni > Cu > Cr и т. д.

Загрязнение ряски металлами достаточно равномерно распределено по акватории водохранилища. Исключение составляет Ag (рис. 24) – повышенные концентрации приурочены к верхней части акватории.

Рассмотрение корреляционных связей, существующих между микроэлементами в ряске, показывает, что для данного биологического объекта характерны свои взаимосвязи, кардинально отличающиеся от таковых для УПФ элементов в донных отложениях. Если для последних характерна взаимосвязь всех исследованных компонентов (ОБ, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb; $r = +0,810-0,985$, $n = 28$, $p < 0,0001$), то для ряски подобные взаимосвязи (за исключением связи Mn–Zn, $r = +0,779$, $n = 17$, $p < 0,001$) не прослеживаются.

Следует отметить, что ряска ОсВ, бесспорно, техногенно загрязнена Zn, Ni, Cu, Cr, Sn, Pb, Mo, Ag и другими элементами. Однако вследствие быстрой обновляемости водной массы водохранилища (45 раз в год), полученные показатели скорее характеризуют общий уровень загрязнения его воды данными элементами, чем загрязнённость конкретных локальных участков, на которых были взяты рассматриваемые нами пробы. Так, из данных, приведённых на

рис. 28, следует, что как для всей суммы концентраций металлов в ряске (Ti–Zn, Sr, Mo, Ag, Sn, Ba, Pb), так и суммы «техногенных» (Cr, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb) свойственно более-менее равномерное (кроме Ag) распределение по акватории водохранилища.

Таблица 7 – Статистические характеристики содержания химических элементов в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L. ОсВ (n = 17), мг/кг сухого вещества

Элемент	x (lim)	σ_x	S_x
Зольность, %	23,2 (14,1–42,2)	7,90	1,92
P	9 947 (5 200–19 400)	3 567	865
Ti	153 (94–241)	37,2	9,02
V	2,35 (1,0–4,2)	0,805	0,195
Cr	11,8 (2,6–22)	6,28	1,52
Mn	964 (510–1 790)	340	82
Fe	1 726 (790–2 800)	560	136
Co	2,41 (1,4–4,0)	0,750	0,182
Ni	36,6 (22–57)	11,5	2,79
Cu	19,7 (9,3–27)	5,35	1,30
Zn	74,1 (35–160)	29,8	7,23
Sr	59,3 (28–88)	17,8	4,32
Mo	0,554 (0,30–1,0)	0,205	0,050
Ag	0,132 (0,07–0,28)	0,080	0,019
Sn	7,34 (1,0–30)	8,75	2,12
Ba	86,6 (56–150)	23,3	5,65
Pb	2,60 (1,4–4,1)	0,757	0,184

Данный вывод подтверждается также сопоставлением аккумуляции Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb в ряске и их УПФ в донных отложениях непосредственно в тех же точках опробования (n = 16). Рассчитанные коэффициенты корреляции не превышают |0,28| и статистически недостоверны ($p > 0,3$).

В наглядной форме (рис. 29) эта закономерность проявляется при сравнении аккумуляции ряской и донными отложениями суммы УПФ «техногенных» Cr, Ni, Cu, Zn и Pb (для точек с несколькими пробами взяты максимальные значения).

Таким образом, сопряжённое опробование донных отложений и суммы нескольких доминантных для ОсВ видов макрофитов (*Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L.,) показывает, что последние могут быть использованы в качестве дополнительного естественного биоиндикатора, позволяющего судить об общем (усреднённом) уровне загрязнения водной массы водохранилища «техногенными» металлами.

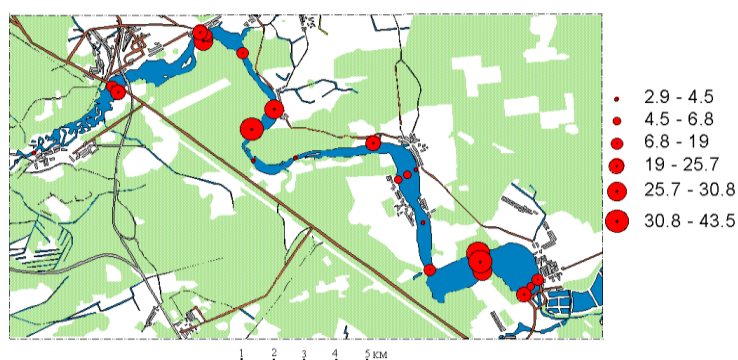


Рисунок 1 – Содержание ОБ в донных отложениях, %

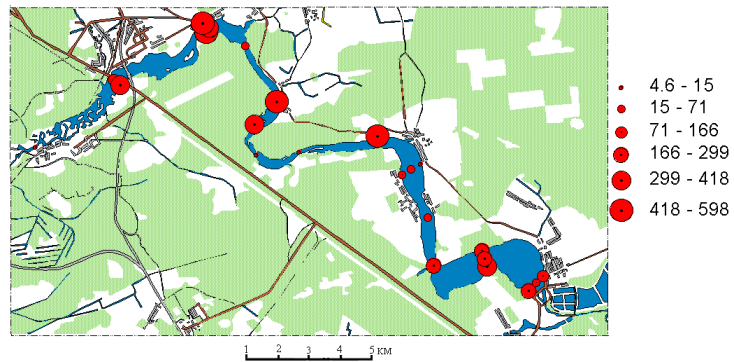


Рисунок 2 – Содержание УПФ Cr в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

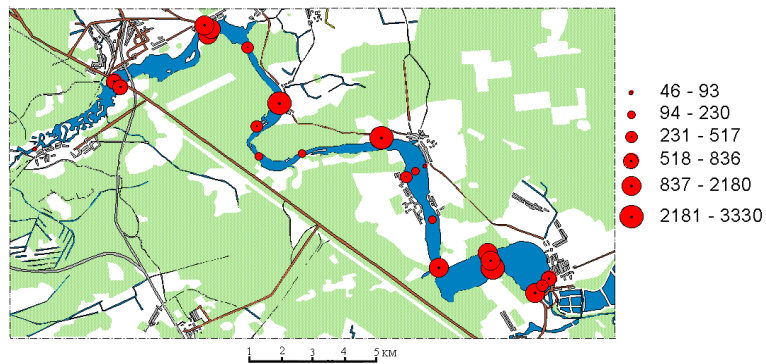


Рисунок 3 – Содержание УПФ Mn в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

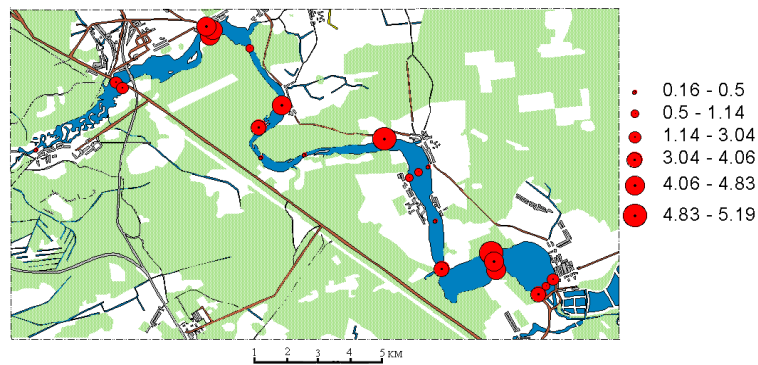


Рисунок 4 – Содержание УПФ Fe в донных отложениях, % от сухого вещества

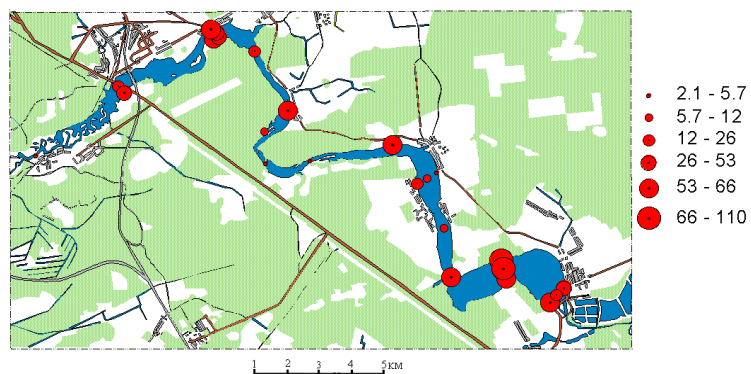


Рисунок 5 – Содержание УПФ Ni в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

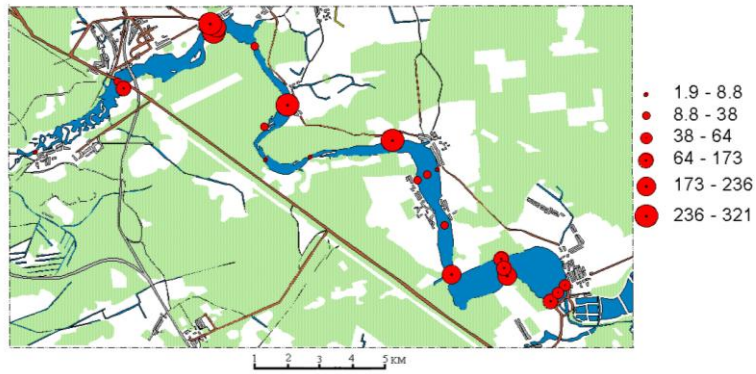


Рисунок 6 – Содержание УПФ Cu в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

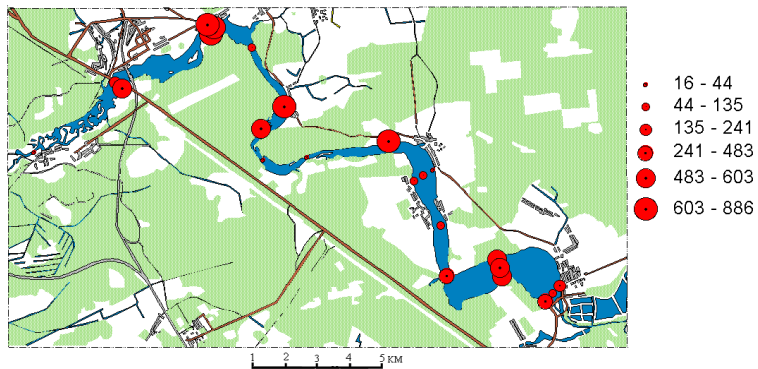


Рисунок 7 – Содержание УПФ Zn в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

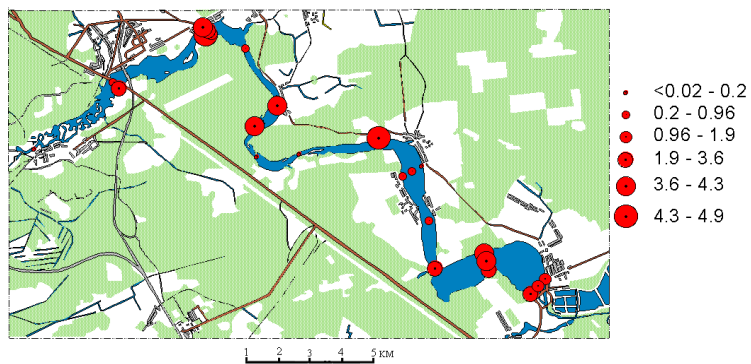


Рисунок 8 – Содержание УПФ Cd в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

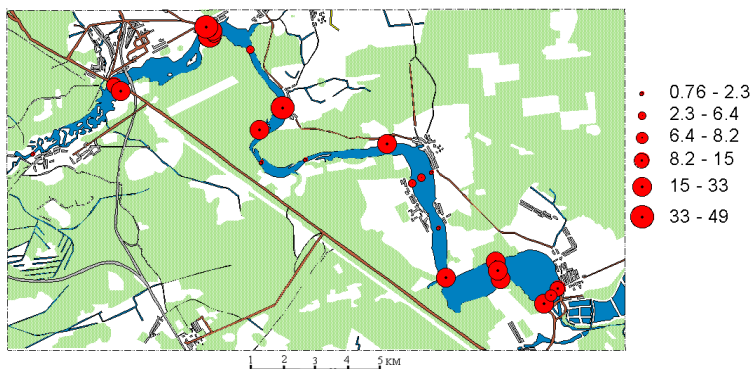


Рисунок 9 – Содержание УПФ Pb в донных отложениях, мг/кг сухого вещества

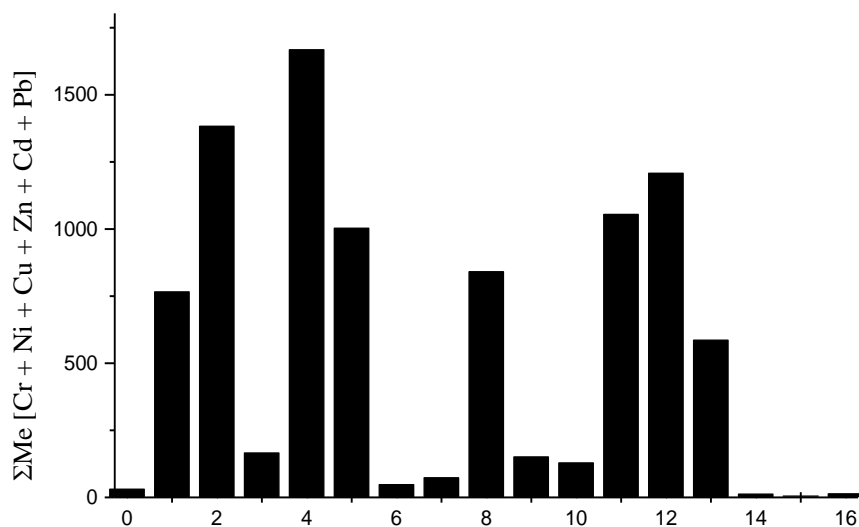


Рисунок 10 – Распределение суммы УПФ «техногенных» металлов в донных отложениях ОсВ и р. Свислочь, мг/кг сухого вещества

Расположение точек опробования: 0 – р. Свислочь, д. Цель; 1 – ОсВ, непосредственно выше моста автотрассы Минск–Бобруйск; 3 – 1 км ниже т. 2; 4 – д. Озерище; 5 – 0,8 км ниже т. 4; 6 – 1,2 км ниже т. 5; 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 – р. Свислочь, 0,09 км ниже плотины ГЭС; 15 – мост у д. Липень; 16 – д. Устиж.

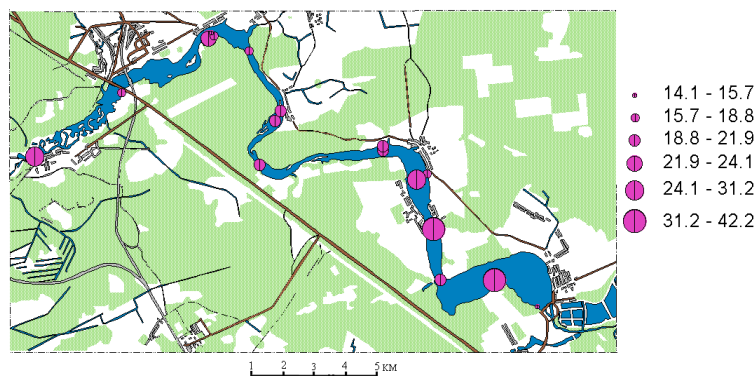


Рисунок 11 – Зольность ряски *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., % от сухого вещества

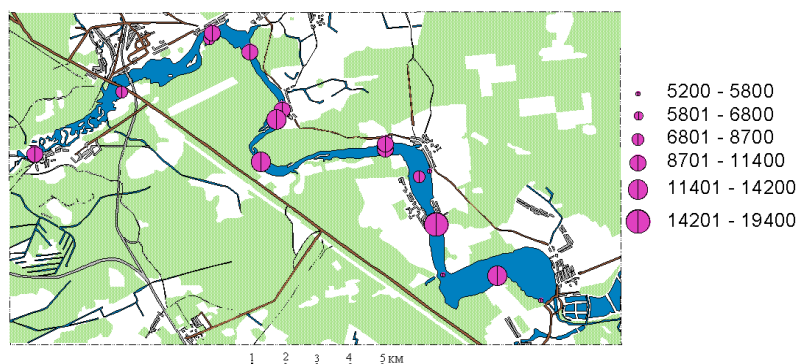


Рисунок 12 – Содержание P в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

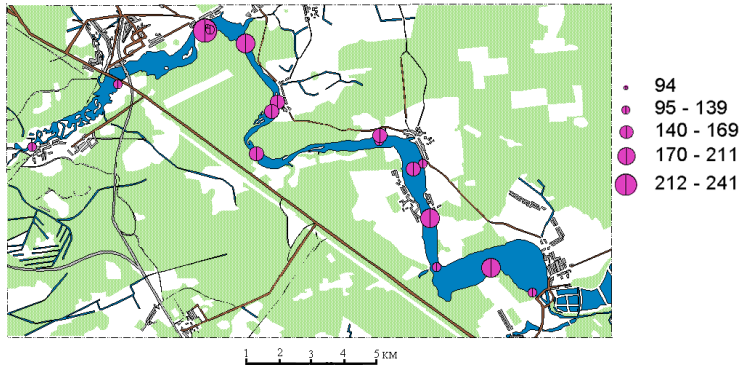


Рисунок 13 – Содержание Ti в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

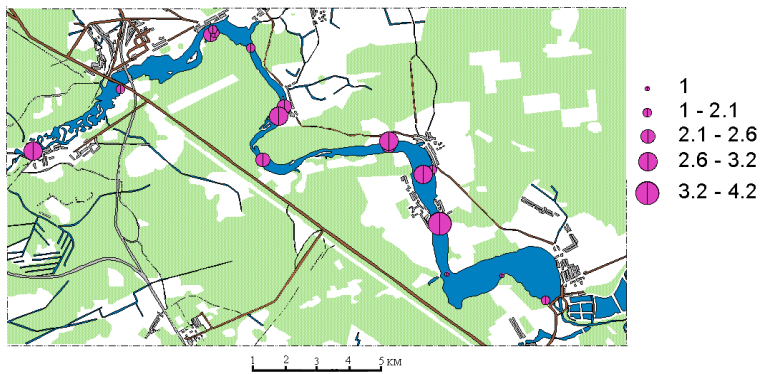


Рисунок 14 – Содержание V в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

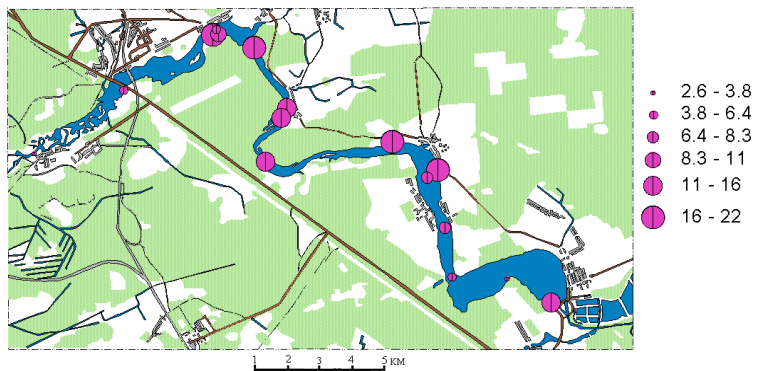


Рисунок 4.15 – Содержание Cr в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

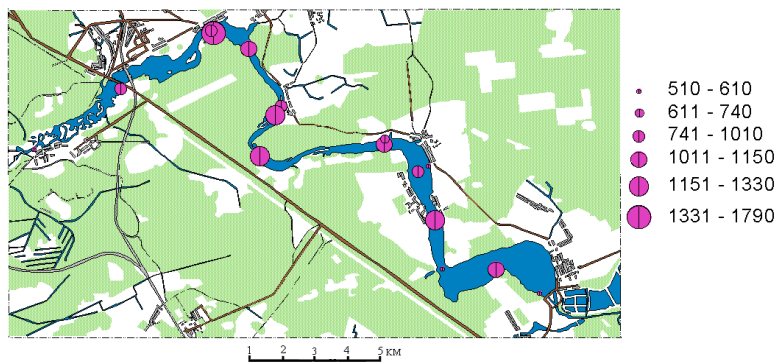


Рисунок 16 – Содержание Mn в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

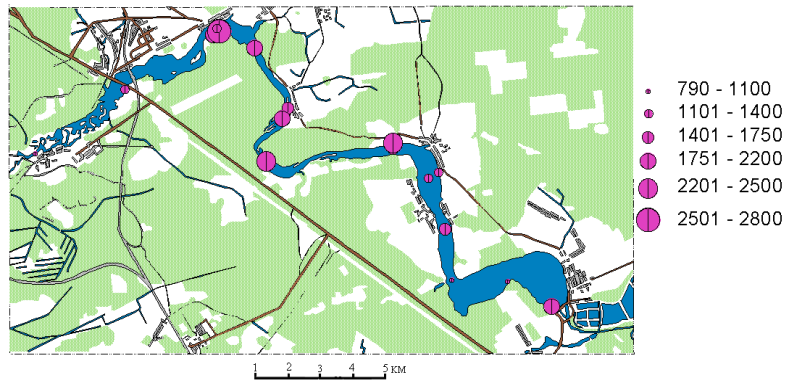


Рисунок 17 – Содержание Fe в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

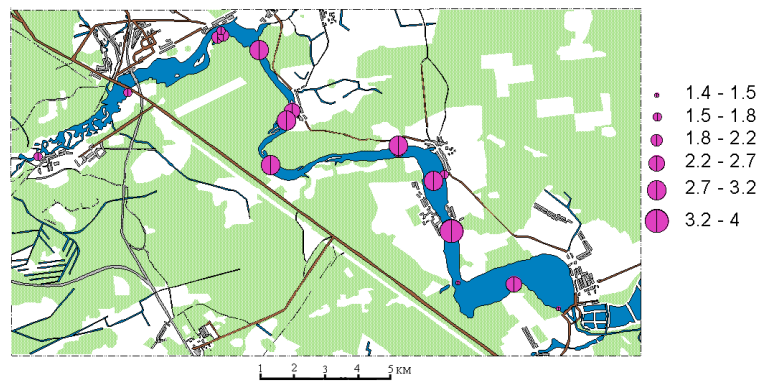


Рисунок 18 – Содержание Co в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

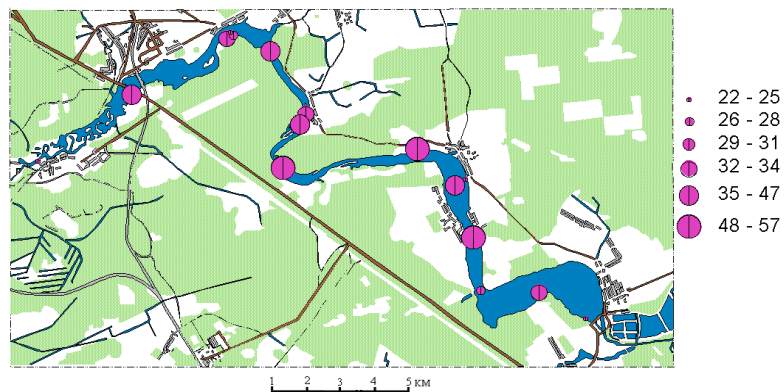


Рисунок 19 – Содержание Ni в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

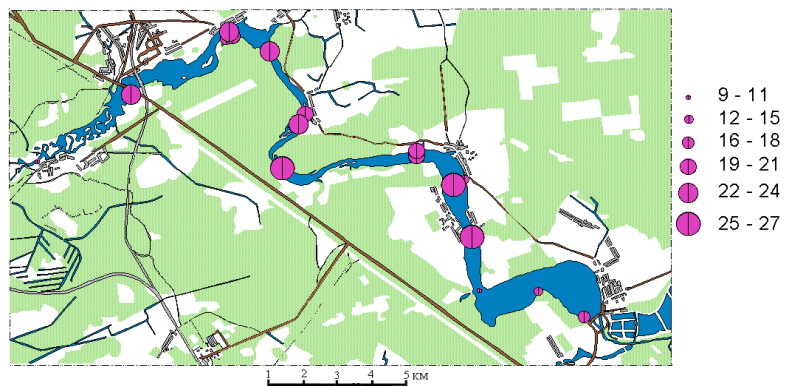


Рисунок 20 – Содержание Si в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

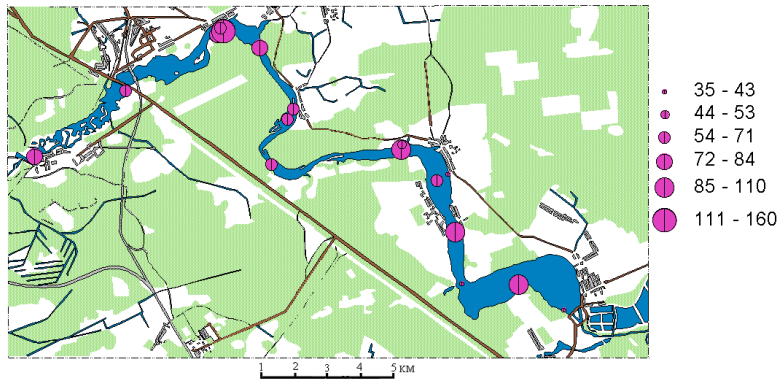


Рисунок 21 – Содержание Zn в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

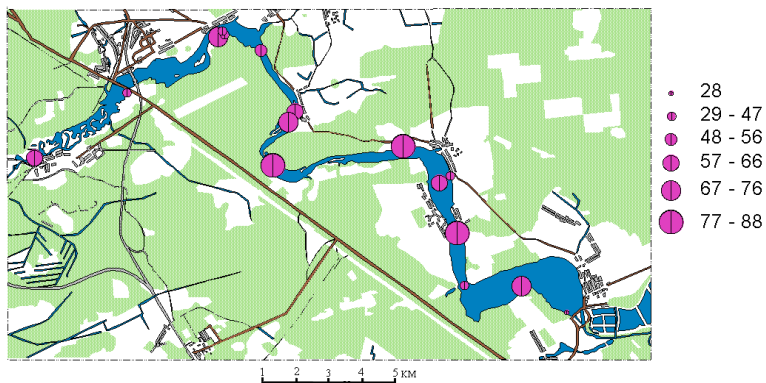


Рисунок 22 – Содержание Sr в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

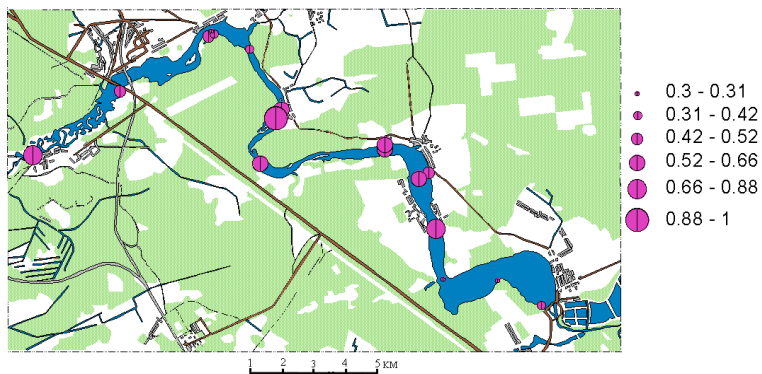


Рисунок 23 – Содержание Mo в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

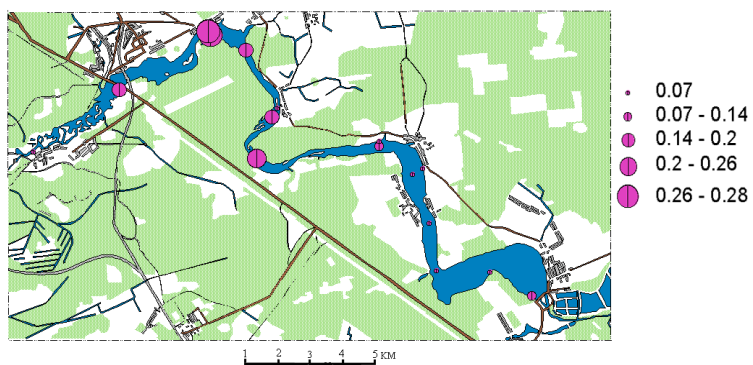


Рисунок 24 – Содержание Ag в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

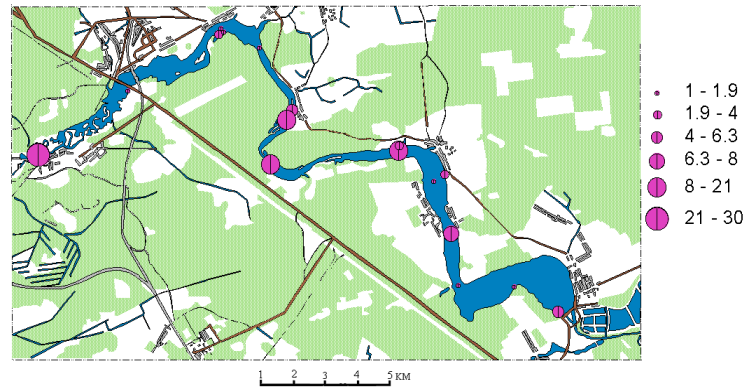


Рисунок 25 – Содержание Sn в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

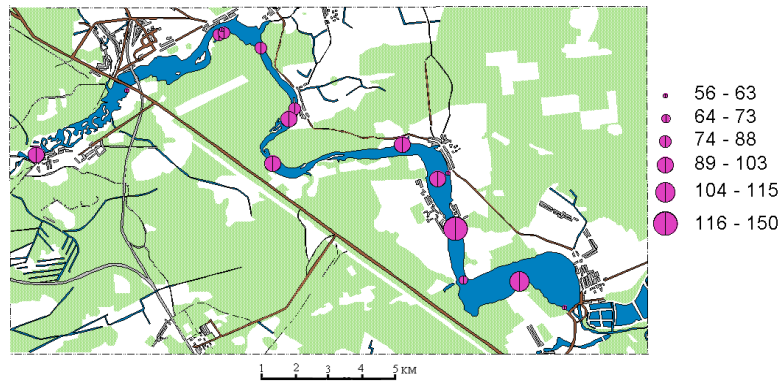


Рисунок 26 – Содержание Ba в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

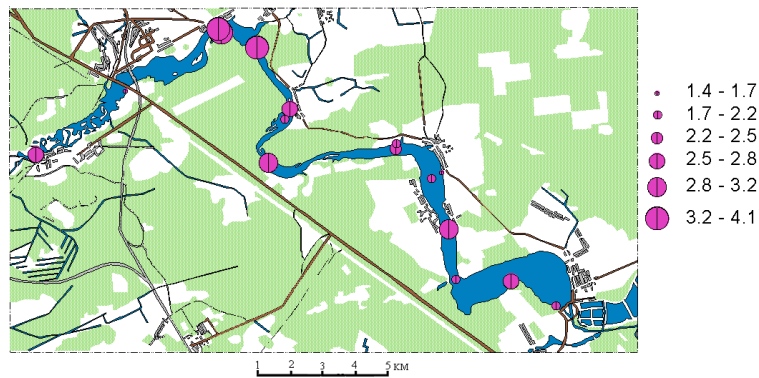


Рисунок 27 – Содержание Pb в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L., мг/кг сухого вещества

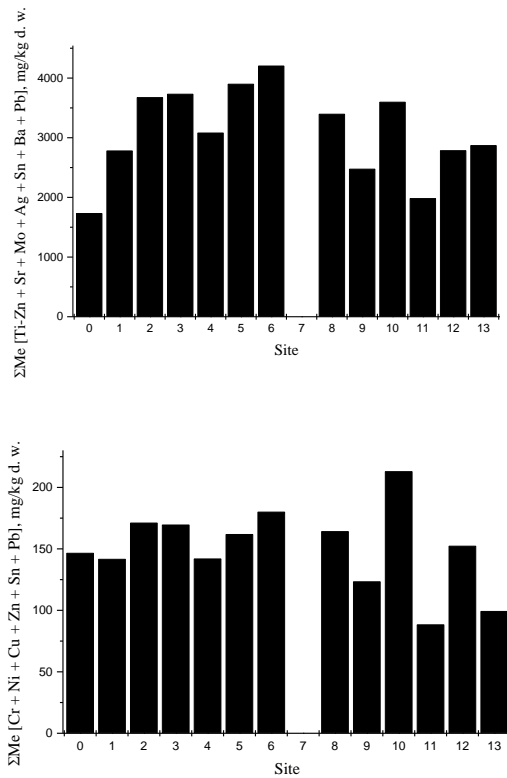


Рисунок 28 – Сумма металлов в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L. ОсВ, мг/кг сухого вещества

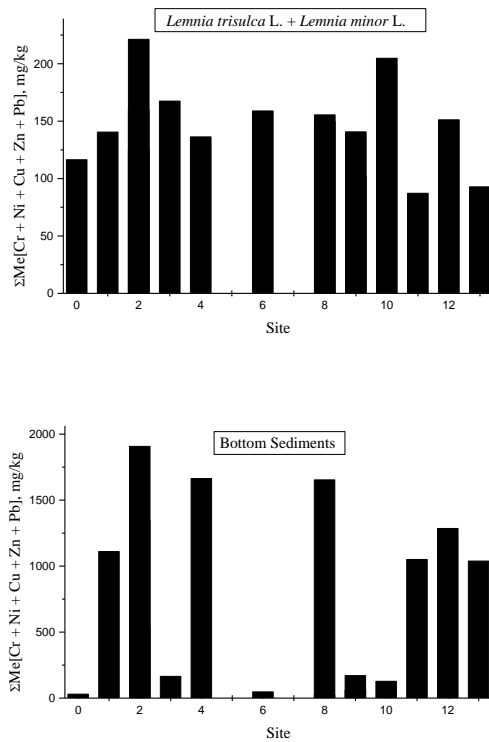


Рисунок 29 – Сумма «техногенных» металлов в ряске *Lemnia trisulca* L., *Lemnia minor* L. и донных отложениях (УПФ) ОсВ, мг/кг сухого вещества (тт. 5 и 7 параллельно не опробовались).

Библиографические ссылки

1. Беларуская савецкая энцыклапедыя : В 12 т. Мінск : Гал. рэд. Беларус. савец. энцыклапедыі, 1969. Т. 1.
2. Белорусская Советская Социалистическая Республика. Мінск : Гл. ред. Белорус. совет. энцыклапедыі, 1978.
3. Водохранилища Белоруссии: природные особенности и взаимодействие с окружающей средой / Под ред. В. М. Широкова. Минск : Университетское, 1991. С. 9–14.
4. Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. Пермь : Изд-во Пермского ун-та, 1977.
5. Природа Белоруссии : Популяр. энциклопедия. Минск : БелСЭ, 1986.
6. Кабушева Т. С. Современное состояние растительности Осиповичского водохранилища // Вестн. БГУ. Сер. 2. Химия. Биология. География. 2011. № 1. С. 99–102.

УДК 504.4.054(476)

МАЛЫЕ ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ г. МИНСКА: ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ И ЭКОЛОГО-РЕКРЕАЦИОННАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Е. П. Овчарова, Е. В. Санец, Г. М. Бокая

Институт природопользования НАН Беларуси,

ул. Ф. Скорины 10, 220114 Минск, Республика Беларусь; geosystem1@rambler.ru

Рассматривается современное состояние малых городских водных объектов на примере г. Минска. Приведены данные по их генетическим признакам, особенностям истории развития, функциональному назначению, гидрологическим, гидроморфологическим и гидрохимическим характеристикам, а также степени их антропогенной нарушенности. Дана оценка условий функционирования и эколого-рекреационной значимости малых городских водных объектов на урбанизированной территории.

Ключевые слова: малые городские водные объекты; гидрохимическая трансформация; ассимиляционный потенциал; эколого-рекреационная значимость.

Гидрографическая сеть современного города подвергается сильной трансформации, что обуславливает её высокое разнообразие. В результате застройки и освоения территории сокращается площадь водосборов и уменьшается длина рек, дренирующих территорию города, формируются техногенные водосборы дождевых коллекторов, реки забираются в коллекторы и пересыхают. Эксплуатация водозаборов подземных вод для нужд города способствует исчезновению малых рек. Кроме того, малые городские водные объекты (МГВО) и водноболотные комплексы зачастую просто уничтожаются в ходе строительства необходимых для города объектов. С другой стороны, в городах создаются искусственные водные объекты с определённым целевым назначением. В то же время в черту расширяющегося города попадают обводненные карьеры, оставшиеся после разработки строительных материалов или добычи торфа, а также копи близлежащих деревень. Увеличивается и уровень антропогенной нагрузки за счёт рекреации.

Все эти факты осложняют устойчивое функционирование водных объектов на городской территории.

Как правило, генезис водного объекта и его величина определяют его развитие и функционирование. На городской территории водным объектам естественного происхождения (реки, ручьи, остаточные водоёмы на месте высохших русел рек, болотные и старичные водоёмы) легче справляться с антропогенной нагрузкой, т. к. у них в большей или меньшей степе-