

УДК 91:574

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ АКВАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОДОХРАНИЛИЩА СЕЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

О.А. Тихомиров, М.В. Марков

Аннотация

В работе рассмотрены процессы аккумуляции в донных отложениях водохранилища сезонного регулирования стока. Выявлены существенные различия в накоплении тяжелых металлов в аквальных комплексах разных типов. Некоторые из них представляются особыми комплексами-аккумуляторами. Для оценки уровня загрязнения использован метод сравнения с фоновыми геохимическими показателями, рассчитан суммарный показатель концентрации химических элементов.

Ключевые слова: аквальные комплексы, донные отложения, тяжелые металлы, водохранилище, аккумуляция, экологическое состояние, загрязнение.

Введение

Конечным звеном круговорота техногенных элементов в ландшафте являются донные отложения водоемов. На протяжении последних десятилетий сброс загрязняющих веществ со сточными водами ведет к их аккумуляции в воде и донных отложениях. В свою очередь, накопление токсических соединений в водоемах усиливает экологическую опасность для гидробионтов и человека. Эта актуальная проблема уже нашла свое отражение в ряде публикаций ([1–4] и др.). Большинство исследователей рассматривают озеро или водохранилище как единый комплекс, выступающий в роли накопителя тяжелых металлов. В то же время водоемы представляют собой сложные гетерогенные системы, включающие аквальные комплексы, которые различаются по положению на акватории и физико-географическим условиям. На основе ряда ландшафтоформирующих признаков нами предложена классификация аквальных комплексов водохранилищ (по особенностям морфологии, морфометрии, гидродинамической активности, характеру водной растительности и донных отложений) [5].

Рассмотрение процессов аккумуляции техногенных элементов в водохранилище с учетом дифференциации водоема на отдельные геосистемы является одним из методических подходов, позволяющих не только оценить роль аквальных комплексов как аккумуляторов тяжелых металлов, но и прогнозировать характер их накопления в донных отложениях. Такой прогноз может быть использован при разработке системы природопользования, а также районировании водохранилищ в природоохранных целях.

1. Материалы и методы исследования

В ходе работы нами собран и проанализирован материал собственных полевых наблюдений за состоянием водных масс, донных отложений и затопленных почв Ивановского водохранилища – водоема сезонного регулирования – за период с 1998 по 2008 г. В ходе полевых экспедиционных исследований изучали донные осадки аквальных комплексов разных типов (пелагиальных: русловых и долинных; литоральных: открытых и защищенных; эрозионных и биогенно-аккумулятивных) в речных, озерно-речных и озерных условиях. Образцы отбирали грунтовой трубкой Государственного океанографического института в верхнем слое отложений от 0 до 10 см. Описание образцов донных отложений различных аквальных комплексов проводилось с использованием классификации грунтов В.П. Курдина [6], учитывающей их гранулометрический состав и содержание органического вещества. В общей сложности сделано свыше 200 полевых описаний колонок грунта. Химические анализы включали определение методом атомной абсорбции содержания кадмия, свинца, цинка, кобальта, никеля, молибдена, меди, хрома, ванадия и марганца. Для каждой группы аквальных комплексов проанализировано 25–36 образцов донных отложений. Наименьшая изменчивость показателей содержания тяжелых металлов в почвах отмечена для Cd, Co, Mo, Cr (CV от 30 до 50%), наибольшая вариабельность данных характерна для Zn, Cu, Pb, Ni, Cr, и Mn (CV от 50 до 70%). Геохимическую оценку проводили на основе сравнения полученных данных с кларками и фоновыми показателями химических элементов в природных средах. В качестве параметров естественного фона содержания химических элементов в донных отложениях использовали данные Института водных проблем РАН (ИВП РАН) (для песков открытых аквальных комплексов) и Верхневолжской геологоразведочной экспедиции (для илов пелагиальных и защищенных аквальных комплексов) [2, 7]. Уровень загрязнения донных отложений и затопленных почв определяли по величине суммарного показателя концентрации (СПК).

2. Анализ результатов исследования

Ивановское водохранилище, созданное в 1937 г. в наиболее освоенной юго-восточной части Тверской области, испытывает значительное антропогенное воздействие. За более чем 70-летний период в условиях благоприятного сезонного регулирования стока с малыми колебаниями уровня воды в течение вегетационного периода внутриводоемные процессы в водохранилище в значительной мере стабилизировались, что обеспечило формирование хорошо выраженных аквальных комплексов.

Наиболее значительными источниками загрязнения воды и донных отложений тяжелыми металлами в бассейне Верхней Волги являются предприятия Твери, Конакова и Ржева. В этих городах сконцентрировано более 80% крупных предприятий Тверской области. В последние десятилетия ежегодно в бассейн Ивановского водохранилища со сточными водами сбрасывалось до 1–5 т меди, 3–18 т цинка и 30–90 т железа. К концу 90-х годов двадцатого столетия наблюдалось снижение загрязняющего воздействия промышленности и сельского хозяйства на водоем. В 1998–2005 гг. в Ивановское водохранилище сбрасы-

валось около 30 тыс. м³/год сточных вод. Вместе со сточными водами в искусственный водоем поступало 15 тыс. т/год загрязняющих веществ, из них 11.2 т железа, 0.124 т меди, 0.018 т цинка [8].

Концентрация тяжелых металлов в водоеме постепенно снижается при движении от места сброса стоков в Твери и Конакове в сторону плотины. По данным Центра мониторинга окружающей среды Тверской области, в 1998–2007 гг. в водохранилище наблюдалось превышение нормативов качества воды по содержанию меди (2–3.6 ПДК), марганца (1.1–1.3 ПДК), кадмия (1.2 ПДК) и свинца (3–4.5 ПДК).

Важным источником загрязнения водоемов суши тяжелыми металлами являются почвы водосбора. Содержание в них тяжелых металлов очень близко к соответствующим показателям для донных грунтов и затопленных почв. Кларки химических элементов в компонентах природной среды Верхневолжья представлены в табл. 1. Кларки концентраций, определяемые как отношение фоновое содержания элемента к кларку литосферы, относительно невелики. В целом почвы и донные отложения обеднены микроэлементами за счет их выноса из ландшафтов Верхней Волги.

В то же время кларки концентрации тяжелых металлов в почвах водосбора, вычисленные по отношению к кларкам подзолистой почвы, по цинку, кобальту, свинцу, никелю и меди превышают 1.0 и изменяются в пределах от 1.02 до 2.80. По сравнению с допустимыми нормативами фоновые содержания металлов в почвах Тверской области несколько выше и приближаются к нижнему пределу ориентировочных допустимых концентраций по цинку, свинцу, никелю и меди.

В качестве эталона сравнения в настоящей работе использованы данные ИВП РАН по фоновым концентрациям тяжелых металлов в донных отложениях водоемов Верхней Волги, наиболее цитируемые в научной литературе. Данные табл. 1 показывают, что фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях р. Волги несколько выше кларков подзолистых почв и близки к фоновым концентрациям микроэлементов в почвах водосбора. Анализ полученных данных свидетельствует о накоплении тяжелых металлов в донных отложениях аквальных комплексов Иваньковского водохранилища. По абсолютной величине наиболее интенсивно в донных отложениях аккумулируется Mn (в среднем по водохранилищу – 1700 мг/кг). Высокой степенью накопления характеризуются Zn, V, Cr (более 50 мг/кг). Средние показатели содержания в илах (10–50 мг/кг) отмечены для Cu, Pb, Ni, Co, а низкие (1–10 мг/кг) – для Mo и для Cd (менее 1 мг/кг).

На Иваньковском водохранилище в пределах речных, озерно-речных и озерных участков нами обследовались пелагиально-профундальные (глубоководные), открытые и защищенные литоральные, зарастающие и незарастающие аквальные комплексы [5]. Результаты изучения накопления микроэлементов в донных отложениях и затопленных почвах Иваньковского водохранилища (рис. 1, 2) свидетельствуют о более высоких концентрациях всех элементов в иловых осадках пелагиально-профундальных (русловых, пойменных и террасных) аквальных комплексов по сравнению с литоральными комплексами открытого типа. Это обусловлено различиями процессов формирования грунтов и особенностями их механического состава. Глубоководные отложения имеют

Табл. 1
Кларки и фоновые содержания химических элементов в почвах и донных отложениях бассейна Верхней Волги (мг/кг) [2, 7]

Класс опасности	Элемент	Кларки подзолистых почв	Фоновое содержание в дерново-подзолистых почвах		Фоновое содержание в донных отложениях		ПДК/ОДК
			Московской обл.	Тверской обл.	пески*	серые илы**	
1	Cd	0.7	0.3	0.09	0.092	0.11	0.5-1.0
1	Pb	11.5	25	15	14.0	16.0	20-65
1	Zn	41.3	50	48	10.0	44.0	55-110
2	Co	8.4	7.2	12.5	2.4	10.3	–
2	Ni	23.2	20	28.0	2.8	27.9	20.5-40.0
2	Mo	1.7	1.0	1.1	1.4	3.4	–
2	Cu	15.3	27.0	20.0	30.0	33.0	33-36
2	Cr	180	46.0	52.0	11.0	40	90
3	V	63.5	64.0	58.0	30.0	54.0	150
3	Mn	715	590	462	354	520	1500

* По данным Института водных проблем РАН.

** По данным Верхневолжского геологоразведочного предприятия.

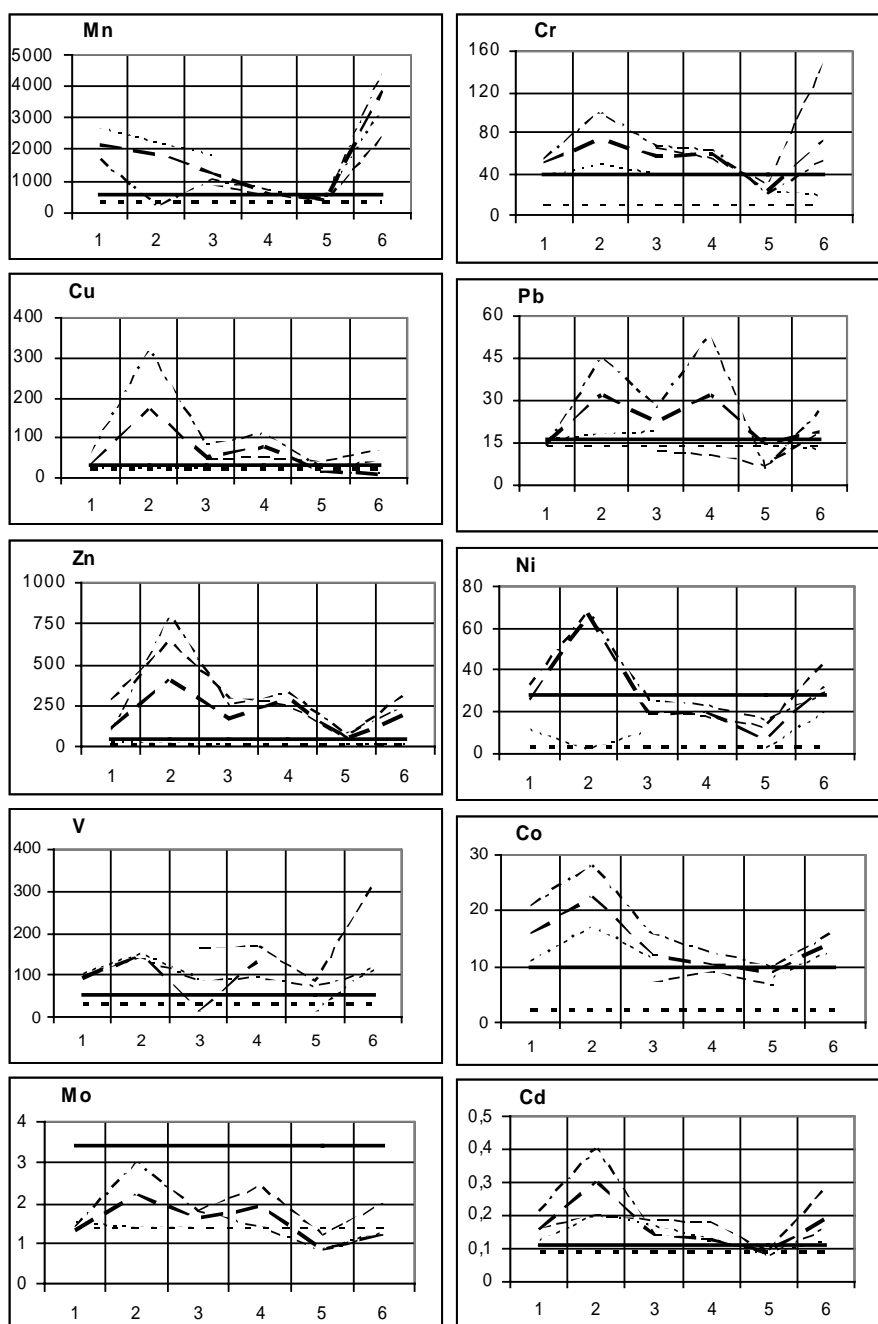


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в донных отложениях аквальных комплексов (АК) Иваньковского водохранилища: 1 – русловые АК; 2 – долинные; 3 – АК заливов; 4 – заостровные АК; 5 – открытые АК; 6 – АК в условиях антропогенного воздействия:

- Иваньковский плес (с преобладанием озерных и озерно-речных АК);
- · - · - Волжский плес (с преобладанием речных и озерно-речных АК);
- Шошинский плес (с преобладанием озерно-речных АК);
- — — Среднее содержание в донных отложениях по водохранилищу;
- Фоновое значение для серых илов;
- Фоновое значение для песков

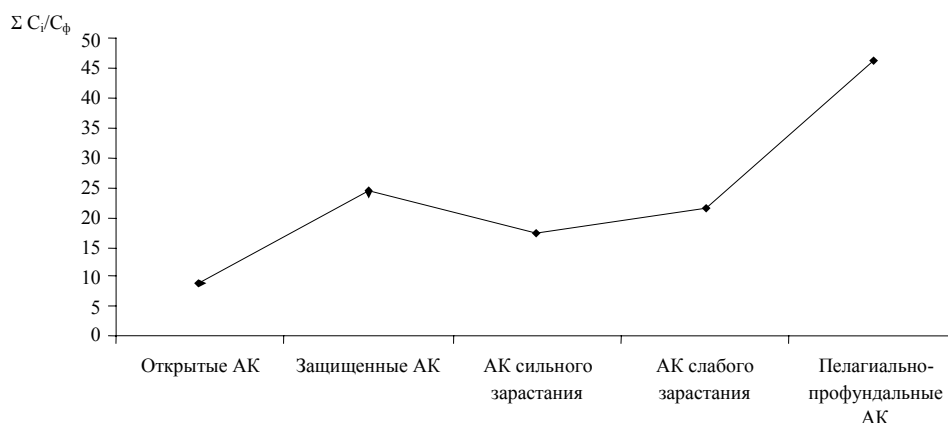


Рис. 2. Накопление тяжелых металлов (СПК) в донных отложениях аквальных комплексов (АК) Иваньковского водохранилища относительно фоновых показателей (профиль Омутня – Федоровское)

обычно более тяжелый гранулометрический состав накопленного материала по сравнению с открытой литоралью. Кроме того, водный поток затопленной реки в центральной части водохранилища обеспечивает транспортировку в глубоководные участки основной массы загрязненных вод, взвесей и микроэлементов. При этом тонкодисперсные фракции глубоководных илов поглощают и удерживают значительное количество тяжелых металлов [4].

Благоприятные условия для осаждения взвешенных частиц и заиления дна на большой глубине обеспечивают высокую степень аккумуляции большинства элементов. В грунтах пелагиально-профундальных комплексов Волжской поймы и террасы в 1.5 раза больше кадмия, свинца, кобальта, молибдена, хрома и ванадия, в 2–4 раза больше цинка, никеля и меди по сравнению со средними показателями для всего водохранилища. Высокая степень аккумуляции металлов отмечается в условиях затопленного русла. Однако здесь концентрации микроэлементов существенно меньше, чем в донных отложениях, сформированных на пойме и террасах. Вероятно, это связано с большей проточностью и активным выносом химических элементов из грунта русловых участков.

Среди литоральных аквальных комплексов наименьшей аккумулятивной способностью обладают открытые эрозионные мелководья. Материал их донных осадков обеднен микроэлементами (среднее содержание Cd в донных отложениях – 0.125 мг/кг, Pb – 14.4 мг/кг, Zn – 46.5 мг/кг, Co – 9.0 мг/кг, Ni – 7.1 мг/кг, Mo – 0.85 мг/кг, Cu – 17.0 мг/кг, Cr – 24.0 мг/кг, V – 60 мг/кг, Mn – 607 мг/кг). Это определяется влиянием высокой гидродинамической активности водной массы, вымыванием тонкодисперсных частиц, преобладанием песчаных фракций и окислительной геохимической обстановкой в грунтовом комплексе.

Среднее положение по содержанию тяжелых металлов занимают донные отложения биогенно-аккумулятивных аквальных комплексов литоральной зоны по заливам и за островами. Концентрация металлов в большинстве случаев в них выше, чем в среднем по водохранилищу, и существенно больше по сравнению

с эрозионными литоральными геосистемами (Co – в 1.3 раза, Pb и Cd – в 1.5 раза, Mo, Cr и V – в 2 раза, Ni и Cu – в 2.5–3 раза).

В пределах защищенной литорали выделяются биогенно-аккумулятивные аквальные комплексы сплавин, сильного, умеренного и слабого зарастания. В них также прослеживаются различия по характеру накопления металлов (рис. 2). В водохранилище в условиях разной степени зарастания высшей водной растительностью преобладают макрофитные и органоминеральные отложения, содержащие микроэлементы в количестве, близком к их концентрации в грунтах пелагиально-профундальных русловых аквальных комплексов. Сходные показатели имеют отложения сплавин и участков сильного зарастания. В этих комплексах накапливаются кадмий, цинк, молибден, ванадий в концентрациях, близких к среднему содержанию в грунтовом комплексе водохранилища. Максимальная аккумуляция металлов в зоне зарастания наблюдается в донных отложениях и затопленных почвах аквальных комплексов умеренного и слабого зарастания (среднее содержание Cd – 0.146 мг/кг, Zn – 123.0 мг/кг, Pb – 26.6 мг/кг, Co – 11.6 мг/кг, Ni – 18.6 мг/кг, Mo – 1.6 мг/кг, Cu – 46.3 мг/кг, Cr – 57.6 мг/кг, V – 118.3 мг/кг, Mn – 1446 мг/кг). Эти комплексы особенно выделяются при сравнении с участками сплавин и сильного зарастания по накоплению свинца (больше в 1.5 раза), меди (в 1.4 раза), хрома (в 1.1–2 раза), марганца (в 2 раза). Такое отличие связано с более активным выходом химических элементов из отмирающей биоты в условиях разреженной растительности и обогащения воды кислородом. В результате быстрого разложения «мягкой» растительности в водной среде с преобладающей окислительной обстановкой поглощенные гидробионтами микроэлементы переходят в состав макрофитного органоминерального ила.

Наиболее значительное накопление металлов наблюдается в донных отложениях заливов, находящихся под активным влиянием сточных вод предприятий и населенных пунктов (Мошковичский залив, Городнинский залив). В этих заливах донные отложения и затопленные почвы аккумулируют больше, чем в среднем по водохранилищу, кадмия, цинка, кобальта и хрома (в 1.05–1.3 раза), никеля и ванадия (в 1.6–1.7 раза), марганца (в 2.2 раза).

Оценка уровня загрязнения донных отложений аквальных комплексов Ивановского водохранилища основывалась на сравнении с фоновыми показателями содержания тяжелых металлов в донных отложениях Верхней Волги. Полигоны наблюдений располагались в открытом литоральном участке (район Омутни), в защищенных по заливам участках (район Борцино – Огурцово Шешинского плеса; Омутнинском, Федоровском урочищах – Ивановского плеса); заостровных участках (район Видогощи – Юрятино Волжского плеса).

Наиболее экологически чистыми являются литоральные открытые аквальные комплексы. В них донные отложения содержат минимальное количество металлов, соответствующее фоновым показателям или даже ниже фоновых (соотношение C_x к C_f изменяется от 0.2 до 1.0). В защищенных участках по заливам отмечена умеренная аккумуляция микроэлементов. В среднем по урочищу Омутнинского залива приплотинного плеса превышение над геохимическим фоном составляет от 2 до 8 раз.

Донные отложения Иваньковского водохранилища имеют различное происхождение и по-разному концентрируют металлы. Тяжелые металлы обладают, как известно, кумулятивной способностью и совместным действием на живые организмы. С этой точки зрения вызывает интерес суммарный показатель загрязнения донных осадков, определяемый как сумма превышений концентраций (СПК) тяжелых металлов над природным фоном.

По значениям СПК выделяют пять уровней загрязнения: 1 – менее 16 (низкий), 2 – 16–32 (средний), 3 – 32–48 (высокий), 4 – 48–64 (очень высокий), 5 – 54–80 (чрезвычайно высокий).

Проведенные исследования выявили в аквальных комплексах Иваньковского водохранилища наличие техногенных аномалий в заливах, находящихся под влиянием активной деятельности человека. СПК донных отложений в этих комплексах составил в среднем 25–30. Высокий уровень загрязнения отмечен в пелагиали (СПК = 18.3–46.4) (рис. 2).

Наименьшее загрязнение по суммарному показателю установлено в почвах и грунтах открытых мелководий. Уровень загрязнения здесь низкий, или загрязнение вообще отсутствует.

Донные отложения Иваньковского и Волжского плесов относятся преимущественно к уровню средне загрязненных, а донные осадки Шошинского плеса – к слабо загрязненным.

Анализ данных показывает существенные различия загрязнения донных отложений аквальных комплексов по плесам. Наиболее опасные техногенные аномалии загрязнения располагаются в пелагиальных террасных аквальных комплексах долинного типа на Иваньковском плесе.

3. Выводы

На основании анализа полученных материалов можно сделать вывод о существенной дифференциации накопления тяжелых металлов в разных аквальных комплексах Иваньковского водохранилища. Аномалии распределения металлов в донных отложениях связаны прежде всего с техногенными источниками химических элементов и внутриводоемными процессами аккумуляции в аквальных комплексах различных типов. Аквальные комплексы, входящие в зону влияния г. Твери (Волжский плес) и г. Конакова (Иваньковский плес), могут быть отнесены к экологически неблагоприятным. Менее значительное антропогенное воздействие испытывает в настоящее время Шошинский плес. Аномалии в донных отложениях полиэлементарны. В них доминируют халькофильные элементы (цинк, медь). Значение суммарного показателя концентрации тяжелых металлов в донных осадках Иваньковского водохранилища изменяется от низкого до очень высокого уровня загрязнения. Ниже по течению Волги с удалением от источников воздействия интенсивность загрязнения снижается как в Волжском, так и в Иваньковском плесах, хотя и остается значительной. Наиболее сильными аккумуляторами тяжелых металлов являются пелагиально-профундальные и защищенные литоральные биогенные аквальные комплексы. Экологическая обстановка в этих аквальных комплексах неблагоприятна, в них идет активное накопление цинка, меди, кадмия и хрома. В большинстве случаев содержание химических элементов в донных отложениях существенно выше естественного

фона. Минимальные концентрации характерны для донных отложений открытых литоральных комплексов. Указанную закономерность полностью подтверждает расчет суммарных показателей загрязнения.

Наиболее экологически чистыми являются литоральные открытые комплексы. В них затопленные почвы и донные отложения содержат минимальное количество тяжелых металлов, соответствующее фоновым показателям. В защищенных аквальных комплексах по заливам отмечено умеренное накопление микроэлементов. В среднем по урочищам заливов наблюдается превышение над геохимическим фоном в 2–8 раз. В условиях сильного зарастания относительное содержание металлов превышает фон в 2–7 раз, а в условиях умеренного и слабого зарастания – в 1.5–14 раз. Наиболее значительное накопление выявлено в пелагиально-профундальных аквальных комплексах (в 2.5–20 раз выше фона по разным элементам). При этом наиболее существенно аккумулируются Zn, Ni и Cu.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-00778).

Summary

O.A. Tikhomirov, M.V. Markov. Heavy Metals Accumulation in Bottom Deposits of Aquatic Complexes in a Reservoir of Seasonally Controlled Outflow.

The article considers processes of heavy metals accumulation in a reservoir of seasonally controlled outflow. A significant difference in heavy metals accumulation ability among different types of aquatic complexes has been revealed. Some of them can be regarded as outstanding accumulator-complexes. In order to determine the level of contamination, it has been compared with geochemical phone parameters. The sum-total parameter of chemical elements concentration has been estimated.

Key words: aquatic complexes, bottom deposits, heavy metals, reservoir, accumulation, ecological condition, contamination.

Литература

1. *Моисеенко Т.И.* Экотоксикологический подход к нормированию антропогенных нагрузок на водоемы Севера // *Экология*. – 1998. – Т. 29, № 6. – С. 452–461.
2. *Бреховских В.Ф., Волкова З.В.* Особенности накопления тяжелых металлов в донных отложениях и высшей водной растительности Иваньковского водохранилища // *Водн. ресурсы*. – 2001. – Т. 29, № 4. – С. 441–447.
3. *Мокрякова Т.В.* Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях загрязнения водной среды // *Водн. ресурсы*. – 2002. – Т. 29, № 2. – С. 253–255.
4. *Зиганишин И.И.* Донные отложения озер Республики Татарстан: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Ярославль, 2005. – 24 с.
5. *Тихомиров О.А.* Классификация и оценка экологического состояния аквальных геоэкосистем Верхней Волги // *Проблемы региональной экологии*. – М., 2005. – № 1. С. 28–38.
6. *Курдин В.П.* Грунты Иваньковского водохранилища // *Тр. Ин-та биол. водохранилищ АН СССР*. – М.-Л., 1961. – Вып. 4 (7). – С. 328–346.

7. *Левченко Л.П.* Геолого-экологические исследования территории Тверской области // Эколого-медицинские аспекты состояния здоровья и среды обитания населения Тверской области. – Тверь: Твер. обл. тип., 1999. – С. 12–14.
8. Доклад об использовании природных ресурсов и состоянии природной среды Тверской области. – Тверь: Твер. обл. тип., 2007. – С. 85–87.

Поступила в редакцию
19.02.09

Тихомиров Олег Алексеевич – кандидат географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии и региональной геоэкологии Тверского государственного университета.

E-mail: *physgeo@mail.ru*

Марков Михаил Витальевич – академик РАН, доктор биологических наук, профессор кафедры физической географии и региональной геоэкологии Тверского государственного университета.

E-mail: *michael.markov@mail.ru*