

УДК 577.4 + 581.524

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-1-2020-17-29>

## **ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БИОГЕННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ АКВАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ**

**О.А.Тихомиров**

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

В статье приводится эколого-геохимическая характеристика биогенно-аккумулятивных аквальных комплексов, рассматриваются вопросы накопления органических веществ и тяжелых металлов в аквальных комплексах верхневолжских водохранилищ. Приводится эколого-геохимическая оценка состояния аквальных комплексов разной степени зарастания.

**Ключевые слова:** *аквальный комплекс, биогенная аккумуляция, эколого-геохимическая оценка, водохранилища.*

Исследования водохранилищ позволили выделить аквальные комплексы со значительным уровнем биологической активности, участием в круговороте органического вещества высшей водной растительности, зообентоса и других гидробионтов, с активным накоплением органических соединений в воде и донных отложениях. Изучение биогенно-аккумулятивных комплексов представляет собой научный и практический интерес как объектов, оказывающих существенное воздействие на процессы эвтрофикации и в целом на экологическое состояние водохранилищ. С этих позиций представляется весьма важным проведение комплексной оценки эколого-геохимического состояния биогенно-аккумулятивных аквальных комплексов. Задачей настоящей работы является эколого-геохимическая характеристика биогенно-аккумулятивных аквакомплексов водохранилищ Верхневолжья. В основу работы положены материалы многолетних наблюдений автора, а также данные полученные в совместных экспедиционных маршрутах с сотрудниками Конаковской НИС Института водных проблем РАН и Института биологии внутренних вод РАН [3, 10, 11, 12].

Полевые исследования [10, 11, 12] позволили установить высокую степень зарастания защищенных литоральных аквальных комплексов водохранилищ Верхневолжья. Густые заросли макрофитов образовали особые фитофильные аквакомплексы, отличающиеся по свойствам природных компонентов и режиму от незарастающей литорали и глубоководных пелофильных комплексов. Разнообразная водная растительность и зообентос способствовали формированию органических и органо-минеральных донных отложений разной степени разложения. В

некоторых случаях в условиях относительно слабой гидродинамической активности затопленные почвы заливов сохранили морфологическое строение. В результате макрофитные отложения нередко залегают на поверхности гумусового или нижележащих почвенных горизонтов. Лишь литоральные, лишенные макрофитов устьевые участки заливов, подстилаются эродированными почвами.

В ходе исследований проводилось опробование и химический анализ образцов природных компонентов: водной растительности, поверхностных вод и донных отложений по общепринятым методикам.

Геохимическая оценка обеспечивалась на основе сравнения полученных данных с кларками и фоновыми показателями химических элементов в природных средах. В качестве естественного фона содержания химических элементов в донных отложениях использовались данные ряда авторов [1,2,7]. Уровень загрязнения донных отложений и затопленных почв определялся по величине суммарного показателя концентрации (СПЗ).

В пределах Верхневолжского, Ивановского, Угличского и Рыбинского водохранилищ широко представлены аккумулятивные аквальные комплексы лимнического типа с фитофильными, пелофильными и почвенным биоценозами. Верхние части заливов заняты литоральными фитокомплексами различной степени зарастания, средние глубоководные части – педокомплексами. В устьях заливов формируются открытые литоральные комплексы на размываемых мелководьях с бедными псаммофильными биоценозами, имеющими разреженную растительность. Крупные заливы водохранилищ могут включать довольно глубоководные (до 5 - 7 м) участки с профундальными пелофильными аквакомплексами. В защищенных от волнобоя заливах формируются сплавины [10,11].

В пределах литорали верхневолжских водохранилищ довольно ясно выделяются биогенно-аккумулятивные аквальные комплексы сплавин, сильного, умеренного и слабого зарастания.

Аквальные комплексы сильного зарастания воздушно-водной растительностью и сплавин располагаются на глубинах до 1,0 – 1,5 м от НПУ. Биомасса растений в этих комплексах составляет 400 – 1200 г/м<sup>2</sup> в сухом весе. Проективное покрытие дна колеблется от 60 до 100 %. К сплавинам и воздушно-водным растениям часто примыкает пояс сильного зарастания телорезом алоэвидным, затягивающим пространство воды на глубинах 0,4 – 1,3 м. Заросли телореза очень плотные, создают практически полное затенение грунта и имеют значительную фитомассу, обычно превышающую 500 г/м<sup>2</sup>. К аквакомплексам умеренного зарастания нами относятся участки заливов с фитомассой от 100 до 400 г/м<sup>2</sup>. Акватория с фитомассой менее 100 г/м<sup>2</sup> представляет собой комплексы слабого зарастания [10,11].

Следует отметить важную роль макрофитов как источника грунтообразующего материала и в формировании химических свойств затопленных почв различных аквакомплексов водохранилищ.

Активная седиментационная деятельность привела к накоплению на поверхности дна биогенно-аккумулятивных горизонтов, представленных отложениями макрофитов и илов (в фитоаквакомплексах и пелоаквакомплексах). Эти отложения обогащены органическим веществом, гумусом, азотом, подвижными формами фосфора и калия. Наиболее богаты питательными элементами макрофитные отложения литоральных фитоаккумулятивных и илы пелоаккумулятивных комплексов.

В условиях сильного зарастания защищенной литорали дно во многих случаях покрыто значительным (до 15 - 30 см) слоем крупных перегнивающих растительных остатков и детритом. Здесь на глубинах до 0,7 м формируется сообщество зообентосных фитофилов. В мае бентос по составу сильно обеднен и состоит из видов, хорошо переносящих осушение дна. По данным Ф.Д. Мордухай-Болтовского [9] и др., зообентос представлен главным образом хирономидами, олигохетами и моллюсками. При этом преобладают хирономиды (*Endochironomus* gr. *dispar*, *Glyptotendipes gripekoveni*, *Chironomus plumosus*). Кроме них, в бентосе отмечены олигохеты (*Lumbrikus variegates*) и единичные моллюски (*Bithynia*). В небольшом количестве встречаются и мелкие *Naididae*. К концу лета биомасса зообентоса возрастает в среднем до 7,5 г/м<sup>2</sup> и может к середине сентября достигать 24 – 28 г/м<sup>2</sup>. Основную часть ее дает мотыль, фитофильные хирономиды, личинки насекомых. В условиях умеренного зарастания на глубинах 0,7 - 1,0 м бентос несколько разнообразнее. Появляется примесь тубифицид (главным образом *Peloscoclex ferox* и *Potamothrix hammoniensis*), из моллюсков становится многочисленной *Bithynia*. В более разреженных зарослях фитофилов меньше, чем в условиях сильного зарастания. Общая биомасса зообентоса понижается и составляет в среднем 6,6 г/м<sup>2</sup>. Максимальная по величине биомасса отмечена в августе (19,6 г/м<sup>2</sup>) [9].

В аквальных комплексах слабого зарастания погруженной растительностью дно выстлано илисто-песчаными грунтами и небольшим количеством растительных остатков. Здесь в донных отложениях обитают несколько видов двустворчатых моллюсков (сферииды), из брюхоногих — битиния, а также пиявки и ряд форм хирономид. Их средняя биомасса за весь период наблюдений – 7,65 г/м<sup>2</sup>, максимальная достигала 65 г/м<sup>2</sup>. К осени отмечается существенное уменьшение биомассы (иногда до 1 - 2 г/м<sup>2</sup>) [9].

В условиях открытой литорали водохранилищ в результате размывающего воздействия ветровых волн на дно зарастание макрофитами ограничено, здесь активно смываются отложения детрита и растительные остатки, во многих местах обнажаются песчаные грунты. В формирующихся псаммокомплексах на глубине 0,5 м зообентос состоит преимущественно из хирономид и некоторых брюхоногих моллюсков со средней биомассой около 1,15 г/м<sup>2</sup>. Для сравнения можно отметить, что в Рыбинском водохранилище открытых литоральных комплексах биомасса бентоса обычно не превышает 0,1–0,3 г/м<sup>2</sup>. В условиях педокомплексов в затопленных почвах, где

значительно содержание органических веществ, встречается примесь мелких олигохет, средняя биомасса биоты составляет – 2,3 г/м<sup>2</sup> [9].

В пелагиально-профундальных аквакомплексах с глубинами от 5 до 16 м на затопленных участках русла, поймы и террас сложился биоценоз мотыля – невского лимнодрила, которого нет в прибрежной зоне, мелких форм пелофильных хирономид (*Chironomus plumosus*, *Isochaetides newaensis*), тубифицид (*Limnodrilus hoffmeisteri*) и мелких моллюсков. Здесь на серых илах биомасса составляет в среднем 11,0 г/м<sup>2</sup>. При этом биомасса хирономид достигает 59 – 66%, в то время как биомасса олигохет (тубифицид) – 31 - 41% от общей биомассы [9].

Таким образом, распределение биомассы зообентоса в защищенных и незащищенных литоральных аквакомплексах имеет закономерный характер, определенный условиями зарастания, глубиной и водным режимом. В целом с уменьшением степени зарастания биомасса бентоса снижается. Особенно резко эта закономерность прослеживается в условиях слабозарастающих открытых псаммокомплексов, как в водохранилищах сезонного (Иваньковское), так и многолетнего регулирования стока (Рыбинское водохранилища).

Высшая водная растительность является важным средообразующим фактором. Седиментация и заиление в густых зарослях в 2 - 5 раз интенсивнее, чем на не заросших участках [6]. Растения поглощают из воды и грунта минеральные вещества, связывают азот, фосфор, кальций, магний и другие элементы и возвращают их в воду по окончании вегетации.

В пределах литорали прослеживаются различия в характере накопления в водных растениях органических веществ и минеральных элементов. По исследованиям И.В.Довбни [5], в растительности Иваньковского водохранилища накапливается до 1 г/м<sup>2</sup> N и P, до 2 г/м<sup>2</sup> Na, до 8 г/м<sup>2</sup> K и менее 1 г/м<sup>2</sup> – Mg. К периоду цветения в воздушно-водной растительности содержится N, P, K, Na, Ca и Mg соответственно – 58, 62, 58, 72, 54 и 56% от максимального их количества в фитомассе. В сплавиных это накопление идет медленнее: N, P, K, Na, Ca, Mg – 32, 31, 30, 23, 28 и 25%.

Отбор проб воды в биогенно-аккумулятивных аквакомплексах сплавиных, сильного, умеренного и слабого зарастания заливов Иваньковского водохранилища в летние периоды свидетельствует о выраженной дифференциации гидрохимических свойств водных масс различных аквакомплексов. Поверхностные воды открытых плесов (фитопланктонные пелокомплексы) характеризуются щелочной реакцией. Сильное зарастание заливов сопровождается подкислением среды и снижением показателя рН (в воде сплавиных рН = 6,3 – 8,4, сильного зарастания рН = 6,8 – 8,8). В условиях умеренного и слабого зарастания педокомплексов рН увеличивается до 7,0 – 9,1. В соответствии со степенью зарастания изменяется содержание кислорода и биогенных элементов в воде фитокомплексов. Снижение интенсивности фотосинтеза, усиление поглощения кислорода растениями в

темноте обуславливает ухудшение газового режима литоральных аквакомплексов сильного зарастания и сплавин – возникает дефицит кислорода, накапливается углекислота. Это ослабляет процесс минерализации органического вещества, и оно начинает накапливаться в литоральной зоне водохранилищ в большом количестве [11].

Наибольшее содержание соединений азота отмечается в биогенно-аккумулятивных комплексах заливов, находящихся под влиянием антропогенного воздействия. В местах сброса теплых отработанных вод в заливы водные массы имели повышенные концентрации соединений азота (в Мошковичском заливе –  $\text{NH}_4$  - 0,55 мг/л,  $\text{NO}_3$  – 1,25 - 1,37 мг/л,  $\text{NO}_2$  – 0,04 - 0,43 мг/л; в заливе сбросного канала пос. Редкино и р. Дойбице –  $\text{NH}_4$  – 2,6 - 5,4 мг/л,  $\text{NO}_3$  – 1,8 - 6,56 мг/л,  $\text{O}_2$  – 0,02 - 0,37 мг/л). Концентрации  $\text{NO}_3$  и  $\text{NO}_2$  в воде в большинстве случаев значительно выше ПДК (для  $\text{NO}_3$  – 0,39 мг/л, для  $\text{NO}_2$  – 0,02 мг/л). В условиях сильного зарастания и сплавин превышение по аммонийному азоту может составлять 1,1 - 3,0 ПДК. Так, в Мошковичском заливе, р. Дойбице, заливе сбросного канала пос. Редкино концентрации в воде  $\text{NO}_2$  составляли 1 - 2 ПДК, а  $\text{NO}_3$  - 6,13 ПДК [12].

Выраженная дифференциация водной массы прослеживается по большинству анализируемых элементов и веществ. При этом особенно сильно отличаются воды сплавин и сильного зарастания. Наиболее высоким содержанием органического вещества и острым дефицитом кислорода характеризуются литоральные фитокомплексы сильного зарастания и сплавин. Это связано с тем, что гниение растительных остатков в застойных водах не только подкисляет среду, но и усиливает растворимость и подвижность элементов, в том числе и металлов, увеличивает их десорбцию из макрофитных отложений и илов. Этот процесс способствует развитию интенсивного заболачивания заливов. Как следствие, наблюдается накопление молодого торфа в виде грубых макрофитных отложений, снижение качества воды и дальнейшее уменьшение продуктивности водоема. Эти процессы могут усиливаться в ряде заливов водохранилищ за счет антропогенной эвтрофикации, связанной в первую очередь со сбросом теплых и загрязненных сточных вод.

Анализ физико-химических показателей и строения затопленных почв показал, что наибольшему изменению подверглись почвы открытых литоральных аквакомплексов до глубины 1,8 – 4,0 м в Ивановском, Угличском и Верхневолжском водохранилищах. В Рыбинском водохранилище эта глубина достигает 5 - 6 м. В условиях высокой гидродинамической активности взаимодействие водной массы и дна привело к формированию минеральных эродированных почв различного механического состава (в условиях псаммокомплексов).

Верхние части заливов, занятые сплавидами и комплексами сильного зарастания, характеризуются преобладанием процесса биогенной аккумуляции и часто подстилаются затопленными почвами, сохранившими

гумусовые горизонты. За период существования водохранилищ на поверхности горизонта  $A_1$  накопился слой грубого макрофитного торфа, достигающий в отдельных случаях 10 см. В условиях литоральных комплексов умеренного и слабого зарастания перегнойный горизонт перекрыт слоем (1 - 5 см) темно-серого органо-минерального ила.

Лабораторные анализы показали довольно высокое содержание гумуса и соединений азота в затопленных почвах педокомплексов Иваньковского водохранилища. Так, в иловых и макрофитных отложениях величина гумуса составляет 4 – 6,8%, общего азота – 0,2 – 1,5%, подвижного фосфора и калия – соответственно 6,5 – 45,0 и 3,5 – 11 мг на 100 г образца, что в большинстве случаев выше, чем в подстилающих гумусовых горизонтах и почвах берега.

Донные отложения верховьев заливов содержат 1 – 2 % азота и до 40 – 75% органического вещества, что существенно больше, чем в глубоководных пелокомплексах, где в серых илах накапливается 0,2 – 1,9% азота и до 5 – 14% органического вещества. Перегнойные горизонты почв содержат 3 – 8% гумуса и 0,09–0,8% общего азота. Дно незарастающей литорали сложено эродированными песчаными почвами, переходящими с глубиной в илистые пески, а затем в песчаные илы. Эта группа отложений характеризуется низкими показателями органического вещества (0,2 – 5,0%), гумуса (0,1 – 1,7%), азота (0,1 – 0,48%), подвижного фосфора (3,4 – 5,1 мг) и калия (5,0 – 10,0 мг на 100 г образца). Значительные площади дна Иваньковского водохранилища покрыты заболоченными и болотными почвами, служащими источником для образования торфяных илов. Затопленный торф и торфянистые илы, формирующиеся на различных глубинах, имеют однотипный состав и характеризуются повышенным содержанием органического вещества (65 – 85%) и азота (1,0 – 1,5%) [10,11,12].

Анализ экспедиционных данных свидетельствует об определенной связи некоторых свойств затопленных почв и степени и характера зарастания водохранилища высшей водной растительностью. Поверхностные горизонты почв аквакомплексов сильного зарастания характеризуются кислой реакцией, что можно объяснить подкисляющим (ацидифицирующим) воздействием процессов разложения органического вещества в условиях дефицита кислорода. В комплексах умеренного и слабого зарастания рН солевой вытяжки образцов возрастает до 4,95 – 5,15, что значительно выше, чем в почвах незарастающих акваторий (5,2 – 6,4). Концентрация подвижных форм фосфора нарастает в направлении от сплавин к слабозарастающим участкам заливов, находящимся в условиях слабой гидродинамической активности. В глубоководных русловых участках р. Шоши поверхностные слои ила содержали в этот период 4,5 – 9,7 мг  $P_2O_5$  на 100 г образца.

Содержание тяжелых металлов в золе водных растений аквальных комплексов различно, что связано как с условиями накопления (гидродинамической активностью, химическим составом донных отложений почв и сточных вод), так и с особенностями биологической аккумуляции химических элементов разными видами растений.

В периоды стабильного летнего стояния уровня воды и низкой гидродинамической активности водообмен в заливах замедляется, что создает условия к удерживанию тяжелых металлов водной растительностью и в дальнейшем их накоплению в донных отложениях и воде определяя миграцию этих элементов и создавая внутренний круговорот металлов и их сезонную динамику в защищенных аквальных комплексах.

Проведенные анализы позволили получить ряды средних показателей содержания металлов в растениях и донных отложениях биогенно-аккумулятивных аквальных комплексов верхневолжских водохранилищ. Анализ показал, что в водных растениях наиболее значительно накапливаются Mn и Zn. Осредненные показатели для различных видов растений колеблются соответственно в пределах: 23 – 56 мкг/г (для Mn) и 14 – 34 мкг/г (для Zn). При этом их максимальные абсолютные величины концентраций в условиях умеренного и слабого зарастания в 2 – 2,5 раза выше. В группу со средним накоплением от 3 до 6 мкг/г входят Ni, Pb, Co, в группу с показателями от 2 до 4 мкг/г следует отнести Cu и Cr. Наименее активно аккумулируется Cd (0,13 – 0,16 мкг/г).

В растениях зоны слабого зарастания тяжелые металлы аккумулируются в среднем в 1,5 – 2 раза активнее, чем в условиях сильного зарастания, что, видимо, связано с особенностями видового состава. Наиболее сильным поглотителем химических элементов являются телорез алоэвидный и некоторые виды рдестов. Это объясняет максимум суммарного показателя накопления металлов в условиях умеренного зарастания (110,7 мкг/г) [1, 11].

Минимальное накопление металлов отмечено в растительности открытых мелководий плесовых участков водохранилищ.

Наиболее значительные концентрации тяжелых металлов установлены в растениях заливов приплотинной части водохранилищ. Противоположная картина характерна для растительности открытых урочищ. Здесь содержание металлов в растениях нижних плесов несколько меньше (в 1,1 - 1,2 раза), чем на открытых мелководьях верховий водохранилищ. В растениях открытых плесовых мелководий содержится минимальное количество металлов (примерно в 1,5 раза меньше, чем в растениях открытых прибрежных комплексов).

Наиболее высокие показатели накопления тяжелых металлов в водной растительности аквальных комплексов в защищенных участках наблюдаются в местах сброса промышленных и коммунальных сточных вод в районе населенных пунктов. Так в заливах Иваньковского водохранилища

(Городнинский, Мошковичский, Видогощинский, Федоровский и др.) максимальные уровни содержания Mn составили 42 – 84 мкг/г, Zn – 29 – 46 мкг/г, Ni – 4,8 – 7,9 мкг/г, Cr – 5,0 – 5,9 мкг/г (что в 1,5–2 раза выше средних концентраций по водохранилищу) и Pb – 4,5 – 5,2 мкг/г, Co – 3,9 – 5,2 мкг/г, Cd – 0,15 – 0,17 мкг/г (в 1,2 – 1,5 раза выше средних концентраций по водохранилищу).

Наиболее экологически чистыми являются растения верхней части водохранилища в условиях речного ландшафта, а также участков озерно-речного ландшафта (открытые и защищенные урочища в районе заливов Бабня и Борцино, заостровного мелководья Юрятино и др.), не находящихся под воздействием антропогенного фактора.

В условиях водохранилища многолетнего регулирования накопление тяжелых металлов в водных растениях открытой литорали количественно совпадает по всем элементам с данными, полученными по Ивановскому водохранилищу.

По данным Т.Ф. Микряковой [8], в 5 км ниже г. Череповца среднее содержание Zn в растениях в 22 раза превышает среднее содержание этого элемента в Моложском плесе, Cu – в 4,6 раза, Ni – в 4,2 раза, Pb – в 2 раза, Co – в 3,7 раза, Cd – в 1,9 раза. В подверженных влиянию сточных вод металлургического предприятия растениях залива р. Кошты отмечено высокое содержание Zn и Cu по сравнению с Моложским плесом. Одни и те же виды (рдест гребенчатый) имели концентрацию Zn в 14 раз больше (до 332 мкг/г), чем за пределами зоны загрязнения. На расстоянии 20 км от Череповца содержание тяжелых металлов уменьшилось, однако оно осталось существенно выше, чем в растениях незагрязненных мест. Выяснилось, что наиболее устойчива к воздействию токсических веществ ряска малая, в которой содержание Zn достигало 915 мкг/г [8].

Исследования показали [10,11,12], что в пределах биогенно-аккумулятивных комплексов сплавин, сильного, умеренного и слабого зарастания прослеживается накопление органического вещества, соединений азота, фосфора и металлов.

Комплекс донных осадков защищенной литорали характеризуется преобладанием макрофитных отложений, затопленных почв и органоминеральных илов, сложенных преимущественно тонкодисперсными частицами. Тонкодисперсные фракции отложений обладают высокой аккумулярующей способностью по отношению к тяжелым металлам. Содержание частиц размером менее 0,01 мм коррелирует с содержанием металлов в донных осадках. Наиболее высокие коэффициенты корреляции отмечены для Fe, Mn, Ni, Pb, Cr ( $K = 0,6 - 0,75 \pm 0,02$ ), для Cu, Zn, Cd связь менее значительна ( $K = 0,5 - 0,58 \pm 0,03$ ) [4], что возможно связано с их частичным выносом из водоема вместе с водорослями. Выясняется, что многие металлы аккумулируются в фито- и зоопланктоне, фито- и



зообентосе, а затем частично выводятся из круговорота вещества вместе с ихтиофауной, потребляющей детрит. Так, Cd, Zn, Cu могут накапливаться в условиях развития сине-зеленых водорослей в количествах соответственно 53, 65 и 120 мг/л [2,4].

Наиболее значительное накопление металлов выявлено в пелагиально-профундальных аквакомплексах (в 2,5–20 раз выше фона по разным элементам). При этом наиболее существенно аккумулируются Zn, Ni и Cu.

В отложениях зоны зарастания Иваньковского водохранилища накапливаются кадмий, цинк, молибден, ванадий и др. в концентрациях, соответствующих их среднему содержанию в грунтовом комплексе водохранилища.

Активна аккумуляция металлов в заливах и в заостровных участках озерно-речного типа. При этом практически все элементы в заливах накапливаются в большей мере, чем в более проточных заостровных комплексах. Отложения заливов приплотинного озерного плеса в 1,5 раза больше накапливают металлов, чем в среднем в водоеме.

Среди биогенных комплексов максимальная аккумуляция наблюдается в донных отложениях и затопленных почвах в условиях умеренного и слабого зарастания. Эти аквакомплексы выделяются по накоплению свинца (больше в 1,5 раза), меди (в 1,4 раза), хрома (в 1,1–2 раза), марганца (в 2 раза) по сравнению со сплавидами и зоной сильного зарастания. Такое отличие вероятно связано с более активным выходом металлов из органических остатков отмирающей биоты в условиях разреженной растительности и воды обогащенной кислородом. В результате быстрого разложения «мягкой растительности» в водной среде с преобладающей окислительной обстановкой поглощенные гидробионтами металлы переходят в состав макрофитного органо-минерального ила.

Выявлены максимумы концентраций большинства тяжелых металлов в пределах водохранилищ. В условиях Иваньковского водохранилища наиболее значительное накопление металлов отмечено в биогенных комплексах Волжского плеса. Менее выражен этот процесс на Иваньковском и Шошинском плесах, где отмечены максимумы для трех и четырех химических элементов.

Наиболее экологически чистыми являются литоральные открытые аквакомплексы. В них донные отложения содержат минимальное количество тяжелых металлов, соответствующее фоновым показателям или даже менее фоновых (соотношение  $C_x$  к  $C_f$  изменяется от 0,2 до 1,0). В защищенных участках по заливам отмечено умеренное накопление металлов. В среднем для отложений приплотинного Омутнинского залива превышение над геохимическим фоном составляет от 2 до 8 раз. В аквакомплексах сильного зарастания содержание металлов в донных отложениях превышает фон в 2–7 раз. В условиях умеренного и слабого зарастания – в 1,5–14 раз.

Наиболее значительное накопление тяжелых металлов наблюдается в заливах, находящихся под влиянием сточных вод предприятий и населенных пунктов (например, в Ивановском водохранилище: Городнинский залив, Мошковичский залив, в Рыбинском водохранилище - зал. Кошта в районе Череповца и др.). 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) [8].

Донные отложения аквакомплексов водохранилищ имеют различное происхождение и по-разному концентрируют химические элементы. Тяжелые металлы обладают, как известно, обладают куммулятивной способностью и совместным действием на живые организмы. С этой точки зрения вызывают интерес суммарные показатели загрязнения грунтового комплекса. Количественная оценка состояния затопленных почво-грунтов в геохимии традиционно проводится на основе интегральной характеристики, которой является суммарный показатель СПЗ, определяемый как сумма превышений концентраций тяжелых металлов над природным фоном. По значениям СПЗ выделяют пять уровней загрязнения: 1 – менее 8 (отсутствует), 2 – 8 - 16 (низкий), 3 – 16 - 32 (средний), 4 – 32 - 48 (высокий), 5 – 48 - 64 (очень высокий). Нами проведены расчеты, позволяющие оценить загрязнение донных отложений Ивановского водохранилища по 10 изучаемым элементам.

Проведенные исследования позволили установить участки техногенного накопления тяжелых металлов в аквакомплексах заливов Ивановского водохранилища. Высокий уровень загрязнения донных отложений ( $\Sigma_{10} = 33,0$ ) выявлен в заливах Волжского плеса, находящихся под антропогенным воздействием, в Ивановском плесе отмечен средний уровень загрязнения ( $\Sigma_{10} = 26,4$ ) и в Шошинском плесе - низкий уровень загрязнения ( $\Sigma_{10} = 14,5$ ). Та же тенденция сохраняется при оценке загрязнения аквакомплексов разной степени зарастания. Так среди сплавин более загрязнены комплексы Ивановского и Волжского плесов ( $\Sigma_{10} = 17,7-18,5$ ). Наименьший уровень загрязнения по показателю СПЗ установлен для донных отложений сплавинных комплексов Шошинского плеса ( $\Sigma_{10} = 10,6$ ).

Высокий уровень загрязнения по суммарному показателю отмечен в аквакомплексах пелагиали ( $\Sigma_{10} = 18,3-35$  мг/кг). Наименьшее загрязнение установлено в почво-грунтах открытых мелководий, здесь оно низкое или практически отсутствует. Наиболее опасные техногенные аномалии приурочены к участкам пелагиали и защищенной литорали. Именно здесь могут возникнуть наиболее сложные экологически ситуации.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить высокую степень зарастания защищенных литоральных аквакомплексов водохранилищ. Густые заросли макрофитов образовали особые фитофильные комплексы, отличающиеся по свойствам природных компонентов и режиму от незарастающей литорали и глубоководных пелагиальных комплексов.

Активная седиментационная деятельность привела к накоплению на поверхности затопленных почв аккумулятивных горизонтов, представленных отложениями макрофитов и илов (в фитоаквакомплексах и пелоаквакомплексах). Эти отложения обогащены органическим веществом, гумусом, азотом, подвижными формами фосфора и калия.

Исследования показали, что в биогенно-аккумулятивных аквакомплексах литоральной зоны по заливам и за островами концентрация металлов в растениях по большинству элементов выше, чем в среднем по водохранилищу и существенно выше по сравнению с эрозионными участками. При этом наиболее активно аккумулируются Mn и Zn, слабее Cu, Co, Ni, Cr, Pb, в еще меньшей степени - Cd.

Прослеживается закономерность в аккумуляции металлов в водной растительности, формирующейся в условиях различной степени защищенности, гидродинамической активности и положения на акватории. Так, водные растения открытых участков накапливают существенно меньше металлов, чем в защищенных урочищах. При этом в открытых плесовых аквакомплексах в растениях содержатся минимальная концентрация металлов (в 1,5 раза меньше, чем в растениях открытых прибрежных комплексов).

Суммарные показатели загрязнения донных отложений, рассчитанные для Иваньковского водохранилища, в среднем составляют  $\Sigma_{10} = 18,01$ . Донные отложения Иваньковского и Волжского плесов относятся преимущественно к уровню среднезагрязненных, а донные осадки Шошинского плеса к уровню слабозагрязненных. Наиболее высокие СПЗ отмечены в заливах, находящихся под активным антропогенным прессом и в пелагиально-профундальных аквакомплексах долинных террас.

В сплавинах и аквакомплексах разной степени зарастания преобладает слабое загрязнение грунтов. Минимальный уровень загрязнения отмечен в эродированных почвах открытых мелководных аквакомплексов.

Анализ данных показывает существенные различия загрязнения донных отложений аквальных комплексов по плесам. Наиболее опасные техногенные зоны загрязнения располагаются в пелагиальных террасных аквакомплексах долинного типа и в условиях биогенно-аккумулятивных комплексов Иваньковского плеса. Близкие величины СПЗ характерны для донных отложений Волжского плеса. Минимальное загрязнение металлами по комплексному показателю наблюдается в условиях открытых мелководий Шошинского плеса.

Аквальные комплексы защищенных мелководий играют барьерную роль в накоплении тяжелых металлов как за счет донных отложений, так и водной растительности. При этом фитокомплексы усиливают этот процесс. Следовательно, биогенно-аккумулятивные аквальные комплексы защищают водохранилища от внешнего загрязняющего воздействия и усиливают самоочищение воды. Как показывают наблюдения, интенсивность этого процесса особенно выражена в условиях умеренного зарастания водоема. В то же время следует отметить, что накопление и удерживание металлов (прежде всего, Zn, Ni, Co и Cr) в растительности и донных отложениях аквальных комплексов заливов может способствовать формированию источников вторичного загрязнения водохранилища.

Полученные данные возможно использовать при расчете участия химических элементов в круговороте органико-минерального вещества в биогенно-аккумулятивных аквальных комплексах равнинных водохранилищ.

### **Список литературы**

1. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Катунин Д.Н. Тяжелые металлы в донных отложениях верхней и нижней Волги // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 587-595.
2. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в донных отложениях и высшей водной растительности Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 4. С. 441 – 447.
3. Григорьева И.Л. Анализ характеристик водохранилищ различного генезиса: автореф. на соиск. ученой степ. канд. геогр. наук: 11.00.07 - Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. М., 1996. 24 с.
4. Добровольский В.В Основы биогеохимии. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 400 с.
5. Довбня И.В. Продукция высшей растительности волжских водохранилищ // Тр. Ин-та биологии внутр. вод АН СССР. 1983. Вып. 48(51). С. 71-84.
6. Корелякова И. Л. Растительность Кременчугского водохранилища. Киев: Научная мысль, 1977. 198 с.
7. Левченко Л.П. Геолого-экологические исследования и картографирование территории Тверской области в масштабе 1:500000 // Эколого-медицинские аспекты состояния здоровья и среды обитания населения Тверской области и г. Твери. Тверь. 1999. С. 13 - 15.
8. Микрякова Т.Ф. Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях загрязнения водной среды // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. №2. С.253 - 255.

9. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Исследование мелководной прибрежной зоны водохранилищ верхней Волги // Тр. ИБВВ РАН. Вып. 33. 1976. С. 3-13.
10. Тихомиров О.А. Динамика аквальных комплексов равнинных водохранилищ. Тверь, 2008. 308 с.
11. Тихомирова Л.К., Тихомиров О.А., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П. Современное состояние аквальных комплексов заливов Иваньковского водохранилища // Экологические аспекты изучения природной среды. Тверь, 1997. С. 16–32.
12. Тихомиров О.А., Тихомирова Л.К., Кирпичникова Н.В. Эколого-геохимическая оценка загрязнения донных отложений аквальных комплексов Иваньковского водохранилища // Региональные геоэкологические исследования. Тверь, 2005. С. 3-20

### **ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF BIOGENIC AND ACCUMULATIVE WATER COMPLEXES OF UPPER VOLGA RESERVOIRS**

**O.A. Tikhomirov**

Tver State University, Tver

The article presents the ecological and geochemical characteristics of biogenic accumulative aquatic complexes, discusses the accumulation of organic substances and heavy metals in the aquatic complexes of the upper Volga reservoirs. An ecological and geochemical.

**Keywords:** *aquatic complex, nutrient accumulation, ecological-geochemical evaluation of the reservoir.*

*Об авторе:*

ТИХОМИРОВ Олег Алексеевич – доктор географических наук, профессор МНЭПУ, заведующий кафедрой физической географии и экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». 170021 Тверь, ул. Прошина, д. 3, корп. 2; tikhomirovoa@mail.ru.