

БОРИСОВ Михаил Янович

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ВОДОСБОР –
ОЗЕРО ВОЖЕ» И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РЫБНОЕ НАСЕЛЕНИЕ

03.00.16 – экология
03.00.10 – ихтиология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Петрозаводск – 2006

Работа выполнена в Вологодском государственном педагогическом университете и Вологодской лаборатории ФГНУ ГосНИОРХ

Научный руководитель: доктор биологических наук,
профессор Болотова Наталья Львовна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук,
профессор Лукин Анатолий Александрович
доктор химических наук,
профессор Фрумин Григорий Тевелевич

Ведущая организация Институт Озероведения РАН

Защита состоится «20» декабря 2006 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.190.01 при Петрозаводском государственном университете по адресу: 185640, РК, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Петрозаводский государственный университет. ~~эколого-биологический~~ факультет, ауд. № 326.
Факс: 8 (8142) 76-38-64

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петрозаводского государственного университета.

Автореферат разослан «19» ноября 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Крупень И. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время, когда многие экологические проблемы приобретают глобальный характер, все более актуальным становится изучение закономерностей функционирования иерархических систем. Представление об иерархической структуре природных объектов является одним из важнейших аспектов разработки теории функционирования водных экосистем (Алимов, 2000 и др.). В этом плане наглядным примером является влияние водосбора на озеро как подсистему и накапливающий элемент ландшафта. Общеизвестна зависимость состояния и развития озер от таких характеристик водосборов как почвы, растительность, гидрографическая сеть (Калесник, 1959; Дракцова, Сорокин, 1979; Шилькрот, 1975, 1979; Трансформация органического..., 1989; Григорьева и др., 2000 и др.). Эти природные компоненты связаны в одну систему через формирование водного баланса и стока, что в конечном итоге определяет параметры потока элементов, гидрохимический режим водоемов и продукционные характеристики.

При исследованиях влияния водосбора на озеро, а также при изучении негативных процессов в водоемах недостаточно внимания уделяется анализу миграции элементов и их многолетней динамике на основе синхронно собранных данных в звеньях подсистем. Это относится к формированию, перераспределению и миграции потока элементов в почвах, речной сети и озере как единой природной системе. Имеющиеся достаточно подробные исследования касаются отдельных компонентов водосбора, перераспределения элементов в почвах водосбора, влияния на иерархически нижележащую подсистему, закономерностей выноса элементов в водоем, взаимодействия трофических уровней, миграции биогенов из почв до уровня продуцентов, аэротехногенного загрязнения, седиментации тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях или анализа потока ТМ до уровня рыб, особенности аккумуляции ТМ (Решетников и др., 1982, 1999; Реакция экосистем..., 1983; Лукин, 1992; Комов, Лазарева, 1994; Кашулин и др., 1999; Перевозников, Богданова, 1999; Экология растающего..., 1999; Фрумин, 1999; Даувальтер, 2004; Ладожское озеро..., 2002; Регуляторная роль..., 2002; Шилькрот, Ясинский, 2002; Решетников, Попова, 2005; Моисеенко, 2006 и др.).

В то же время недостаточно разработан вопрос о связи между отдельными подсистемами и звеньями, через которые проходит поток элементов, условия его формирования, включая климат. Поэтому требуется анализ особенностей миграции элементов по ключевым звеньям цепи «атмосферные осадки – почва – вода и донные отложения притоков – вода и донные отложения озера – макрофиты – органы и ткани рыб» и их функциональной роли в единой системе «водосбор-озеро». Целесообразно использовать подход к изучению иерархической системы «водосбор – озеро» как целому по ключевым звеньям подсистем (почвы, речная сеть, озеро). Это охватывает сложную систему единой цепочкой через поток элементов от начального (атмосферные осадки) до конечного звена (рыбы). Следовательно, необходимо проследить цепи миграции элементов на примере главных групп потока элементов с водосбора (основных ионов, органических веществ, биогенов, ТМ), влияющих на процессы эвтрофирования, закисления, токсификации в водоеме.

Поток элементов через систему «водосбор–озеро» можно отнести к ключевому механизму взаимодействия подсистем и звеньев, то есть механизму функционирования, если его рассматривать с точки зрения взаимодействия элементов, определяющих свойства системы. Осмысление взаимосвязанности структур и процессов развития систем в целом и ключевых параметров функционирования перспективно в рамках синергетического подхода (Болотова, 1996, 1999, 2005). В отличие от системного подхода, где акцентируется внимание на связях частей целого, синергетика исследует динамику целостных свойств системы, состоящей из большого количества компонентов или взаимодействующих подсистем. Этому как раз соответствует задаче исследования системы «водосбор–озеро»

Большинство работ, посвященных изучению потока элементов с водосбора в водоем, представляют результаты исследований в трансформированных системах под влиянием антропогенных факторов. Поэтому важным представляется анализ рядов наблюдений за состоянием водосбора, речной сети и озера, включающих периоды незначительного хозяйственного воздействия, усиления нагрузки и ее ослабления в настоящее время. В этом плане анализ материалов наблюдений за ключевыми параметрами по данным 40-летнего периода дает возможность выявить долговременные тренды в системе «водосбор-озеро» и дать адекватную прогнозную оценку состояния водоема.

Трансформация параметров функционирования системы «водосбор-озеро» начинается с антропогенного преобразования водосборов, что вызывает изменения и в экосистемах водоемов. Последствия хозяйственного освоения водосборов особенно быстро вызывают изменения в первую очередь в мелководных озерах. Большое значение имеет, помимо площадного соотношения угодий, структура природных и антропогенных ландшафтов на водосборе (Алябина, Сорокин, 1983; Коплан-Дикс и др., 1985; Великорецкая, Калинина, 1988). Особенно выраженная зависимость состояния водоемов от водосбора проявляется в условиях равнинной территории, где расположено изучаемое озеро Воже, которая благоприятствует развитию речной сети и формированию стока. Л. А. Жаковым (1984) была рассмотрена история формирования рыбной части сообщества озера Воже во взаимосвязи с этапами лимногенеза, ландшафтной обусловленностью, климатом и их резкими изменениями. Это можно рассматривать как попытку анализа процессов самоорганизации системы «водосбор – озеро» (Болотова, 1999, 2005).

В настоящее время ухудшение качества водной среды и биологических ресурсов происходит в водоемах с разным уровнем хозяйственной эксплуатации (Драбкова, Трифонова, 1994; Комов, Лазарева, 1994; Моисеенко и др., 1996; Болотова, 1999, 2005; Ладожское озеро..., 2002; Бикбулатов и др., 2003; Структура и функционирование..., 2004). Это связано с вовлечением в глобальный массопоток все новых веществ, что нарушает сложившуюся систему геохимических циклов элементов. В этом отношении особый интерес представляет антропогенная трансформация так называемых «фоновых» озер, которые располагаются на малоосвоенных территориях. К таким водоемам в пределах Вологодской области относится озеро Воже.

Цели работы. Изучить особенности миграции элементов по цепи «почва – притоки – водосем – биота» как ключевого механизма функционирования системы «водосбор - озеро Воже». Оценить влияние водосбора на процессы эвтрофирования, токсификации, закисления и изменение состояния рыбного населения бассейна озера Воже.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть особенности водосбора озера Воже с позиций формирования потока элементов, влияния климата и рассчитать поступление элементов с атмосферными осадками.
2. Проанализировать состояние почвенного покрова водосбора как источника поступления в речную сеть элементов, влияющих на процессы эвтрофирования, закисления и токсификации.
3. Определить факторы, влияющие на миграцию элементов (основные ионы, биогенные элементы, тяжелые металлы) и особенности выноса веществ с речным стоком.
4. Изучить особенности перераспределения элементов в воде и донных отложениях озера Воже.
5. Выявить роль сообществ гидробионтов в миграции элементов в системе «притоки – озеро Воже».
6. Оценить накопление тяжелых металлов в тканях и органах рыб, а также рассмотреть влияние эвтрофирования и токсификации на состояние рыбной части сообщества притоков и озера Воже.
7. Проанализировать роль отдельных звеньев цепи «атмосферные осадки – почва – вода и донные отложения притоков – вода и донные отложения озера – макрофиты – органы и ткани рыб» в функционировании системы «водосбор - озеро Воже».

Защищаемые положения:

1. Ключевым механизмом функционирования системы «водосбор-озеро» является поток элементов, связующий в единое целое ее подсистемы, почву, речную сеть, озеро.

2. Ключевые звенья, через которые проходит поток элементов в системе «водосбор – озеро Воже», составляют цепь «атмосферные осадки – почва – вода и донные отложения притоков – вода и донные отложения озера – макрофиты – органы и ткани рыб».

3. Природные черты водосбора «фоновое» озера Воже при слабой антропогенной нагрузке, стимулируют процессы эвтрофирования и токсификации, но в то же время играют буферную роль по отношению к закислению почв и водоемов.

4. Сообщества гидробионтов, с одной стороны, играют важную роль в миграции и перераспределении веществ в системе «водосбор-озеро», что связано с видоспецифичностью биоаккумуляции. С другой стороны, поток элементов, его состав и интенсивность определяют изменения разных трофических уровней гидробионтов. Это включает изменения продукционно-деструкционных процессов, пищевых цепей, приводит к сдвигу в структуре рыбного населения особенно заметного при эвтрофировании и ухудшает состояние особей, вследствие токсификации притоков и озера Воже.

Научная новизна. Впервые изучена миграция элементов в системе «водосбор-озеро Воже» по цепи «атмосферные осадки – почва – вода и донные отложения притоков – вода и донные отложения озера – макрофиты – органы и ткани рыб». Выявлено формирование буферных свойств,

потока органического вещества, биогенных элементов и тяжелых металлов в почвах водосбора озера Воже как главном источнике их поступления в водоем. Выполнено геохимическое районирование водосбора и выделены зоны, отличающиеся по степени влияния на экосистему озера Воже, что связано с разными условиями аккумуляции и миграции элементов.

Исследовано влияние снегового покрова водосбора озера Воже на формирование рН-эпизода и интенсивность поступления ТМ в речную сеть. Изучено накопление тяжелых металлов в воде и донных отложениях притоков озера Воже. Исследовано состояние экосистем рек Вожеги, Модлоны, Пунемы, Тинготомки, Тордоксы, Пустой. Выявлено значение топографии речной сети для формирования пространственной структуры, интенсивности и состава потока элементов в озеро Воже. Впервые для озера Воже как «фонового» водоема со слабой антропогенной нагрузкой на водосбор проанализированы особенности его токсификации. Установлено накопление в значительных количествах тяжелых металлов (11 элементов) в воде, донных отложениях, макрофитах и мышечной ткани рыб озера Воже. Проведено подробное исследование накопления ТМ в мышечной ткани, печени, почках, жабрах, гонадах и сердце основных промысловых видов рыб озера Воже и реки Вожеги. Впервые проведен сравнительный анализ изменения состояния ключевых звеньев системы «водосбор-озеро Воже» на основании обобщения имеющихся многолетних рядов наблюдений (от 150 до 20 лет) по различным параметрам.

Практическая значимость. Результаты работы используются для оценки условий обитания гидробионтов озера Воже при ежегодной разработке общих допустимых уловов рыбы (ОДУ) на крупных водоемах Вологодской области в рамках федеральных и областных программ. Материалы исследования по накоплению тяжелых металлов в воде, донных отложениях, в тканях макрофитов, в тканях и органах разных видов рыб служат целям ихтиотоксикологического мониторинга крупных рыбопромысловых водоемов Вологодской области, который реализуется в рамках программы госзаказа Министерства сельского хозяйства РФ. Данные по изучению состояния рыбной части сообщества бассейна озера Воже использованы для выполнения международного проекта с Центром охраны окружающей среды Финляндии по созданию Красной книги Вологодской области. Том. 3. «Животные».

Данные исследований включены в ежегодный государственный доклад Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области (2005 г.). Материалы исследования необходимы для разработки региональной Концепции рационального природопользования и охраны природных ресурсов на водосборе озера Воже.

Результаты изучения закономерностей функционирования системы «водосбор-озеро Воже» положены в основу проекта «Перспективность развития слабонарушенных территорий для экологического туризма на примере бассейна озера Воже Вологодской области», принятого на Всероссийский конкурс «Моя страна – Моя Россия» в рамках традиционной общественной программы «Надежда России».

Результаты работы применяются в рамках вузовской программы в преподавании курсов «Зоология позвоночных», «Общая экология», «Эко-

логия животных» и спецкурсов «Экология водных экосистем», «Экотоксикология».

Апробация работы. Материалы диссертации обсуждались на заседаниях кафедры зоологии и экологии ВГПУ, научно-производственных совещаниях Вологодской лаборатории ФГНУ ГосНИОРХ и были представлены на 22 научных собраниях разного уровня. Это две научно-практические конференции студентов и аспирантов ВГПУ (Вологда, 2001, 2003), региональная научно-практическая конференция (Сокол, 2002), четыре всероссийские научно-практические конференции (Вологда, 2003, 2004; Пенза, 2003; Сыктывкар, 2004), две молодежные конференции (Сыктывкар, 2004, 2005), международная школа – конференция молодых ученых (Пушино, 2005), семь международных конференций (Апатиты, 2004, 2006; Архангельск, 2005; Борок, 2005; Вологда, 2005; Санкт-Петербург, 2005, 2006), Международный контактный форум по сохранению местообитаний в Баренцевом регионе (Сыктывкар, 2005), международный симпозиум по изучению инвазионных видов (Борок, 2005), IX Съезд Гидробиологического общества РАН (Тольятти, 2006), зарубежная конференция (Минск, 2003), зарубежный форум «World Water Week in Stockholm» (Стокгольм, 2006).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов и списка литературы. Она содержит 242 страницы текста, включая 62 рисунка, 28 таблиц, список литературы из 365 наименований, в том числе 36 на иностранном языке.

Благодарности. Считаю своим долгом выразить глубокую благодарность моему учителю и научному руководителю доктору биологических наук, профессору Наталье Львовне Болотовой за ценные советы и моральную поддержку. Выражаю свою признательность всем сотрудникам Вологодской лаборатории ФГНУ ГосНИОРХ за помощь при сборе и обработке материала и особенно директору Н. В. Думнич за оказанную большую практическую помощь.

ГЛАВА I. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние водосбора на экосистему озера Воже изучалось через выявление функциональной роли отдельных ключевых звеньев системы «водосбор-озеро» (атмосферные осадки, почва, вода и донные отложения притоков и озера, сообщества) в миграции элементов. Материалом для анализа послужили собственные исследования 2001–2006 г. г. и обширные фондовые данные различных служб мониторинга и научных организаций с 1929 по 2006 г. г.

Собственные исследования включали сбор и аналитическую обработку проб воды, донных отложений, тканей и органов рыб озера Воже и его притоков. Пробы воды и донных отложений для анализа, который проводился в аттестованной лаборатории ФГУ ГЦАС «Вологодский», отбирались в разные сезоны года на 10 постоянных станциях (рис. 1). В воде определялись рН, концентрации основных ионов, тяжелых металлов (ТМ), органических веществ, биогенных элементов (всего 33 показателя); донных отложениях – содержание органических веществ, биогенов и ТМ

(всего 18 показателей). Для установления влияния талых вод на закисление притоков озера Воже с 10 апреля по 28 мая 2005 года ежедневно измерялась величина рН воды реки Вожеги рН метром – милливольтметром.



Рис. 1. Карта-схема станций мониторинга и собственных наблюдений

Для кормовых растений на пахотных угодьях бассейнов основных притоков, макрофитов и рыб озера Воже рассчитывался коэффициент биологического накопления (Перельман, 1975). Для выявления аккумулятивной роли водного сообщества в миграции ТМ были выбраны ключевые виды гидробионтов на уровне продуцентов и консументов. В озере Воже при «макрофитном» пути сукцессии к ним относится доминирующий среди погруженной водной растительности рдест блестящий. Среди рыб – это лещ как наиболее массовый вид озера Воже в водоеме «лещового» типа. Исследовался уровень накопления 11 элементов (Fe, Zn, Mn, Cu, Pb, Cr, Ni, Co, Cd, As, Hg) в макрофитах и мышечной ткани рыб. Анализы проводились методом атомно-адсорбционной спектрометрии в аттестованной лаборатории ФГУ ГЦАС «Вологодский».

Кроме того, изучалось перераспределение четырех ТМ (Zn, Cu, Pb, Cd) в тканях и органах рыб (мышцы, печень, почки, жабры, гонады и сердце). Для этого были выбраны 7 промысловых видов рыб озера Воже (судак, щука, окунь, налим, плотва, лещ, язь) и 4 доминирующих вида реки Вожеги (щука, плотва, окунь, елец). Ткани и органы для анализа отбирались от свежепойманной рыбы в период осенней траловой съемки и весенних контрольных уловов ставными сетями 2004 – 2005 г. г. Кусочки тканей и органов помещались в герметичный полиэтиленовый пакет и замораживались. Всего было отобрано и проанализировано 404 пробы от 80 особей рыб. Анализ концентрации ТМ проводился автором в лаборатории экологической токсикологии ФГНУ ГосНИОРХ (г. Санкт-Петербург). Органическую матрицу удаляли путем сжигания пробы в электропечи при контролируемой температуре. Результирующий раствор анализировался методом инверсионной вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала на твердом электроде из стеклоуглерода в присутствии ионов двухвалентной ртути на приборе СБА-1БМ согласно аттестованным методикам (Брайнина и др., 1988, Временная инструкция..., 1995).

Для выявления трендов в изменении состояния подсистем (почвы, речная сеть, озеро) в системе «водосбор-озеро Воже» использовалась, созданная автором электронная база данных, в которую внесено порядка 500 тыс. измерений. Для этого были собраны, обобщены и проанализированы первичные фондовые данные и карты государственных служб мониторинга, природоохранных организаций, научных учреждений, сельскохозяйственных предприятий и других природопользователей за период с 1929 по 2006 г. г. Они включают информацию о геологическом строении территории, динамике физических и химических свойств почв, площади и структуре сельскохозяйственных угодий, дозах внесения удобрений, концентрации элементов в кормовых растениях, площадях вырубки леса, динамике численности населения, количестве и химическом составе атмосферных осадков, ветровом и температурном режимах атмосферного воздуха, гидрологических показателях озера Воже и его притоков, температуре и химическом составе их воды, величине и структуре промышленных и научно-исследовательских уловов рыбы. Общая схема расположения участков мониторинга основных государственных служб (ВЦГМС и ФГУ ГЦАС «Вологодский») представлена на рисунке 1.

Для пространственного анализа различных параметров и характеристик водосборного бассейна озера Воже использованы ГИС-технологии и построена 31 карта. База ретроспективных данных была дополнена материалами собственных исследований и проведена их математическая обработка. Обработка информации произведена по стандартным методикам (Ивантер, Коросов, 2003) с использованием пакетов STATISTICA 5.5, MS Excel, MapInfo Professional 5.0.

ГЛАВА II. ВОДОСБОР И ОЗЕРО КАК ЕДИНАЯ ПРИРОДНАЯ СИСТЕМА (литературный обзор).

В главе рассмотрена история развития представлений о системе «водосбор-озеро». Особое внимание уделено анализу известных особенностей функционирования отдельных ее подсистем (почвы, гидрографическая сеть, экосистема водоема). Приведены литературные данные о влиянии зональных и аazonальных особенностей на условия выноса веществ с водосбора, гидрологический и гидрохимический режим озер, биологические процессы. Обсуждается роль водосбора в процессах закисления, эвтрофирования и токсификации водоемов и их влияние на рыбное население. Наиболее изученным аспектом влияния водосбора на озеро является роль стока биогенных и органических веществ из почв на процесс эвтрофирования водоема. В тоже время недостаточно разработан вопрос о связи между отдельными подсистемами и звеньями, через которые проходит поток элементов. Требуется целостный анализ особенностей миграции элементов по ключевым звеньям цепи «атмосферные осадки – почва – вода притоков – вода и донные отложения озера – макрофиты – рыбы» и их функциональной роли в единой системе «водосбор-озеро». Это предполагает в первую очередь рассмотрение таких ключевых подсистем как почвы, гидрографическая сеть водосбора и экосистема водоема.

ГЛАВА III. РОЛЬ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКА ЭЛЕМЕНТОВ НА ВОДОСБОРЕ

В главе рассматриваются особенности почвенного покрова водосбора озера Воже, как начального звена в миграции элементов с водосбора в водоем. Особое внимание уделено влиянию природных и антропогенных факторов на формирование потока элементов.

Характеристика почвенного покрова и факторы его формирования. Показано, что проанализированные отличия почв по физическим и химическим свойствам определяют сложную картину перераспределения элементов и условий выноса веществ с водосбора в водоем. Это обусловлено крайне разнообразным почвенным покровом в пределах обширного водосбора озера Воже ($S=5870 \text{ км}^2$). Прослежено влияние климатических условий территории, растительности, рельефа, почвообразующих пород и характера хозяйственного освоения территории как факторов формирования почв на основании анализа многолетних рядов наблюдений. Дана характеристика почв подзолистого, дерново-подзолистого, дернового типов, их полугидроморфных разновидностей, а также подзолисто-болотных и болотных в отношении влияния их свойств на миграцию и перераспределение элементов на водосборе.

Формирование потока элементов в почвах водосбора озера Воже. В разделе дается подробный анализ закономерностей формирования буферных свойств почв, перераспределения в них гумуса, фосфора и ТМ. Установлено, что подвижность элементов в почвах и степень уязвимости территории водосбора озера Воже к кислотным осадкам связана с кислотнейтрализующими свойствами почв. В этом плане следует отметить выявленные значительные отличия рН почв, сформировавшихся на разных породах. В целом, высокую устойчивость к закислению водосбора озера Воже создают карбонатные ландшафты, которые занимают большую часть его территории. Выявлено, что в почвах этих ландшафтов усиливается аккумуляция гумуса (2 – 9%), фосфора (87 – 250 мг/кг), накапливаются ТМ и отмечено повышенное содержание в почвенно-грунтовых водах гидрокарбонатов, катионов кальция и магния. Рассчитано, что с атмосферными осадками может поступать в год до $0,8 \text{ т/км}^2$ нитратов, $3,7 \text{ т/км}^2$ хлоридов и сульфатов, но несмотря на это на большей части водосбора озера Воже сохраняются высокие буферные свойства почв. Установлено, что по такому критерию как степень насыщенности почв основаниями, порядка 70% пахотных земель относятся к классу наименее чувствительных к кислотным нагрузкам.

Отмечено, что на водосборе озера Воже, расположенном в гумидной зоне, основная роль в миграции элементов принадлежит органическому веществу. Это связано с высокой химической активностью гуминовых и фульвокислот. В составе последних биогенные элементы и ТМ обладают высокой подвижностью. Установлены отличия в содержании гумуса в разных типах почв при максимальных концентрациях в дерново-карбонатной тяжелосуглинистой, а минимальной – в подзолистой песчаной (рис. 2). Отмечается повышение средней концентрации гумуса в пахотных почвах водосбора озера Воже с 2,9% в 1973 году до 3,6% в 2001 г.

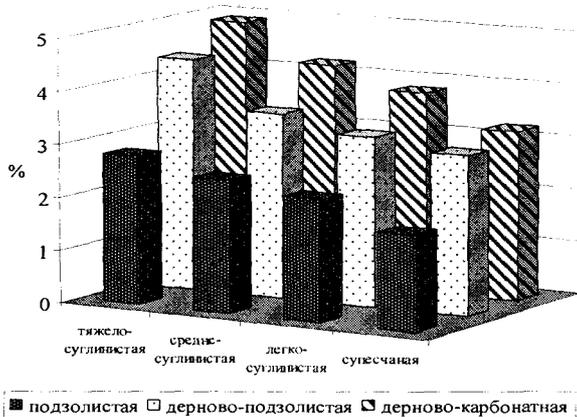


Рис. 2. Содержание гумуса (%) в разных типах почв водосбора озера Воже в зависимости от механического состава

Приоритетность органического вещества в перераспределении фосфора показывает рассчитанная линейная зависимость его концентрации от содержания гумуса, которая описывается уравнением $y = 19,2x + 20,4$ ($R^2 = 0,67$). Это определяет важную роль органического вещества в миграции биогенных элементов с водосбора озера Воже. Как и для гумуса, более высокое содержание фосфора отмечается в дерново-карбонатных почвах ($101 \pm 2,6$ мг/кг), а минимальное – в подзолистых ($51 \pm 2,5$ мг/кг). Установлено значительное изменение условий формирования потока фосфора при сельскохозяйственном освоении. Так, за последние 35 лет средняя концентрация фосфора в пахотных почвах водосбора озера Воже увеличилась вдвое (с 71 до 152 мг/кг). Это вызвано внесением фосфорных удобрений, максимальные величины которых были характерны для 1978-1982 г. г. и составляли 80 кг/га. В настоящее время в структуре пахотных угодий преобладают почвы с высоким (151–250 мг/кг) и повышенным (101–150 мг/кг) содержанием фосфора (рис. 3). Выявленной динамике содержания фосфора в почвах соответствуют изменения его концентрации в воде притоков и озера, что рассматривается как доказательство стимулирующего влияния освоения водосбора на эвтрофирование водоемов.

Также установлена значимость водосбора для процесса токсификации озера Воже. Выявлена сложная картина в формировании потока ТМ в почвах. В наибольшей степени интенсивность потока ТМ из почв определяется содержанием в них гумуса и степенью насыщенности основаниями почвенно-поглощающего комплекса (табл. 1). Следует отметить важную сдерживающую роль дерново-карбонатных почв, занимающих значительную часть водосбора озера Воже, для поступления ТМ в гидрографическую сеть. В дальнейшем эти токсикианты, попадая в водную среду, увеличивают свою миграционную активность и интенсивно накапливаются гидробионтами, включая рыб.

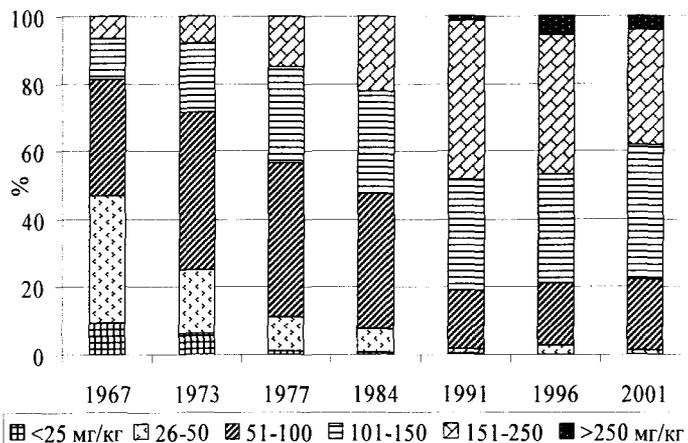


Рис. 3. Динамика структуры пахотных почв водосбора озера Воже по содержанию фосфора (1967-2001 г.г.)

Отметим, что существенную роль в перераспределении элементов на водосборе также играет растительность. Так, расчет коэффициентов биологического накопления ТМ кормовыми растениями по данным 1997–2005 г. г. показал значительную интенсивность накопления 10 элементов (Zn, Mn, Cu, Pb, Cr, Ni, Co, Cd, As, Hg) клевером красным и тимофеевкой луговой.

Таблица 1

Корреляционная зависимость между валовым содержанием тяжелых металлов и характеристиками свойств почв водосбора озера Воже

Свойства почв /ТМ	Cu	Zn	Pb	Cd	Mn	Co	Ni	Cr
механический состав	0,12	-0,05	-0,14	-0,18	-0,34	0,11	0,22	0,25
pH	0,25	-0,01	0,16	0,06	-0,19	0,14	0,23	0,41
содержание гумуса	0,6	0,56	0,47	0,53	0,3	0,53	0,49	0,48
содержание P ₂ O ₅	0,07	0,01	0,23	0,26	0,07	0,03	0,07	0,08
сумма поглощенных оснований	0,4	0,34	0,39	0,33	0,1	0,34	0,33	0,48

Анализ пространственного распределения в почвах водосбора таких показателей как pH, содержание гумуса, фосфора, тяжелых металлов, условий миграции элементов и степени влияния на экосистему озера Воже позволил провести геохимическое районирование и вычленить три зоны. Выделены главные факторы, определяющие неоднородность в формировании состава и интенсивности выноса веществ, к которым относятся почвообразующие породы и рельеф.

Следует отметить особое значение первой зоны, в которой при избыточном увлажнении создаются условия для аккумуляции элементов и их быстром поступлении в озеро в период весеннего половодья. Здесь, наряду с заболачиванием, накоплению элементов способствует высокое

содержание в почвенно-грунтовых водах гидрокарбонатов. В дерново-карбонатных глееватых почвах, которые преобладают под сельскохозяйственными угодьями, отмечается высокое содержание фосфора, тяжелых металлов.

Вторая зона, где распространены карбонатные породы, играет важную роль в нейтрализации кислотных осадков, снижении подвижности фосфора и тяжелых металлов, способствует повышенному выносу в водоем гидрокарбонатов, кальция и магния.

Для третьей зоны с кислыми условиями характерна высокая миграционная активность элементов и их вынос в гидрографическую сеть. Этому способствует также более высокая сельскохозяйственная освоенность восточных участков водосбора. Однако удаленность этой зоны от водоема снижает ее общую значимость для озера Воже при трансформации элементов в процессе миграции по речной сети. Таким образом, выполненное геохимическое районирование, позволило оценить пространственную картину влияния водосбора на озеро Воже.

ГЛАВА IV. РОЛЬ РЕЧНОЙ СЕТИ В МИГРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ С ВОДОСБОРА В ОЗЕРО ВОЖЕ

Реки играют роль связующего звена в миграции элементов между водоемом и его водосбором. Тем более что для озера Воже притоки являются главным источником поступления веществ и составляют порядка 88% общей приходной части водного баланса.

Факторы, влияющие на миграцию элементов с речным стоком. В разделе рассматривается влияние структуры речной сети, гидрологического режима, степени антропогенной трансформации водосборов рек на вынос веществ в озеро Воже. Влияние водосбора на экосистему озера Воже усиливает хорошо развитая речная сеть, представленная 22 притоками. Установлено влияние структуры речной сети на состав, параметры выноса и накопление в донных отложениях элементов в двух основных притоках – реках Модлоне и Вожеге. Для бассейна реки Модлоны характерна сложная структура со значительной ролью притоков, большим количеством малых озер и высокой заболоченностью территории. Это определяет низкую интенсивность выноса веществ и высокую их аккумуляцию в грунтах. Так, в донных отложениях реки Модлоны, которые представлены илстыми и глинистыми породами, выявлены высокие концентрации органических веществ, биогенных элементов и ТМ (табл. 2).

Таблица 2

Содержание веществ в донных отложениях рек Вожеги и Модлоны (в среднем за 2003 – 2005 г.г.)

Река	Органика, %	Р мин	N мин	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺
Модлона	5,3	115	19,4	16932	228	34	17,6
Вожега	0,3	42	6,3	3224	37	7,4	2,2

Напротив, в реке Вожеге содержание элементов в донных отложениях ниже, а интенсивность выноса веществ, особенно минеральных, выше. Этому способствует «коридорный» тип строения сети, в котором цен-

тральное положение занимает сама река Вожега, а многочисленные притоки значительно уступают ей по величине. Кроме того, ее водосбор имеет низкую заболоченность и более разнообразные геохимические условия. Максимальные величины выноса веществ характерны для весеннего половодья, на которое приходится около 70% годового стока рек. Таким образом, выявлена пространственная и сезонная неоднородность потока элементов с водосбора за счет топографических особенностей речной сети. Дальнейшее формирование параметров потока элементов специфично в разных реках, характеризуется сезонной динамикой и зависимостью от природных и антропогенных факторов.

Миграция элементов с речным стоком. В разделе анализируются особенности формирования буферной емкости речных экосистем, миграции органических веществ, биогенных элементов и ТМ, что необходимо для выявления процессов эвтрофирования и токсификации водоемов.

Установлены значительные сезонные колебания состава элементов в воде притоков, что связано с перераспределением источников питания рек. Изучение рН-эпизода весной 2005 года показало, что в половодье наблюдается снижение рН в воде реки Вожеги при интенсивном поступлении талых вод (рис. 4).

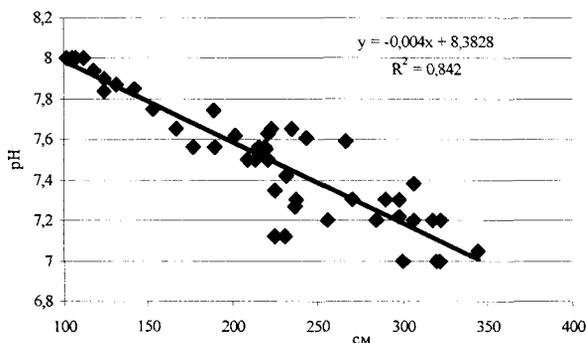


Рис. 4. Зависимость рН от уровня воды реки Вожеги (апрель-май 2005 года)

В ионном составе на фоне снижения общей минерализации уменьшается доля гидрокарбонатов и увеличивается доля сульфатов, которая, например, для реки Модлоны, может достигать 45 экв%. Это свидетельствует о снижении буферных свойств к закислению притоков в весенний период, на фоне которого стимулируется подвижность тяжелых металлов. Тем более, что для этого же периода установлены максимальные концентрации ТМ в воде притоков. Так, в воде реки Вожеги содержание ионов кадмия выше предшествующего зимнего периода в 6 раз, Al^{3+} – 3, Cu^{2+} и Zn^{2+} – 2, Pb^{2+} и Ni^{2+} – 1,5 раза. На территорию водосбора озера Воже, в пределах которого нет промышленных предприятий, ТМ поступают с дальним воздушным переносом и, накапливаясь в снежном покрове в течение продолжительной зимы, весной выносятся с реками в озеро Воже. Исследования химического состава снега (1997-2005 г. г.) показали присутствие в нем: Zn^{2+} (26 мкг/л), Fe^{2+} (23 мкг/л), Al^{3+} (17 мкг/л),

Mn²⁺(12мкг/л), Pb²⁺(11 мкг/л), As³⁺(8 мкг/л), Cr³⁺(6 мкг/л), Cu²⁺(5 мкг/л), Ni²⁺(2,3 мкг/л), Cd²⁺(1,6 мкг/л), Co²⁺(1,2 мкг/л), Hg⁺(0,03 мкг/л). При этом содержание Zn²⁺, Mn²⁺, Cu²⁺ и Pb²⁺ превышало установленные нормы ПДК.

Во второй фазе половодья после таяния снега и повышения температуры усиливается вынос элементов из почв в гидрографическую сеть. Так, например, по многолетним наблюдениям за качеством воды реки Вожеги средняя концентрация минерального фосфора в мае (0,058 мг/л) превышает его содержание в марте–апреле (0,027 мг/л) более чем в 2 раза. Максимальные концентрации минерального фосфора в воде притоков озера Воже в 2004 – 2005 годах были выявлены для рек, в структуре водосборов которых значительную долю (16 – 18%) занимают сельскохозяйственные угодья (табл. 3). На большое значение почв и их хозяйственного освоения в поступлении фосфора указывает его многолетняя динамика в воде притоков. В частности, в воде реки Вожеги максимальные концентрации минерального фосфора наблюдались в начале 1990-х годов при его высоком содержании в почвах водосбора.

Таблица 3

Показатели антропогенной нагрузки на притоки озера Воже (2002 год).

Показатели	Вожега	Моллона	Пунема	Тинготомка	Гордокса
Площадь водосбора, км ² .	1980	2300	144	55	105
Численность населения, чел.	3236	1134	479	116	26
Плотность населения, чел/ км ²	1,6	0,5	3,3	2,1	0,3
Площадь сельхозугодий, км ²	121	47	23	11	6,3
Освоенность, %	6	2	16	18	6
Площадь пашни, км ²	85	27	17	7,8	2,1
Распаханность, %	4,3	1,2	11,8	14,2	1,9

В летне-осенний период главным источником питания рек являются почвенно-грунтовые воды, что определяет основную роль почв водосбора в формировании химического состава воды притоков озера Воже. В этот период установлены высокие показатели минерализации воды при интенсивном выносе из почв катионов и анионов. При этом более высокие концентрации минеральных веществ характерны для воды реки Вожеги, большая часть водосбора которой располагается в зоне распространения карбонатных моренных отложений. Так, средняя концентрация гидрокарбонатов и кальция в августе–сентябре 2004 года превышала их содержание в других реках в 1,5–2,0 раза. Это свидетельствует о восстановлении буферных свойств воды притоков и связано с влиянием почв карбонатных ландшафтов водосбора.

Установлено, что почвы в этот период также являются основным источником поступления ТМ в речную сеть. Это подтверждается большой схожестью рядов распределения средних концентраций содержания ТМ в почвах водосбора и речной воде. Выявленный для почв ряд (Al>Fe>Mn>Zn>Cr>Ni>Pb>Cu>Co>Cd>Hg) незначительно отличается в воде притоков, за счет большего содержания Fe по сравнению с Al, а также Cd с Co.

Подземные воды, которые влияют на состав потока элементов с водосбора, имеют большое значение в питании рек как летом при продолжи-

тельной сухой погоде, так и в зимнюю межень. Кроме того, поступление элементов с подземными водами изменяет пространственную картину потока веществ с водосбора. Это связано с особенностями распространения коренных пород на водосборе озера Воже. Так, залегание в пределах бассейнов притоков северо-восточной части озера Воже (Ханега, Пустая, Тордокса) сульфатсодержащих пород (ангидриты, гипсы) обуславливает переход воды в меженные периоды в сульфатный класс. В то же время в воде реки Вожеги, которая протекает по территории, где коренные породы представлены известняками, содержание гидрокарбонатов увеличивается. Так, например, в сентябре 2005 года в конце длительной межени доля гидрокарбонатов в анионном составе воды реки Вожеги составляла 88 экв%, в реке Пустой не превышала 29 экв%, а сульфатов 11 экв% и 70 экв% соответственно.

Таким образом, состав и интенсивность потока веществ в речном стоке значительно изменяется в течение года, что обусловлено гидрологическим режимом при смене основных источников питания. Установлена роль снегового покрова в потоке элементов на примере кислотной и токсической нагрузки. Доминирующее положение речного притока в общей приходной части водного баланса озера Воже определяет основное значение рек в поступлении веществ в водоем. По проведенным расчетам в 2003–2005 г. г. в озеро Воже с притоками поступило около 98% годового количества сульфатов, 92% – фосфора, 83% – тяжелых металлов, 78% – хлоридов.

ГЛАВА V. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРЕ ВОЖЕ

Состояние озера как накапливающего элемента ландшафта определяется с одной стороны поступлением веществ с водосбора, а с другой, их перераспределением в озерной экосистеме, которое зависит от особенностей самого водоема. В главе рассматривается влияние на миграцию элементов в экосистеме озера Воже таких его характеристик как морфометрия котловины, уровневый режим, водный баланс, динамика водных масс, характер донных отложений. Подробно анализируются особенности формирования буферной емкости, динамики содержания органического вещества, биогенных элементов, тяжелых металлов, что связано с процессами эвтрофирования и токсификации озера Воже.

Факторы, влияющие на поток элементов в экосистеме озера Воже. Озеро Воже площадью 418 км² является остаточным мелководным водоемом, образовавшимся в период дегляциации вепсовской стадии валдайского ледника. Незначительные глубины (максимальная не превышает 5 м) и большая площадь во многом определяют особенности перераспределения поступающих с речным стоком элементов. Небольшой объем самого озера при значительном притоке речных вод обеспечивает высокий водообмен и неустойчивый химический состав воды. Большая площадь и малые глубины озера способствуют ветровому перемешиванию водной толщи и взмучиванию донных осадков. Их состав в свою очередь зависит от морфометрических особенностей озерной котловины и динамики водных масс. На юге донные отложения представлены преимущественно илами, а на севере – песчаными и глинистыми отложениями. Мелковод-

ность озера способствует летом прогреваемости водной толщи, а зимой ее промерзанию на значительной площади до дна. Таким образом, выше перечисленные факторы определяют неустойчивый химический состав воды озера Воже, особенности перераспределения элементов по его акватории, между донными отложениями, водной толщей и биотой.

Динамика элементов в абиотических звеньях экосистемы озера Воже. Для озера Воже при большом количестве притоков и разном их химическом составе характерна сезонная и пространственная неоднородность ионного состава воды. Последний является основным компонентом буферной емкости озерных вод к закислению. Как и в притоках, наименьшие значения минерализации и pH воды в озере Воже характерны для весеннего половодья. Выявлена зависимость минерализации от уровня воды озера Воже (рис. 5). В конце летней межени в северной части озера Воже при поступлении подземных сульфатных вод с притоками (Пустая, Тордокса, Ханега) и из источников в пределах самого водоема наблюдается переход воды в сульфатный класс. Это определяет уязвимость северной части озера Воже к закислению при дополнительном поступлении сульфатов с атмосферными осадками до 1,5 тыс. т. в год согласно проведенным расчетам по данным 1994–2005 г.г.

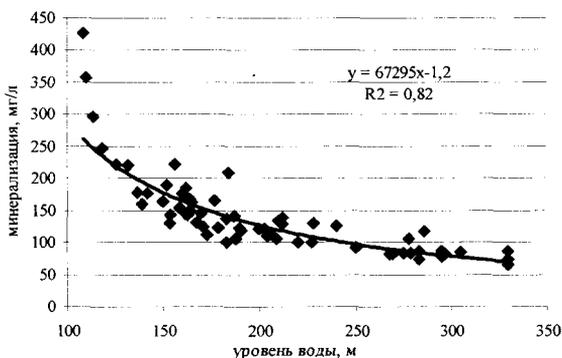


Рис. 5. Зависимость минерализации от уровня воды озера Воже (1977–1993 г.г.)

В то же время в южную часть озера Воже с речным стоком (Модлона, Евжа, Вондонга) поступают кислые болотные воды с высоким содержанием органических веществ. Наряду с внутриводоемными процессами это определяет большее накопление органических веществ в южной части озера Воже, где показатели цветности, бихроматной и перманганатной окисляемости почти в два раза выше, чем в северной части.

Особый интерес, на фоне уязвимости экосистемы озера Воже к эвтрофикации (в условиях высокого естественного содержания фосфора в почвах карбонатных ландшафтов и заболоченных участках водосбора), представляет миграция биогенных элементов. Важная роль водосбора как источника поступления биогенов отражается на их сезонной динамике. Так, максимальное содержание общего фосфора (0,09 мг/л) отмечается во второй фазе весеннего половодья (май) и в осенние паводки (октябрь). Вследствие повышения внешней фосфорной нагрузки концентрация об-

1374769

щего фосфора в воде озера Воже в 1980-х годах в сравнении с 1970-ми увеличилась в 2 раза, а минерального – в 4 раза. В 1990-2000-е годы при интенсивном развитии фитопланктона и макрофитов, среднее содержание общего фосфора уменьшилось до 0,04 мг/л, около 50% которого было представлено минеральной формой. Таким образом, выявленные показатели динамики биогенов в озерной воде свидетельствуют об эвтрофикации озера Воже.

Для выявления другого негативного процесса в экосистеме озера – токсификации, проанализированы особенности многолетней и сезонной динамики содержания ТМ в воде и донных отложениях озера Воже. Показано, что в 2001–2006 годах в сравнении с 1990-ми средняя концентрация цинка увеличилась в 1,5 раза, а меди – в 2,5 раза. Это связано с увеличением количества их выпадений с осадками на территорию водосбора и дальнейшим поступлением с речным стоком в озеро. Установлены более высокие концентрации цинка и меди в период весеннего половодья и осенних паводков, когда наблюдаются максимальные величины стока рек. Так, например, среднее содержание меди в весенний период превышало концентрацию предшествующей зимней межени в 2,5 раза, а цинка – в 2 раза. Сравнительный анализ многолетних данных по содержанию цинка и меди в воде озера Воже подтверждает ухудшение токсикологической ситуации.

В целом в воде озера Воже ряд 10 элементов по средней их концентрации имеет аналогичный вид, что и в притоках. В 2003 – 2005 годах среднее содержание общего железа в воде озера Воже составило 495 мкг/л, алюминия – 53 мкг/л, марганца – 31 мкг/л, цинка – 8 мкг/л, хрома – 10 мкг/л, свинца – 6,7 мкг/л, никеля – 5,9 мкг/л, меди – 5,1 мкг/л, кадмия – 3,0 мкг/л, кобальта – 2,4 мкг/л.

Важным звеном в перераспределении элементов в экосистеме озера Воже являются донные отложения, о чем свидетельствуют выявленные достоверные отличия ($P > 0,05$) в содержании меди и цинка в поверхностном и придонном слоях воды. Более низкие концентрации ТМ в придонном слое воды, очевидно, связаны с сорбцией и осаждением при высоком содержании в воде взвешенных и органических веществ. Установлено высокое содержание в донных отложениях ТМ, которые превышают их концентрации в воде от нескольких сотен до тысяч раз.

Донные отложения являются важным звеном внутреннего механизма перераспределения биогенных элементов за счет их аккумулирующей роли в экосистеме. Так, в грунтах озера Воже депонированы фосфор и азот, средние концентрации которых в 2003–2005 годах составляли 88 и 25 мг/кг соответственно. В то же время они являются и вторичным источником поступления биогенов и тяжелых металлов в водную толщу. Этому способствует как частое взмучивание в период открытой воды, так и неустойчивые окислительно-восстановительные условия на протяжении длительного подледного периода.

Таким образом, перераспределение элементов в экосистеме озера Воже является сложным процессом, который связан с миграцией элементов в воде, их накоплением в донных отложениях, и отличается в северной и южной частях водоема. Проанализированные многолетние данные по миграции веществ с водосбора в водоем позволили выявить ускорение

процесса эвтрофирования при увеличении потока биогенов за счет внесения удобрений в почвы. Влияние водосбора на токсификацию водоема носит неоднозначный характер, так как одни почвы из-за своих свойств и антропогенной трансформации увеличивают подвижность ТМ, а другие – их аккумулируют. Процесс токсификации усугубляется на фоне значительного поступления ТМ с атмосферными осадками, которые выпадают на водосбор и накапливаются в снеговом покрове. В целом водосбор отличается высокими буферными свойствами к закислению, уровень которого зависит от чередования маловодных и многоводных фаз увлажнения. Выявленные неблагоприятные процессы соответственно влияют на состояние сообществ.

ГЛАВА VI. ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОТОКА ЭЛЕМЕНТОВ И БИОТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ «ПРИТОКИ – ОЗЕРО ВОЖЕ»

С одной стороны, сообщества гидробионтов играют важную роль в миграции веществ в системе «водосбор-озеро», что связано с избирательным поглощением и преобразованием элементов живыми организмами. При этом интенсивность потока по биотической составляющей зависит от доступности элементов гидробионтам и развития трофических уровней экосистемы. С другой стороны, поток элементов, его состав и интенсивность определяют изменения в структуре и количественных показателях разных трофических уровней. Это включает изменения продукционно-деструкционных процессов, пищевых цепей, приводит к сдвигу в структуре рыбного населения особенно заметного при эвтрофировании и ухудшает состояние особей, вследствие токсификации притоков и озера Воже.

Роль сообществ гидробионтов в миграции элементов в системе «притоки-озеро Воже». Отличия в уровне развития в озере Воже и его притоках фитопланктона, как начального звена в миграции элементов по биотической составляющей, косвенно отражает разную интенсивность потока биогенов. Следует отметить большую роль фитопланктона (диатомовых, синезеленых, зеленых и криптофитовых водорослей) в миграции фосфора, азота, кремния в экосистеме озера Воже в сравнении с его притоками за счет их более высоких количественных показателей. Установлено, снижение концентрации биогенных элементов в воде озера Воже в июле при максимальном развитии фитокомплекса.

Другим продуцентом, который утилизирует и перераспределяет поток биогенных элементов в подсистеме «притоки – озеро Воже» является высшая водная растительность. Тем более, что акватория озера и притоков характеризуется высокой степенью зарастания, что служит индикатором интенсивного поступления биогенов. Следует отметить повышение доли в общей структуре зарослей таких погруженных растений как *Potamogeton lucens* L, *P. perfoliaris* L. Это в свою очередь увеличивает скорость оборота элементов при быстром разложении погруженных растений. Так, например, установлены высокие концентрации ТМ, которые превышали их содержание в воде от десятков до нескольких тысяч раз, в тканях рдеста блестящего собранного в озере Воже.

На дальнейшее перераспределение потока элементов большое влияние оказывают трофические отношения и количественные показатели

популяций консументов разных уровней. Роль зоопланктонного и зообентосного сообществ в миграции элементов связана с их значением как кормовой базы для рыб. Установлено, что уровень развития кормового зоопланктона и зообентоса выше в озере Воже, чем в притоках, что косвенно отражает большую интенсивность потока элементов через пищевые цепи. Тем самым определяется роль зоопланктона и зообентоса в миграции элементов как связующего звена между продуцентами и высшим трофическим уровнем – рыбами. В свою очередь поток элементов через рыбную часть сообщества связан с составом ихтиофауны, соотношением видов и их пищевыми отношениями.

Влияние природных и антропогенных факторов на состояние рыбной части сообщества системы «притоки-озеро». В разделе рассмотрены вопросы, связанные с влиянием состава ихтиофауны и его динамики на перераспределение ТМ за счет видоспецифичности аккумуляции элементов. Кроме того, изменение структуры рыбного населения является индикатором процессов эвтрофирования и токсификации, темпы которых в значительной мере определяются влиянием водосбора. Поэтому проанализировано формирование видового состава, связанного с комплексом причин (исторических, природных, антропогенных).

Отметим, что исходно формирование ихтиофауны озера Воже связано с историей четвертичного периода при глобальных изменениях климата и гидрографической сети. В целом к середине XX века в водоеме сформировалось разнообразное по видовому составу, фаунистическим комплексам и экологическим группам рыбное население. Этому способствовали благоприятные для обитания и воспроизводства разных видов рыб условия озера Воже и его притоков. Здесь имелись как песчаные с высоким содержанием кислорода и низкой температурой, так и заросшие хорошо прогреваемые летом участки.

Во второй половине XX века при эвтрофировании озера Воже, которое было вызвано повышенным выносом биогенных веществ с водосбора, абиотические условия изменились в неблагоприятную для оксифильных и псаммофильных видов сторону. В результате из состава ихтиофауны озера Воже исчезают или переходят в категорию редких наиболее требовательные к условиям обитания виды (пескарь, елец, хариус, голец, голянь, сиг, ряпушка, снеток). При этом увеличилась численность эврибионтных и фитофильных видов таких как окунь, плотва, лещ, уклейка. Не соответствие условий воспроизводства и откорма, на фоне снижения численности кормового бентоса, привели к измельчанию наиболее массовых видов (лещ, окунь, плотва). При этом в рыбном сообществе усилилась эврифагия и хищничество. Для снижения численности мелкочастиковых видов и улучшения структуры уловов в 1987 году был вселен судак, который быстро сформировал промысловую популяцию и сейчас является вторым по величине улова видом. В последнее десятилетие в бассейне озера Воже отмечается 22 вида рыб, относящихся к отрядам карпообразных (10), лососеобразных (6), окунеобразных (3), трескообразных (1), скопенообразных (1) и колюшкообразных (1).

Смена видового состава, динамика численности рыб, изменения пищевых отношений служат факторами аккумуляции и перераспреде-

ния ТМ на верхнем трофическом уровне. Так, в озере Воже установлено значительное накопление рыбами 11 тяжелых металлов (Fe, Zn, Cu, Pb, Mn, Co, Ni, Cr, Cd, Hg, As). Общая картина миграции ТМ по биотической составляющей усложняется за счет разной способности элементов к биоаккумуляции. Так, рассчитанные по средней концентрации элементов в воде и мышечной ткани леща коэффициенты биологического накопления составили для Hg^{+} 1400, Zn^{2+} (687), As^{3+} (600), Cu^{2+} (85), Cd^{2+} (70), Co^{2+} (67), Pb^{2+} (56), Fe^{2+} (44), Ni^{2+} (32), Cr^{3+} (11), Mn^{2+} (6). В целом в мышцах леща озера Воже в наибольших количествах отмечено железо, далее по убывающей следуют цинк, медь, свинец, марганец, кобальт, никель, хром, кадмий, ртуть и мышьяк.

Механизмом перераспределения ТМ среди рыбного населения являются пищевые цепочки, и разные экологические группы рыб отличаются по степени накопления токсических веществ. Однако, исследования накопления наиболее приоритетных элементов (Zn, Cu, Pb, Cd) в организмах основных промысловых видов рыб озера Воже не подтвердили принятую в литературе общую схему возрастания содержания элементов по трофической цепи планктофаги > бентофаги > хищники. Вероятно, это связано со сложным характером миграцией ТМ по пищевой цепи и эврифагией, свойственной рыбам северных водоемов.

Среди мирных рыб озера Воже более высокие концентрации ТМ выявлены в мышцах плотвы и язя, в рационе которых значительную долю составляет высшая водная растительность (рис. 6). На уровне хищников накопление тяжелых металлов определяется спектром потребляемых жертв и их размерами. Так, максимальные концентрации ТМ в мышцах хищных рыб озера Воже выявлены у щуки, что связано с питанием этого вида более крупными жертвами.



Перераспределение потока элементов в рыбной части сообщества происходит не только на видовом уровне, но и на уровне особи. Установлено, что в организмах рыб озера Воже разные органы и ткани отличаются по уровню накопления элементов. В большинстве случаев наибольшее содержание ТМ характерно для таких органов как почки и печень, а наи-

меньшее в мышцах.

Подробные исследования содержания четырех элементов в органах и тканях рыб озера Воже показали следующие ряды накопления.

Zn: почки > жабры > гонады > печень > сердце > мышцы;

Cu: сердце > почки > печень > гонады > жабры > мышцы;

Pb: почки > печень > сердце > жабры > гонады > мышцы;

Cd: почки > печень > жабры > гонады > мышцы > сердце.

Следует подчеркнуть, что накопление тяжелых металлов в мышечной ткани является важным аспектом оценки качества рыбной продукции. Тем более, что озеро Воже относится к одному из трех основных рыбопромысловых озер области, а его притоки используются для любительского рыболовства. Поэтому проблема токсификации бассейна озера Воже связана с вопросами здоровья населения. Установлено, что из четырех элементов (цинк, медь, свинец и кадмий) превышение ПДК в мышечной ткани выявлено для кадмия, что связано с высокой миграционной активностью этого металла в пределах водосбора озера Воже. Так средняя концентрация этого металла в 2004–2005 г. г. превышала установленную норму у язя из озера Воже в 4 раза, плотвы – 3 раза, леща – 2,5 раза, окуня – в 2 раза, плотвы из реки Вожеги – в 2,5 раза, щуки – 2 раза. При установленном для рыбной продукции ПДК кадмия в 0,1 мг/кг было выявлено превышение его концентрации у всех исследованных экземпляров плотвы, щуки и язя, 78% леща и 57% окуня озера Воже и 33% окуня из реки Вожеги. Таким образом, поступление ТМ с водосбора в озеро Воже усиливает его миграцию по биотической составляющей, о чем свидетельствуют высокие их концентрации в тканях и органах рыб как высшем трофическом уровне. Следует отметить превышение ПДК в мышцах большинства промысловых видов рыб такого опасного токсического элемента как кадмий.

ГЛАВА VII. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ВОДОСБОР – ОЗЕРО ВОЖЕ» (обсуждение результатов)

Проведенные исследования наглядно демонстрируют зависимость процессов в озерной экосистеме от состояния его водосборной территории. Это определяется высокой ролью притоков в формировании приходной части водного баланса озера Воже. В условиях мелководности водоема и высокого уровня водообмена выявлена выраженная зависимость качества озерных вод от химического состава воды притоков. В свою очередь состояние речных экосистем водосбора обусловлено многофакторным влиянием составляющих его природных компонентов, климатическими особенностями территории и антропогенной трансформацией. Система «водосбор-озеро» представляет собой иерархию подсистем (почвы, речная сеть, озеро), связанных потоком элементов. Среди них миграция основных ионов, органических веществ, биогенов и тяжелых металлов соответственно определяет динамику физико-химических параметров среды, скорость продукционных процессов и эвтрофирования, а также вероятность закисления и токсификации. Поэтому изучение параметров потока элементов, его состав, интенсивность и перераспределение в звеньях подсистем дает представление в целом о функционировании сис-

темы «водосбор-озеро». Это дало основание рассматривать ключевым механизмом функционирования системы «водосбор – озеро» миграцию элементов с водосбора в водоем, которая представляет собой многоэтапный, многокомпонентный, многофункциональный процесс. Это обусловлено:

- особенностями элементов и веществ, входящих в состав потока (подвижность, растворимость, способность к комплексообразованию, биофильность, токсичность);
- спецификой сред, через которые мигрируют элементы, включая воду, воздух, твердые тела, живые организмы;
- особенностями звеньев экосистемы, включая атмосферные осадки, почвы, воду притоков и озера, донные отложения притоков и озера, биоту;
- влиянием природных факторов (климат, рельеф, геологическое строение, гидрографическая сеть);
- трансформацией потока при антропогенном воздействии (промышленность, лесное хозяйство, сельское хозяйство, акклиматизация, рыболовство).

В рамках данного подхода к функционированию системы «водосбор-озеро» установлена важная роль органических веществ в миграции элементов с водосбора в озеро Воже, что в целом характерно для северных экосистем. Так, выявлена зависимость концентрации биогенных элементов и ТМ в почвах водосбора озера Воже от содержания гумуса. Высокие концентрации органических веществ в воде озера Воже и его притоков снижают миграционную активность и биодоступность металлов, способствуют их накоплению в донных отложениях. Следует отметить, что выявленное высокое содержание кальция в почвах и воде также снижает интенсивность миграции элементов. Выявлена разная биофильность элементов, которая определяет интенсивность миграции по биотической составляющей. Кроме таких биофильных элементов как углерод, азот, фосфор и кремний установлена высокая интенсивность накопления живыми организмами ТМ.

Выявлено, что сложный механизм миграции элементов в системе «водосбор-озеро Воже» определяется особенностями сред. В этом плане следует отметить особое значение водной среды, которой принадлежит основная роль в миграции веществ с водосбора в водоем. Высокая способность воды растворять вещества определяет их вынос из твердой фазы, а ее текучесть – пространственное перемещение и аккумуляцию элементов в пониженных участках рельефа.

Твердым частичкам пыли, почвы, донных отложений свойственна способность к сорбции элементов. Это определяет более высокие концентрации элементов в твердых фазах (почвы, донные отложения). Так, например, выявлено, что содержание некоторых ТМ в донных отложениях и почве превышает их концентрацию в воде в несколько тысяч раз. В воздушной среде частицы пыли адсорбируют из окружающего пространства элементы, способствуют образованию капель воды и снега, которые в дальнейшем при выпадении атмосферных осадков поступают на водосбор озера Воже.

Особенности миграции элементов через живые организмы связаны с избирательностью накопления как на видовом, так и на организменном уровнях. Установлены значительные различия в концентрациях ТМ в тканях наземных и водных растений, тканях и органах рыб.

Функционирование системы «водосбор-озеро» зависит от особенностей организации ее отдельных подсистем: почва, гидрографическая сеть озерная экосистема. Особую роль в этом процессе играет почва как источник поступления элементов в водоем. При исследовании особенностей миграции элементов установлено ведущее значение почвенного покрова в формировании буферных свойств воды озера, состава органического вещества, биогенных элементов и тяжелых металлов. Среди характеристик почв наибольшее влияние на состав и интенсивность потока веществ оказывают почвообразующая порода, механический состав, содержание гумуса, степень насыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями. Установлена важная роль почв водосбора озера Воже в формировании буферных свойств, состава органических веществ, биогенных элементов и тяжелых металлов. Выявлена пространственная неоднородность условий формирования и интенсивности выноса веществ с водосбора в речную сеть, что позволило провести геохимическое районирование и выделить три зоны.

Связующим звеном между водосбором и водоемом является речная сеть. Установлено влияние на состав и интенсивность миграции элементов в притоках озера Воже таких характеристик как топография речного бассейна, степень антропогенной трансформации водосборов, гидрологический режим. Большое влияние также оказывает интенсивность аккумуляции элементов донными отложениями и извлечение их биотой.

Распределение потока элементов в озере Воже зависит от его морфометрических характеристик, динамики водных масс, гидрологического режима. Установлено, что южная и северная части озера Воже отличаются по условиям перераспределения в них элементов. Так, для южной части характерно высокое содержание органических веществ и биогенных элементов в воде и донных отложениях, а на севере значительные сезонные колебания ионного состава воды.

Важная роль в миграции элементов в системе «водосбор – озеро» принадлежит сообществам гидробионтов. Особенности развития продуцентов, как начального звена в миграции элементов косвенно свидетельствуют о высокой интенсивности потока биогенных элементов и тяжелых металлов. Зоопланктонное и зообентосное сообщества играют роль промежуточного звена в миграции элементов от продуцентов к рыбам. При этом перераспределение элементов в рыбной части сообщества зависит от пищевых отношений рыб. Так, среди мирных рыб установлены высокие концентрации ТМ в организме фитофагов, а среди хищных в наибольшее их содержание характерно для щуки, которая потребляет наиболее крупных жертв.

Среди природных факторов наибольшее влияние на разные этапы миграции элементов, обеспечивающих функционирование экосистемы «водосбор-озеро Воже», оказывает климат. Это связано с его воздействием на состав элементов через дальний перенос и за счет перераспреде-

ния источников питания, а также с влиянием на интенсивность потока элементов через изменение гидрологического и температурного режимов территории.

На состав и интенсивность миграции элементов влияет хозяйственное освоение как водосбора озера Воже, так и сопредельных территорий. Выявлено, что главной причиной ускорения эвтрофирования озера Воже послужило сельскохозяйственное освоение водосбора. Причем, это связано не столько с площадью сельскохозяйственных угодий (5% от общей), а сколько с расположением трансформированных земель в наиболее уязвимых участках водосбора с позиций интенсивного выноса элементов (долины основных притоков). В то же время, причиной токсификации бассейна озера Воже является дальний атмосферный перенос тяжелых металлов.

ВЫВОДЫ

1. Анализ природных компонентов водосбора озера Воже показал влияние на формирование потока элементов свойств почвенного покрова, зависящих от особенностей геологического строения территории, рельефа, растительности и климатических условий.

2. Высокое разнообразие почв по типам, механическому составу и химическим свойствам определяет сложную картину перераспределения элементов и условий выноса веществ с водосбора в водоем. Установлены достоверные отличия в рН, содержании гумуса, фосфора, тяжелых металлов в разных типах почв. Наибольшее влияние на перераспределение фосфора и тяжелых металлов в почвах оказывает содержание в них органических веществ и степень насыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями.

3. Выявлена пространственная неоднородность почв по таким показателям как рН, содержание гумуса, фосфора, тяжелых металлов, что позволило выделить три геохимические зоны, отличающиеся по условиям формирования и интенсивности выноса веществ в речную сеть.

4. Рассмотренные отличия в топографии речной сети притоков озера Воже оказывают влияние на состав, интенсивность выноса и накопление элементов в донных отложениях. Для притоков характерны сезонные отличия в составе и интенсивности потока элементов, что связано с перераспределением источников питания.

5. В экосистеме озера Воже элементы перераспределяются за счет миграции в воде, накопления в донных отложениях, а их состав и интенсивность аккумуляции отличаются в северной и южной частях водоема. Выявлено ускорение процесса эвтрофирования при увеличении выноса биогенов с водосбора за счет внесения удобрений в почвы. Процесс токсификации усугубляется при значительном поступлении ТМ с атмосферными осадками. Вследствие интенсивного выноса катионов с водосбора сохраняются высокие буферные свойства вод к закислению.

6. Выявлена высокая интенсивность потока биогенов по биотической составляющей экосистемы озера Воже, о чем косвенно свидетельствуют показатели развития фитопланктона и сезонная динамика содержания биогенов в воде. Установлены высокие уровни накопления ТМ в тканях макрофитов.

7. Механизмом перераспределения ТМ в рыбной части сообщества являются пищевые цепи. В организме мирных рыб озера Воже наибольшее содержание ТМ выявлено для фитофагов (плотва и язь). Среди хищных видов самые высокие концентрации характерны для щуки, потребляющей наиболее крупных жертв. В организме рыб в наибольших количествах ТМ накапливаются в органах детоксикации (почки и печень), а в наименьших – в мышцах.

8. Ключевым механизмом функционирования системы «водосбор-озеро» является миграция элементов через ее подсистемы (почва, речная сеть, озеро). Установлены особенности миграции биогенов и ТМ по звеньям цепочки «атмосферные осадки – почва – вода и донные отложения притоков и озера – макрофиты – органы и ткани рыб».

9. Анализ многолетних мониторинговых наблюдений позволил выявить тренд увеличения содержания в почвах, воде притоков и озера общего и минерального фосфора, всех форм азота и органических веществ. Установлена многолетняя стабильность буферных свойств почв, рН и ионного состава воды притоков

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Борисов М. Я. Роль почв водосбора озера Воже в формировании кислотнейтрализующей способности его вод // Молодые исследователи – региону: Матер. Всерос. науч. конф. студентов и аспирантов. – Вологда, 2003. – С. 13–15.
2. Борисов М. Я. Влияние сельскохозяйственного природопользования на эвтрофирование озера Воже // Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: Матер. Всерос. конф. – Пенза, 2003. С.25–27.
3. Болотова Н. Л., **Борисов М. Я.** Влияние антропогенной трансформации водосборов на крупные озера Вологодской области // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Матер. Межд. конф. Ч. 1. – Апатиты, 2004. С. 35–37.
4. Борисов М. Я. Изменение содержания фосфора в почвах водосбора озера Воже и его влияние на эвтрофирование водоема // Вестник НСО. «Исследования биологического и ландшафтного разнообразия Вологодской области». – Вологда, 2004. С. 8–13.
5. Борисов М. Я. Влияние водосбора озера Воже на его органическое загрязнение // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. XI молодеж. науч. конф. – Сыктывкар, 2004. С. 39–40.
6. **Борисов М. Я.**, Болотова Н. Л. Оценка ландшафтного разнообразия водосбора озера Воже // Проблемы особо охраняемых природных территорий Европейского Севера: Матер. науч.-практич. конф. – Сыктывкар, 2004. С. 15–17.
7. Болотова Н. Л., **Борисов М. Я.**, Думнич Н. В., Коновалов А. Ф., Сергеева И. С., Шабунов А. А. Состояние водоемов Вологодской области и проблема сохранения редких видов // Межд. контакт. форум по сохранению местообитаний в Баренц. регионе. – Сыктывкар, 2005. С. 30–31.
8. Bolotova N. L, **Borisov M. Ya.**, Dumnich N. V., Kononov A. F. Specific features of the function “drainage area–Vozhe lake” system // Aquatic Ecology at the Dawn of XXI Century. – St-Petersburg, 2005. – P.12.

9. Болотова Н. Л., Коновалов А. Ф., Думнич Н. В., **Борисов М. Я.**, Сергеева И. С. Рыбы – вселенцы в водоемах Вологодской области // Чужеродные виды в Голарктике: Тез. докл. Межд. симпозиума по изучению инвазионных видов. – Борок, 2005. – С. 138–139.
10. Борисов М. Я. Влияние кислотности на подвижность марганца в почвах водосбора озера Воже Вологодской области // Биология – наука XXI века: Тез. докл. Межд. школы – конф. – Пушкино, 2005. – С. 228.
11. Борисов М. Я. Динамика содержания биогенных элементов в воде и донных отложениях реки Вожеги // Актуальные проблемы биологии и экологии: Тез. докл. XII молодеж. науч. конф. Сыктывкар, 2005. – С.35-36.
12. Борисов М. Я. Миграция элементов в системе «водосбор–озеро Воже» и их накопление в рыбе // Экологическое состояние континентальных водоемов Арктической зоны в связи с промышленным освоением северных территорий: Тез. докл. Межд. конф. – СПб, 2005. С. 19.
13. Борисов М. Я. Миграция тяжелых металлов в системе «водосбор–озеро Воже» и их накопление в рыбе // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территории. СПб.: Наука, 2005. С.248-257.
14. Борисов М. Я. Токсикологическое загрязнение озера Воже и его притоков // Современные проблемы водной токсикологии: Тез. докл. Межд. конф. – Борок, 2005. – С. 17–18.
15. Borisov M.Ya. Toxicological pollution of the lake Vozhe and its tributary // «Modern problem of aquatic toxicology» international conference in commemoration of Dr. Prof. Flerov. – Borok, 2005. – P. 19–20.
16. **Борисов М. Я.**, Расплетина Г. Ф. Динамика ионного состава воды озера Воже и его притоков // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Матер. Межд. конф. – Вологда, 2005. С. 77-79.
17. **Борисов М. Я.**, Коновалов А. Ф., Тропин Н. Ю. Современное состояние популяции речного окуня (*Perca fluviatilis* L.) в условиях токсификации озера Воже // Тез. докл. IX Съезда Гидробиологического общества РАН. Т. I. – Тольятти, 2006. – С. 53.
18. Болотова Н. Л., **Борисов М. Я.** Факторы формирования ихтиофауны озера Воже Вологодской области // Тез. докл. IX Съезда Гидробиологического общества РАН. Т. I. – Тольятти, 2006. – С. 49.
19. Bolotova N. L., **Borisov M. Ya.** The influence of drainage area on the anthropogenic transformation of Vozhe Lake // World Water Week in Stockholm. Beyond the River – Sharing Benefits and Responsibilities. – Stockholm, 2006. P. 254-255.
20. Борисов М. Я. Современное состояние рыбной части сообщества реки Вожеги Вологодской области // Вестник Поморского университета: Серия «Естественные и точные науки», №3 – 2006. – С. 21–26.
21. Борисов М. Я. Тяжелые металлы в почвах водосбора озера Воже Вологодской области // Современные экологические проблемы Севера: Матер. Межд. конф. Ч. 1. – Апатиты, 2006. – 150-153.
22. Борисов М. Я. Накопление тяжелых металлов в тканях и органах леща как показатель токсического загрязнения озера Воже // Биоиндикация в экологическом мониторинге пресноводных экосистем: Тез. докл. Межд. конф. – СПб., 2006. – С. 23–24.