

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИВПС НА ВОДОЕМАХ КАРЕЛИИ

Н.М. Калинкина, Т.М. Тимакова, Т.П. Куликова, Т.А. Чекрыжева, А.В. Рябинкин, М.Т. Сярки, Е.В. Теканова, Т.Н. Полякова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН
Петрозаводск, просп. А. Невского, д. 50

Основная цель фундаментальных гидроэкологических исследований заключается в познании механизмов функционирования, развития и управления водными экосистемами в естественном состоянии и при антропогенном воздействии (Алимов, 2000). Пути и методы достижения этой цели базируются на системном и историческом подходах. Главным объектом гидробиологических исследований, согласно данным принципам, является структурно-функциональная организация биотической составляющей водной экосистемы, изучаемая одновременно на разных уровнях иерархии с учетом эволюционного аспекта отношений между биотой и средой обитания.

Исследования, нацеленные на решение важнейших теоретических и практических задач гидробиологии, проводятся в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН в рамках следующих основных направлений:

- изучение структуры и функционирования основных трофических уровней биоты - бактерио-, фито-, зоо- планктона, макрозообентоса и их многолетних изменений в разнотипных водных экосистемах;
- типизация водных экосистем по гидробиологическим показателям;
- реакция биологических сообществ на различные виды антропогенных воздействий и их трансформация под влиянием различных факторов;
- оценка продуктивности и качества вод по гидробиологическим показателям и развитие системы биологического мониторинга;
- изучение биологического разнообразия в водоемах на особо охраняемых территориях Карелии и сопредельных регионах;
- изучение становления и эволюции пресноводной биоты.

Объектами исследования являются крупные, средние и мелкие водоемы и водотоки. В центре внимания находятся: крупнейшие озера – Онежское и Ладожское (Онежское озеро, 1999; Ладожское озеро, 2000); водоемы-водоприемники сточных вод целлюлозно-бумажной и горно-рудной промышленности – Выгозеро, система озер Куйто (Гидробиология Выгозерского водохранилища, 1978; Влияние техногенных вод., 1995), небольшие озера, испытывающие влияние различных типов антропогенной нагрузки на водосборной площади (Современное состояние..., 1998; Куликова, 2004).

Широкий круг специалистов лаборатории гидробиологии позволяет проводить комплексные исследования, охватывающие основные внутриводоемные процессы и звенья водных экосистем, включая: первичное продуцирование органического вещества; бактериальные продукционно-деструкционные процессы и функциональные группы бактерий; сообщества бактериопланктона, фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, макрофитов; влияние биотических и абиотических факторов различной природы, в том числе и антропогенной, на жизнедеятельность организмов, популяций и сообществ гидробионтов.

При изучении водных экосистем применяются традиционные и новые методы, натурные съемки и наблюдения, лабораторные исследования и эксперименты. Среди них следует отметить продукционные исследования, базирующиеся на принципах, основанных Г.Г. Винбергом (1960), и заключающиеся в определении первичной продукции и деструкции органического вещества, в том числе, радиоуглеродным методом. В последние годы проводятся ихтиологические исследования, используются гистологические биомаркеры загрязнения водоемов, применяются современные информационные технологии и методы. На основе результатов 40-летних наблюдений за состоянием планктонных и бентосных сообществ разнотипных водоемов сформированы базы гидробиологических данных. Для анализа результатов полевых наблюдений и лабораторных исследований используются методы визуализации, многомерной статистики, а также стохастическое, имитационное моделирование и ГИС-технологии.

Цель настоящей работы – представить основные результаты и перспективы развития гидробиологических исследований водоемов Карелии на современном этапе.

Исследование экосистемы Онежского озера

Онежское озеро – единственный крупный глубоководный водоем в Европе, экосистема которого в целом сохраняет первозданно олиготрофное состояние. Оно является одним из главных объектов гидробиологических исследований. Наибольшее внимание уделяется крупным заливам – Петрозаводской и Кондопожской губам, в максимальной степени подверженных антропогенному воздействию.

Основной предпосылкой эвтрофирования Кондопожской губы являются сточные воды целлюлозно-бумажного производства, Петрозаводской – сток города и сток р. Шуи, дренирующей сельскохозяйственные угодья. Исследования, охватывающие период с середины 60-х годов по настоящее время, позволили выделить несколько эта-

пов в развитии процесса эвтрофирования в губах. Выявлено, что к концу 70-х годов по уровню развития фитопланктона Петрозаводская губа опережала Кондопожскую. Особенно выделялся район Ивановских островов, испытывающий влияние вод горколлектора (Вислянская, 1990). В Кондопожской губе уровень развития фитопланктона был невысок (весенняя биомасса – 0,1–1,5, летняя – 0,07–0,47 г/м³), доминирующий состав водорослей в целом не отличался от озерного. Вместе с тем, чрезвычайно интенсивное развитие протозойного планктона, а также высокие количественные показатели зоопланктона и преобладание в его составе ветвистоусых являлись признаками антропогенного эвтрофирования губы (Кустовлянкина, 1990; Куликова, 1990). Для данного периода было показано, что в развитии этого процесса в Кондопожской губе особая роль принадлежала гетеротрофному звену, так как аллохтонное органическое вещество, включающееся в биотический круговорот, превалировало над автохтонным (Тимакова, 1986). Для водоемов, принимающих отходы целлюлозно-бумажных предприятий, это вполне закономерно, так как их сточные воды слабо обогащены биогенными соединениями, но в большом количестве содержат органическое вещество, представленное преимущественно биохимически лабильными фракциями.

С начала 80-х годов после пуска на Кондопожском ЦБК рассеивающего выпуска сточных вод и биологических очистных сооружений ситуация стала резко меняться. В результате этих мероприятий резко возрос вынос со сточными водами $P_{\text{общ}}$ в 3–6 раз и $N_{\text{общ}}$ в 15–30 раз (Сабылина, 1999). Для экосистемы Кондопожской губы начался период резкого увеличения количественных показателей фитопланктона. Его численность достигла 0,3–4,0 весной и 0,3–3,2 млн.кл./л. летом, биомасса – 0,76–18,0 и 0,9–5,0 г/м³ соответственно. Отмечались изменения в его структурной организации. Интенсивное развитие приобрели виды, характерные для эвтрофных водоемов. Это послужило началом опережающего эвтрофирования Кондопожской губы в сравнении с Петрозаводской. Все большее значение стал приобретать автотрофный путь развития этого процесса (Тимакова и др., 1998).

Вплоть до 90-х годов происходило интенсивное наращивание промышленного, сельскохозяйственного производства и поступательное развитие коммунального хозяйства. В 1990 г. на Кондопожском ЦБК выпущено наибольшее количество бумаги. Все это способствовало ускорению эвтрофирования в обеих губах. В Петрозаводской губе этот процесс сдерживается активным водообменом с центральным районом Онежского озера, что способствует регулярному выносу из нее эвтрофирующих элементов. К нача-

лу 90-х годов было установлено, что биоценозы губ претерпели заметные изменения и приобрели облик, свойственный мезотрофным экосистемам, а в вершинной части Кондопожской губы их трансформация достигла уровня эвтрофных водоемов (Тимакова и др., 2000).

В фитопланктоне, помимо увеличения количественных показателей (табл. 1), отмечена перестройка его структурной организации. На фоне ускорения развития представителей олиготрофного периода, возросло количество видов – показателей эвтрофирования вод. Это виды из числа хлорококковых, синезеленых, криптофитовых и диатомовых. Возросла роль летнего и осеннего фитопланктона в годовом цикле (Вислянская, 1990, 1998, 1999). Продукционная способность фитопланктонных сообществ по сравнению с олиготрофными районами озера увеличилась в 3–10 раз. Поверхностный фотосинтез на акватории губ повысился до $289,7 \pm 43,0$ мг $C \cdot m^{-3} \cdot сут.^{-1}$, а интегральная продукция – до $481,5 \pm 122,5$ мг $C \cdot m^{-2} \cdot сут.^{-1}$. По сравнению с Кондопожской в Петрозаводской губе уровень продукции ниже в 1,3–2,0 раза.

Бактериопланктон, в отличие от олиготрофных районов озера, характеризуется высокой пространственно-временной вариабельностью количественных показателей. Среднее для акватории значение общей численности достигло $2,3 \pm 1,6$ млн./мл, сапрофитные бактерии – 800 ± 120 КОЕ в мл. Темновая ассимиляция углекислоты почти на порядок ($4,7 \pm 2,3$ мкг $C \cdot л^{-1} \cdot сут.^{-1}$) превысила величины, отмеченные в открытых районах озера. В бактериоценозах интенсивное развитие получили бактерии (нефтеокисляющие, фенолрезистентные, нитрифицирующие) – показатели специфических загрязнений

Зоопланктон в обеих губах также был количественно более обогащен, чем на остальной акватории озера. Численность за сезон в средних достигала 10–170 тыс. экз./ m^3 , биомасса 0,1–1,2 г/ m^3 . В сообществах высока доля кладоцер и коловраток. Высокий уровень трофии сказался на уменьшении видового разнообразия сообщества, на снижении количества каланоид по сравнению с циклоподами, увеличении доли кладоцер – *Daphnia*. Продукция зоопланктона превосходила таковую в открытой пелагиали озера в 2–4 раза, достигая 80 ккал/ m^2 в вершинном участке Кондопожской губы.

В бентосе изменения, связанные с эвтрофированием и загрязнением, проявились наиболее отчетливо (Полякова, 1999). В основе донных ценозов Петрозаводской губы представлены малощетинковые черви, личинки хирономид и реликтовые ракообразные. Средние значения численности и биомассы достигают 7,3 тыс. экз./ m^2 и 9,0 г/ m^2 . В наиболее деградированных ценозах преобладают толерантные формы червей (*Tubificidae*) и дву-

крылых (личинки рода *Chironomus*) иногда с весьма значительными показателями обилия и биомассы – до 33 тыс. экз./ m^2 и 21,0 г/ m^2 . В Кондопожской губе главенствует олигохетно-хирономидный комплекс со значительным преобладанием червей по численности и, в несколько меньшей степени, по биомассе. Численность и биомасса макрозообентоса залива в настоящее время достигли 7,0 тыс. экз./ m^2 и 12,0 г/ m^2 , что соответствует α -эвтрофному типу водоема (Китаев, 1984).

Последние 15 лет характеризовались падением производства на ряде промышленных предприятий республики, что обусловило уменьшение водоотведения как в крупных промцентрах, так и на водосборе. Это вызвало существенное снижение антропогенной нагрузки на экосистему озера. Так, к 1993 г. на Кондопожском ЦБК сократился выпуск бумаги (по сравнению с 1990 г.) на 40%, древесной массы – на 46%, целлюлозы – на 21%. На 27% сократилось водоотведение. После 1993 г. выпуск целлюлозы сокращался еще до 1998 г. Это не могло не сказаться на состоянии экосистемы озера. Наиболее наглядно изменения проявились в Кондопожской губе. Уже к середине 90-х годов биоценозы отреагировали изменением количественных и качественных характеристик. Более наглядно индикаторные свойства проявили планктонные сообщества. Установлено, что развитие водорослей в этот период находилось на уровне «малоурожайных» лет. Состав доминантов фитопланктона стал идентичным наблюдавшемуся в период олиготрофного состояния в конце 70-х годов.

Величины первичной продукции также проявили тенденцию к уменьшению. В вершинной и центральной частях губы суточные величины поверхностного фотосинтеза в этот период снизились до 114–248 и 43–162 мг $C \cdot m^{-3}$, интегральная продукция – до 133–223 и 112–158 мг $C \cdot m^{-2}$, соответственно, в 2–3 раза, то есть ненамного больше, чем их межгодовая изменчивость.

Заметную чувствительность к уменьшению нагрузки на водоем проявил бактериопланктон, что вполне закономерно, учитывая высокую составляющую органического вещества в сбрасываемых в водоем стоках (рис. 1, 2). Общая численность, количество сапрофитной бактериофлоры оказались менее чувствительными показателями по сравнению с темновой фиксацией углекислоты. Ее величины в период с 1993 по 1999 гг. снизились почти в 3 раза, что превышает характерную для нее межгодовую изменчивость.

Зоопланктон отреагировал на изменение трофических условий четким уменьшением количественных показателей и структурными преобразованиями в сообществах, изменением в соотношении основных групп зоопланктона (мирные/хищные, коловратки/ракообразные, веслоногие/ветвистоусые и др.) (рис. 3). Снизилась относительная роль в зоопланктоне группы ветвистоусых, в частности вида доминанта *Daphnia cristata*, количество которого может являться индикатором трофического статуса экосистемы.

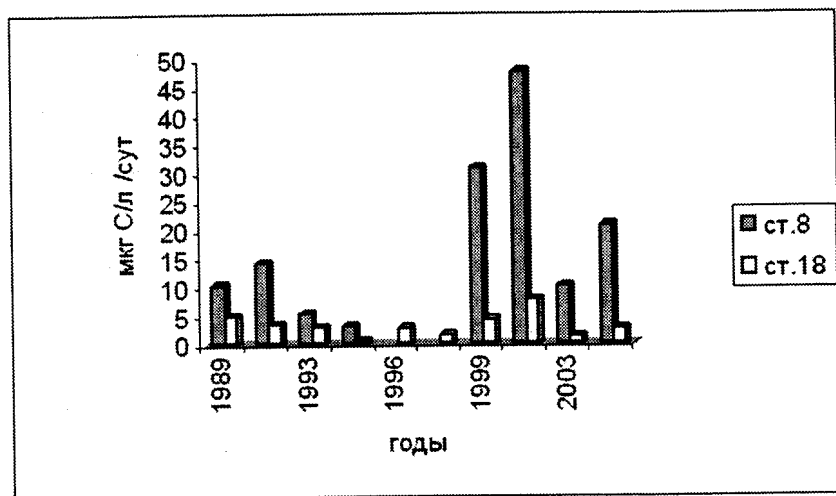


Рис. 1. Темновая ассимиляция углекислоты в центральной (ст. 18) и вершинной (ст. 8) части Кондопожской губы.

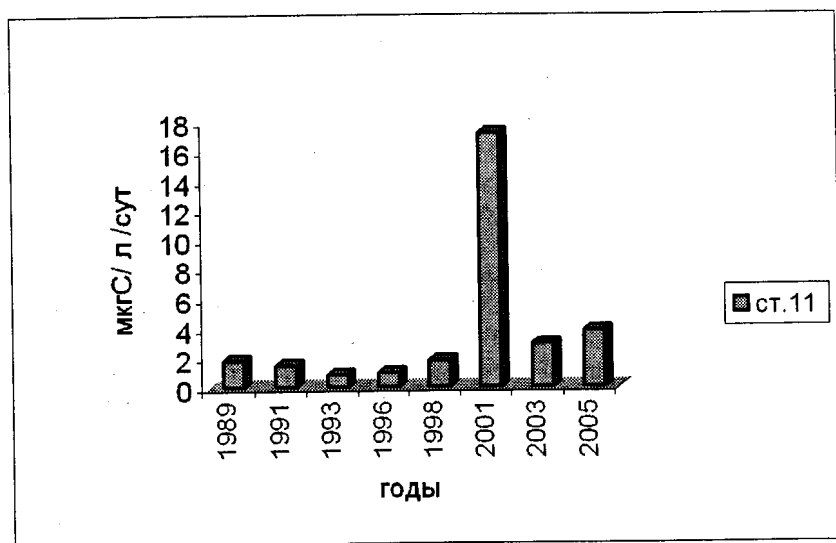


Рис. 2. Темновая ассимиляция углекислоты в Петрозаводской губе (ст.11).

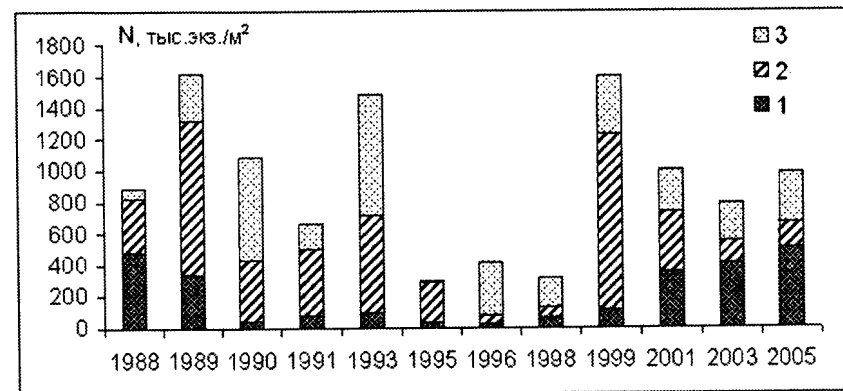


Рис. 3. Изменения численности зоопланктона и его основных групп в вершинной части Кондопожской губы.

1 – веслоногие, 2 – ветвистоусые, 3 – коловратки.

Заметной реакции бентических сообществ на снижение нагрузки выявлено не было. Более того, отмеченные до 90-го года тенденции в трансформации ценозов продолжали развиваться, то есть увеличивались их количественные характеристики, возрастала степень доминирования олигохет, так как накопленное в донных отложениях органическое вещество в достатке обеспечивало пищевые потребности бентосных животных (рис. 4).

Подобная тенденция изменений, имеющая направленность, противоположную процессу эвтрофирования, в последнее десятилетие отмечается для ряда водоемов Европы и России. Считается, что предпосылкой этих изменений для европейских озер является оптимизация природоохранных мероприятий, для российских – падение производства в начале 90-х годов (Решетников, 2004; Решетников, Попова, 2005).

В настоящий период, после 2000 г., количественные показатели биологических сообществ (численность и биомасса) опять проявляют тенденцию роста. Фитопланктонный комплекс на акватории губы характеризуется высокой сезонной изменчивостью, составляя весной $0,3\text{--}4,0$ млн.кл/л и $0,76\text{--}18,0$ г/м³; летом – $0,3\text{--}3,2$ млн.кл/л. и $0,9\text{--}5,0$ г/м³; осенью – $0,2\text{--}2,6$ млн.кл/л и $0,3\text{--}2,0$ г/м³. Он пополняется видами, не только характерными для вод более высокого трофического уровня, но и видами, являющимися индикаторами органического загрязнения. Вещины первичной продукции достигают уровня $291 \pm 49 - 129 \pm 8$ мг С·м⁻³·сут.⁻¹, под м² $510 \pm 98 - 311 \pm 47$ мг С·м⁻²·сутки⁻¹.

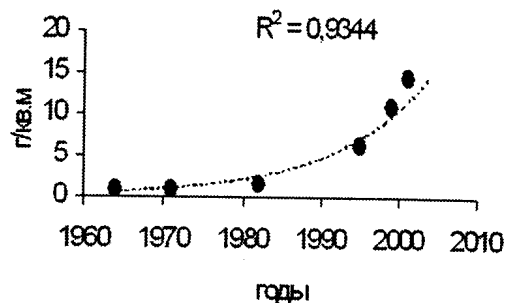


Рис. 4. Изменение средних значений биомассы макрозообентоса Кондопожской губы в многолетнем ряду наблюдений (летний сезон).

Количественные показатели бактериопланктона в вершинной части Кондопожской губы (общая численность – 4,7 млн./мл, количество органофильных бактерий – около 5 тыс. КОЕ в мл.) свидетельствуют не только о высокой степени ее эвтрофирования, но и о заметном загрязнении вод веществами органического характера. Проявляется тенденция количественного роста бактерий, являющихся показателями загрязнения вод отходами ЦБК. Высокой численности достигают олиготрофные (более 6,0) и фенолрезистентные бактерии (свыше 2 тыс.) КОЕ в 1 мл. Содержание последних используется для оценки степени экологического риска загрязнения поверхностных вод ароматическими загрязнителями.

К 2005 г. численность зоопланктона также увеличилась по сравнению с серединой 90-х гг. в два раза. В структуре зоопланктона увеличилась доля веслоногих рачков, что отмечается для сообществ большей части Онежского озера.

Регулярные исследования на акватории озера в последнее десятилетие подтвердили выявленную ранее тенденцию выхода процесса эвтрофирования за пределы обеих губ. Глубоководная зона озера (залив Большое Онего, Центральный плес) служат зоной седиментации загрязнений, выносимых из северо-западных губ. В 90-х годах здесь были выявлены заметные изменения в количественных характеристиках бентофауны. В последние годы количественные показатели макрозообентоса в центральном районе озера колеблются в пределах 1,0–1,8 тыс. экз. и 1,7–4,6 г/м², в среднем составляя 1,6 тыс. экз./м² и 3,5 г/м² (Рис. 5). Столь прогрессирующий рост численности и биомассы бентоса увеличивает вероятность коренных преобразований в его структурной организации, замены стенобионтных видов видами убиквистами, то есть утрате исторически сложившихся бентоценозов.

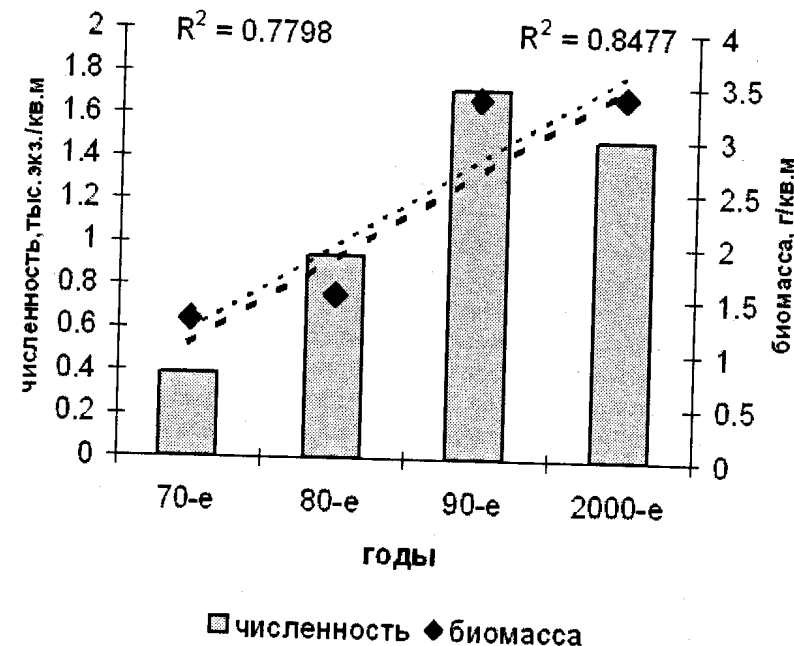


Рис. 5. Многолетние изменения количественных характеристик макрозообентоса в центральной части Онежского озера.

Донные сообщества литоральной зоны Онежского озера в настоящее время претерпевают значительные преобразования в результате инвазии бокоплава байкальского происхождения *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing). В начале 1970-х годов он был интродуцирован в водоемы бассейна Ладожского озера. Десять лет понадобилось этому небольшому рачку, чтобы проникнуть в Ладожское озеро и широко там расселиться. В настоящее время этот вид распространяется в литорали Онежского озера (Березина, Панов, 2003). Вид *G. fasciatus* пополнит кормовую базу рыб, будет активно участвовать в процессах самоочищения литорали Онежского озера от органических веществ. Однако, в результате возможного вытеснения аборигенных форм за счет устойчивости к различным абиотическим факторам и особенностей его биологии (высокая плодовитость, быстрый рост и раннее созревание, широкий пищевой спектр) можно ожидать изменений в соотношениях видов в сообществах литорали и снижения биоразнообразия, а также появления новых видов паразитов рыб, для которых вид-вселенец может оказаться промежуточным хозяином.

Изучение сезонной динамики планктона глубоководной части Онежского озера

В последние годы в лаборатории гидробиологии большое внимание уделяется изучению сезонной динамики экологических явлений. При этом основным инструментом ее описания и исследования является моделирование. В настоящей работе приводится пример изучения динамики планктона глубоководной части Онежского озера, не затронутой антропогенным влиянием.

Сезонная динамика экосистем – одно из основных явлений в озерах северных широт. Циклические колебания факторов среды (освещенность, температура и др.) и собственная цикличность развития определяют ежегодные закономерно повторяющиеся изменения в сообществах планктона. Практически, именно сезонная цикличность обуславливает до 80% дисперсии данных. Кроме того, неопределенность вносят и межгодовые колебания величин и внешних условий. В настоящее время постоянно повышаются требования к точности оценок и прогнозов состояния экосистемы и качества воды. К сожалению, неполнота рядов гидробиологических данных, особенно для крупных водоемов, значительно затрудняют анализ процессов, что и привело к поиску новых подходов. В этих условиях требуется переход к формализации знаний о динамике и количественные оценки

Сезонная цикличность проявляется в динамике количественных величин, состава и структуры, изменении функциональных параметров. Эти процессы в общих чертах воспроизводятся каждый год, но различия в температуре и гидродинамическом режиме определяют конкретную ситуацию текущего года (Куликова и др.; 1997 Онежское озеро, 1999).

Основная идея, положенная в основу изучения межгодовой изменчивости показателей планктона глубоководной части Онежского озера, состоит в том, чтобы рассматривать планктон пелагиали как динамическую систему, существующую в циклически изменяющейся среде. Динамика сезонных изменений параметров (численность, биомасса, как общие, так и видовые) и других характеристик (первичная продукция, температура и т.д.) имеет некую среднюю траекторию, отражающую наиболее общие закономерности. Вокруг нее с той или иной вероятностью реализуются конкретные состояния системы, которые мы наблюдаем при гидробиологических съемках. Экстремальные воздействия факторов среды вызывают в системе сильные изменения и отклонения от средней траектории состояний, которые могут быть описаны и оценены.

Были подвергнуты анализу основные величины планктона (общие численность и биомасса фито- и зоопланктона, основных таксономических групп и некоторых массовых видов, их относительные значения), а

также скорости первичного продуцирования и динамика температуры воды. Данные были ранжированы по суткам с начала года и для сопоставимости нормированы. С помощью метода Ньютона была проведена аппроксимация каждого ряда данных. Было выдвинуто предположение о том, что кривая функции аппроксимации описывает траекторию средне-многолетней динамики величин, то есть отражает типичные особенности сезонного цикла показателей, нивелируя особенности конкретных лет. Вокруг этой кривой с той или иной вероятностью реализуется большая часть эмпирических данных. Экспертные оценки и статистические критерии указывают на адекватность расчетных и эмпирических данных. Несмотря на крайнюю неравномерность рядов и малочисленность данных (от 15 до 25 величин), были получены модели, описывающие сезонную динамику основных компонентов планктона (рис. 6). Для разных величин дисперсия по времени колебалась от 3 до 10 суток, а по ординате – от 3 до 12% от максимума функции.

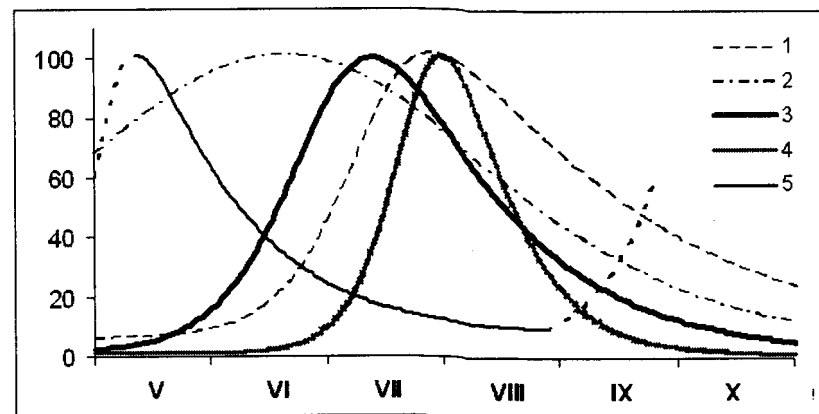


Рис. 6. Синхронность процессов сезонной динамики некоторых величин в глубоководном заливе Большое Онего (данные нормированы); по оси абсцисс – время, сут.; по оси ординат – нормированное значение показателя.

1 – падающая радиация; 2 – температура поверхностного слоя; 3 – первичная продукция планктона; 4 – биомасса фитопланктона в слое 0-1 м (без диатомовых); 5 – биомасса диатомовых водорослей.

Использование данного подхода позволило описать среднемноголетнее состояние, структуру и количественные характеристики планктона на каждые сутки вегетационного периода (с мая по ноябрь) (Сярки, 2005; Сярки, Шаров, 2005). На кривых выделяются особые точки, имеющие

биологический смысл, которые можно соотнести с важными для сообществ событиями, а именно датами и величинами максимумов, периодами максимальных скоростей изменений, точками перегибов и т.д. Непрерывность функции позволяет вычислять некоторые динамические параметры и скорости процессов, которые являются важнейшими экологическими характеристиками сообществ, основных групп планктона и отдельных видов. Изменения скоростей в разные периоды несут ценную информацию о жизнедеятельности и функционировании планктона в сезонном цикле.

Примененный подход позволил получить основу для изучения устойчивости процесса сезонной динамики, а, значит, и стабильности экосистемы. С его помощью можно сравнивать межгодовую дисперсию различных компонентов планктона и давать количественную оценку обычной-экстремальности данных в любой из периодов наблюдений.

Приоритетными направлениями будущих исследований Онежского озера следует считать: прослеживание распространения процессов эвтрофирования в центральные районы озера по гидробиологическим показателям; построение динамических моделей, описывающих сезонный сценарий развития биоценозов в различных участках озера, различающихся по уровню антропогенного эвтрофирования; оценка биоресурсов; изучение роли байкальской амфиподы в структуре и функционировании сообществ литорали Онежского озера.

Исследование озерно-речной системы р. Кенти, загрязняемой отходами горнорудного производства

На протяжении более 30 лет (с 1973 г. по настоящее время) в Институте водных проблем Севера ведутся наблюдения на водоемах системы р. Кенти, расположенных на севере Карелии. В 1982 г. был построен Костомукшский горнообогатительный комбинат, высокоминерализованные отходы которого стали поступать в водоемы. По данным лаборатории гидрохимии (Морозов, 1998; Лозовик и др., 2001), химический состав воды озер претерпел существенные изменения. Сумма ионов увеличилась в десятки раз (достигла 300–400 мг/л), гидрокарбонатно-кальциевый тип вод сменился сульфатно-калиевым, концентрация нитратного азота возросла до 20 мг/л. Целью исследований стало изучение реакции различных представителей биоты на минеральное загрязнение.

Анализ состояния *бактериопланктона* в верхних озерах системы р. Кенти за период 1984–1987 гг. и 2003 г. позволил установить, что за 20-летний период в бактериоценозах произошли существенные изменения (Феоктистов и др., 1992). Почти на порядок увеличилось количество сапрофитной микрофлоры (от 20–110 до 380–700 кол./мл); более чем на порядок возросли величины темновой фиксации углекислоты (от 0.14–0.75

до 4.4–9.4 мкгС/л в сут.). Впервые установлена существенная роль в бактериоценозах нитрифицирующих бактерий, численность которых достигает 10 тыс. кл./мл. Столь высокое представительство нитрифицирующих бактерий указывает на интенсивное загрязнение водоемов азотистыми веществами, в трансформации которых эти бактерии играют существенную роль (фиксация CO₂ в процессах нитрификации – 0.1–1.5 мкгС/л в сут.; нитрификация – 0.83–12.45 мкгN-NH₄/л в сут.).

Реакция *фитопланктона* на минеральное загрязнение озер системы р. Кенти была прослежена на протяжении 1987–2003 гг. (Чекрыжева, 1995). На начальных стадиях загрязнения (1987 г.) показатели количественного развития фитопланктона изменялись от 196 тыс. кл/л до 1 млн. 354 тыс. кл/л (численность) и от 0,18 до 0,94 г/м³ (биомасса) (табл. 2). В 1994–2003 гг. численность и биомасса находились близко к указанным величинам. Существенных изменений в видовом составе фитопланктона озер системы р. Кенти за наблюдаемый период не отмечалось. В сообществе разнообразнее представлены диатомовые, зеленые и золотистые водоросли. Тем не менее, наблюдается некоторое изменение в соотношении различных групп. Так, в начальный период наблюдений во всех исследованных озерах и по численности, и по биомассе доминировали диатомовые водоросли. За семилетний период (к 1994 г.) вклад зеленых водорослей в суммарную численность фитопланктона во всех озерах системы возрос до 30–40%, а за 9-тилетний (к 1996 г.) – до 60%. К этому же времени существенно увеличилась доля динофитовых (до 70%) и хлорококковых (до 50%) водорослей в суммарной биомассе всего фитопланктона, по сравнению с 1987 г. В настоящее время при количественном доминировании в фитопланктоне всех озер диатомовых водорослей, что было характерно и для начального периода наблюдений (1987 г.), все более существенным становится вклад динофитовых, зеленых и синезеленых водорослей. Таким образом, наблюдаемая картина свидетельствует в общем об адаптации сообщества фитопланктона к минеральному загрязнению. Однако возрастание доли перечисленных групп водорослей указывает на усиление антропогенного воздействия на фитопланктонные сообщества озер системы р. Кенти, в частности, как результат повышенного содержания калия в воде и общего уровня минерализации.

Данные по состоянию *зоопланктона* обобщены за период исследований с 1981 г. по 2003 г. (Власова, 1998; Хазов и др., 1999; Калинкина, 2002; Калинкина и др., 2002). До начала работы комбината (1981 г.) в водоемах наблюдались высокие показатели численности и биомассы: 4.5–61.3 тыс. экз./м³ и 0.15–6.06 г/м³. В составе зоопланктона в разные годы доминировали виды *Eudiaptomus gracilis* Sars, *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Daphnia cristata* Sars, *Bosmina obtusirostris* Sars, *Kellicottia longispina* (Kellicott). Во всех озерах отмечались характерные для данного региона

виды: *Bythotrephes longimanus* Leydig, *Holopedium gibberum* Zaddach, *Leptodora kindtii* Focke, *Polyphemus pediculus* Linne.

После запуска комбината можно выделить два этапа, отражающие перестройку в сообществах зоопланктона. В течение первого периода (1984–1987 гг.), когда загрязнение озер было еще слабым, показатели общей численности и биомассы зоопланктона оставались на высоком уровне, сохранялся комплекс видов зоопланктона, обычный для водоемов этого северного региона Карелии. Второй период начался в 1992 г. и продолжается в настоящее время. В этот период отмечалось снижение численности и биомассы зоопланктона до 0.52–4.5 тыс. экз./м³ и 0.012–0.16 г/м³. Одновременно наблюдались признаки деградации сообществ зоопланктона – выпадение из его состава многих видов. Типичные обитатели северных озер (*B. longimanus*, *H. gibberum*, *L. kindtii*) исчезли из водоемов при минимальном загрязнении (концентрации калия 5–40 мг/л и сумме ионов 29–220 мг/л). На последующих стадиях загрязнения (при концентрациях калия 42–67 мг/л и сумме ионов 186–320 мг/л) из водоемов исчезли виды *E. gracilis* и *H. appendiculata*. Наибольшую устойчивость проявили *D. cristata*, *Daphnia longispina* O. F. Müller, *Th. oithonoides*, *Mesocyclops leuckarti* Claus, *B. obtusirostris*, *Bosmina longirostris* O. F. Müller, а также коловратки *Bipalpus hudsoni* Imhof, *Asplanchna girodi* Guerne, выживающие при концентрациях калия до 100 мг/л и сумме ионов до 450 мг/л, но и их численность к 2000–2003 гг. в наиболее загрязненных верхних озерах сильно снизилась.

На фоне общего угнетения сообществ зоопланктона в верхнем течении р. Кенти в некоторые годы наблюдались вспышки численности отдельных видов, что приводило к резкому возрастанию общих показателей. Например, в 1995 г. произошло возрастание численности зоопланктона до 70.8–82.4 тыс. экз./м³, биомассы до 0.56–1.54 г/м³ в основном за счет коловраток *A. girodi*, *Keratella quadrata* Müller, *Brachionus* sp.

Все виды зоопланктона по характеру их реакции на увеличение содержания минеральных компонентов были разделены на пять групп (табл. 3). К первой группе были отнесены виды, которые проявили весьма низкую толерантность к нарушению ионного состава воды, они исчезали на самых первых этапах загрязнения. Виды второй группы (низкая толерантность) отмечались в водоемах до высоких уровней загрязнения, однако затем их численность быстро снижалась до нуля. В третью группу со средней толерантностью были отнесены массовые виды зоопланктона, численность которых неуклонно снижалась, но виды оставались в озерах даже при самом высоком уровне загрязнения. Наиболее яркой чертой динамики численности четвертой группы видов (высокая толерантность) является интенсивное их развитие на последних стадиях загрязнения водоемов. В пятую группу вошли виды, численность которых никак не была связана с нарушением химического состава среды.

Своеобразную реакцию на минеральное загрязнение проявил макрозообентос озер системы р. Кенти, доминирующий комплекс которого образован представителями трех систематических групп – Oligochaeta, Mollusca (*Bivalvia*) и Chironomidae. Бентосные сообщества реагируют на воздействие техногенных вод Костомукшского ГОКа снижением общего видового разнообразия и изменением таксономической структуры доминирующего комплекса. Так, количество видов Chironomidae, наиболее хорошо изученной в систематическом отношении группы, сократилось по сравнению с показателями 1984 г. с 34 до 19 в 2003 г. По мере нарастания антропогенной нагрузки заметно, как по численности так и по биомассе, возрастает доля моллюсков, у которых более чем в два раза увеличилась индивидуальная масса особей (табл. 4).

Сходная картина глубокой трансформации наблюдается и в сообществах зообентоса русловых участков системы р. Кенти. Так, в зообентосе снижается доля стенобионтных видов, к которым относятся все виды веснянок (Plecoptera), большинство обнаруженных видов поденок (Ephemeroptera) и ручейников (Trichoptera), личинки мошек (Simuliidae) и жуков (Helmidae). В то же время в зооценозах сохранились такие эврибионтные виды, как малощетинковые черви (Oligochaeta), ручейники семейства Limnophilidae, пиявки (Hirudinea) и большинство видов моллюсков (Mollusca); последние увеличили свою численность.

Были получены уравнения зависимости ($p < 0.05$) различных показателей структуры зообентических и зоопланктонных сообществ от показателей химического состава воды, которые увеличивались на протяжении периода наблюдения. На основе полученных зависимостей были рассчитаны критические концентрации ионов калия, при которых происходит трансформация сообществ гидробионтов.

Так, была установлена тесная связь между химическими параметрами среды и показателями состояния зообентоса русловых участков. Показатель соотношения стено- и эврибионтных видов бентоса (C/Σ) и суммы ионов (Σ , мг/л) в воде р. Кенти связаны между собой зависимостью ($p < 0.05$):

$$\ln(C/\Sigma) = -0.82 \ln \Sigma + 7.67$$

Рассчитанное по данному уравнению критическое значение суммы ионов составило 100 мг/л, что соответствует концентрации ионов калия 20 мг/л.

Кроме того, были построены регрессионные модели зависимости концентрации калия (K) от показателей численности (N) некоторых видов зоопланктона (например, для *Eudiaptomus gracilis*). Уравнения, соответственно, для оз. Окуновое и оз. Поппаляярви имели вид ($p < 0.05$): $K_o = \exp(4.35 - 0.0102 * N)$, $K_n = \exp(3.85 - 0.000183 * N)$.

Подставляя в уравнения значения численности, равные нулю («вымирание популяции»), вычисляли критические концентрации токсиканта.

Для рачков в оз. Окуновое она оказалась равной 77 мг/л (с учетом стандартной ошибки – от 62 до 96 мг/л); в оз. Поппаляярви – 47 мг/л (32–69 мг/л). Итак, критические концентрации калия для популяции рачков *Eudiaptomus gracilis* составили 30–100 мг/л (в среднем около 60 мг/л) (Калинкина и др., 2005).

Таким образом, более чем 20-летние наблюдения ИВПС позволили получить уникальные данные о реакции сообществ северных слабоминерализованных водоемов на минеральное загрязнение. Оказалось, что бактерио- и фитопланктон проявляют адаптивную реакцию на поступление избыточных количеств калия. В то же время сообщества зоопланктона и зообентоса проявили высокую уязвимость к действию калийного загрязнения. Полученные данные свидетельствуют о низкой толерантности биоты северных озер к минеральному загрязнению, что необходимо учитывать при оценках и прогнозах воздействия антропогенного фактора на водоемы северо-западного региона России.

Исследование водных экосистем на охраняемых природных территориях

Эти исследования направлены на объяснение закономерностей формирования биоразнообразия, особенно в связи с географической широтой местообитания, продуктивностью экосистем, климатической изменчивостью, «суровостью» среды, ее физической и химической неоднородностью. Целью проводимых исследований в Институте водных проблем Севера является изучение биологического разнообразия сообществ водных экосистем водоемов на охраняемых территориях и всей Карелии.

Работы в этом направлении были начаты с 1990 г. как один из разделов по проекту организации национального парка «Паанаярвский» (Фрейндлинг и др., 1992; Природа национального парка «Паанаярви», 2003; Ecosystems..., 1997). В период с 1997 г. по 2000 г. был реализован комплексный проект «Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Республики Карелия», составной частью которого было изучение водных экосистем. Всего было обследовано свыше 50 озер и рек, в том числе ранее практически не изученных в гидробиологическом отношении (Разнообразие биоты..., 2003; Biotic diversity..., 2003). В рамках этой программы была проведена инвентаризация водной флоры и фауны с оценкой видового состава, структурной организации и степени количественного развития гидробионтов различных экологических группировок: фито-, зоопланктона, зообентоса, высшей водной растительности.

В результате исследований для водоемов, расположенных на охраняемых природных территориях, были составлены видовые списки фитопланктона (266 видов водорослей), зоопланктона (151 таксон), фауны

донных беспозвоночных озер (180 таксонов) и водотоков (более 300 видов) (Чекрыжева, 1990). Всего за годы исследований в водоемах на всей Карелии было выявлено 652 таксона зоопланктона (Филимонова, Круглова, 1994; Куликова, 2001). В ходе инвентаризации были выявлены редкие и нуждающиеся в охране виды водных растений и животных, составлены их списки; рассмотрены эколого-географические аспекты распределения биоты в разнотипных водоемах Карелии в связи варьированием pH, цветности, минерализации. Кроме того, было показано, что факторами высокого биологического разнообразия донной фауны водотоков Карелии являются особенности гидрографической сети региона, а именно, наличие большого числа русловых участков с быстрым течением, перемежающихся с озерными участками. Полученные материалы явились составной частью при обосновании организации российско-финляндского «Парка Дружбы», национальных парков «Паанаярвский», «Водлозерский», проектируемых национальных парков «Койтайоки», «Тулос» и «Калевальский» (Ryabinkin et al., 1994; Vlasova et al., 1998).

Кроме того, в лаборатории гидробиологии выполняются теоретические обобщения, связанные с изучением становления пресноводной биоты в истории биосферы (Кауфман, 2005); прослежены закономерности эволюции кишечнополостных и первичнополостных беспозвоночных (Кауфман, 1990), а также эволюции размножения всех групп гидробионтов (Кауфман, 1993; 1994); обобщен вопрос об оогенезе костистых рыб в норме и патологии (Шарова и др., 2003). Эволюционный подход к изучению пресноводных экосистем позволяет понять причины различной устойчивости организмов к действию антропогенных факторов. Так, на примере зоопланктона водоемов системы р. Кенти было показано, что его толерантность к минеральному загрязнению тесно связана с историей проникновения видов в континентальные водоемы. Глубокая древняя адаптация видов к условиям жизни во временных континентальных водоемах послужила базой высокой устойчивости к минеральному загрязнению, что обеспечило выживание их популяций в загрязненных озерах (Kalinkina, 2005). В дальнейшем в лаборатории планируется изучение связи между оксифильностью видов зоопланктона и зообентоса, сформировавшейся в ходе эволюции организмов к условиям дефицита кислорода в пресных водах, и устойчивостью различных жизненных форм к антропогенным факторам.

За последние годы в лаборатории гидробиологии получены следующие **основные результаты** в области фундаментальных и прикладных исследований:

– изучены основные стадии в развитии эвтрофирования крупных заливов Онежского озера; описаны особенности реакции биоты в условиях эв-

трофирования в зависимости от разных источников загрязнения; показано распространение процесса эвтрофирования в открытые районы озера, которое в настоящее время пока сказывается на донных ценозах; выявлены изменения в состоянии сообществ наиболее эвтрофированного залива Онежского озера (Кондопожской губы) в последние десятилетия как следствие ре-олиготрофизации экосистемы в связи со снижением антропогенной нагрузки; созданы модели сезонной динамики планктона в его глубоководной части; начаты исследования последствий вселения инвазионного вида (байкальской амфиподы) в литоральную зону Онежского озера;

- рассмотрены основные закономерности трансформации ценозов водных экосистем Северо-запада России в условиях нарушения ионного состава воды, рассчитаны критические уровни минерального загрязнения, вызывающие изменения в составе сообществ зоопланктона и зообентоса; предложены виды-индикаторы минерального загрязнения;

- проведена инвентаризация флоры и фауны водоемов охраняемых природных территорий Восточной Финляндии; предложены меры по охране редких видов;

- составлен список видов зоопланктона внутренних водоемов Карелии;

- рассмотрены закономерности становления пресноводной биоты в истории биосферы; раскрыты факторы формирования толерантности организмов зоопланктона к антропогенному воздействию с позиций исторического подхода.

В будущем будет проследиваться дальнейшая трансформация биоты в антропогенно измененных водных объектах северо-западного региона России. Методической основой для продолжения работ станет поиск новых подходов к анализу гидробиологической информации, основанных на оценке межгодовых колебаний и многолетней изменчивости гидробиологических показателей, а также на количественной формализации зависимостей между показателями состояния биоты и влияющими на нее факторами. Предполагается разработка методических подходов к типизации водных экосистем Карелии по гидробиологическим показателям. Планируется изучение особенностей восстановления биологических сообществ крупных водных экосистем Карелии в условиях снижения антропогенной нагрузки.

Литература

Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.

Березина Н.А., Панов В.Е. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежское озеро // Зоологический журнал, т. 82. № 6. С.731–734.

Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.

Вислянская И.Г. Фитопланктон // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С.183–191

Вислянская И.Г. Фитопланктон // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. С.57–60.

Вислянская И.Г. Структура и динамика биомассы фитопланктона // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С.146–158.

Власова Л.И. Озерно-речная система Кентти. Зоопланктон / Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 1998. С.134–137.

Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кентти / Под ред. В.И. Кухарева. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1995. 100 с.

Гидробиология Выгозерского водохранилища / Под ред. В.А. Соколовой. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1978. 191 с.

Калинкина Н.М. Прогноз состояния популяций гидробионтов при нарушении ионного состава воды // Экология, 2002. № 1. С.32–35.

Калинкина Н.М., Кухарев В.И., Горьковец В.Я., Раевская М.Б., Морозов А.К. Техногенное изменение состава природных вод севера Карелии // Геоэкология, 2002, № 4. С.333–339.

Калинкина Н.М., Коросов А.В., Морозов А.К. Оценка критических уровней минерального загрязнения речной системы с использованием имитационного моделирования // Экология. 2005. № 6. С.477–480.

Кауфман З.С. Эволюция размножения и пола. Т. 1. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1993. 251 с.

Кауфман З.С. Эволюция размножения и пола. Т. 2. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1994. 190 с.

Кауфман З.С. Происхождение биоты континентальных водоемов. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2005. 250 с.

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 208 с.

Кустовлянкина Н.Б. Протозойный планктон // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Петрозаводск. 1990. С.192–207

Куликова Т.П. Зоопланктон // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С.207–216.

Куликова Т.П. Видовой состав зоопланктона внутренних водоемов Карелии // Труды КарНЦ РАН: Биogeография Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2001. Вып. 2. С.133–151.

Куликова Т.П. Зоопланктон водоемов бассейна р. Шуи (Карелия). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2004. 124 с.

Куликова Т.П., Кустовлянкина Н.Б., Сярки М.Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1997. 112 с.

Ладожское озеро / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2000, 490 с.

Лозовик П.А., Маркканен С.-Л., Морозов А.К., Платонов А.В., Потапова И.Ю., Калмыков М.В., Куринная А.А., Ефременко Н.А. Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2001. 168 с.

Моисеев Т.И., Дауваальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильячук Б.П., Ильячук Л.И., Сандимиров С.С., Казан Л.Я., Вандыш О.И., Шаров А.Н., Шарова Ю.Н., Королева И.Н. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. 403 с.

Морозов А.К. Озерно-речная система Кенти. Химический состав воды / Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. С.129-133.

Онежское озеро. Экологические проблемы / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. 293 с.

Полякова Т.П. Донные ценозы в условиях антропогенного эвтрофирования / Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С.211-217.

Природа национального парка «Паанаярви» / Труды КарНЦ РАН, Петрозаводск, 2003. 181 с.

Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2003. 261 с.

Решетников Ю.С. Проблема ре-олиготрофирования водоемов // Вопросы ихтиологии, 2004. Т. 44. № 5. С.709-711.

Решетников Ю.С., Попова О.А. Новая экологическая ситуация в водоемах Европейского Севера России // IY(XXII) Междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». г. Вологда, 5-10 декабря 2005 г. Вологда, Ч. 2. С.88-90.

Сабылина А.В. Современный гидрохимический режим озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С.58-99.

Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. 188 с.

Сярки М.Т. Среднегодовое сценарий сезонной динамики планктона Онежского озера // Структурно-функциональные особенности биосистем Севера (особи, популяции, сообщества). Матер. междунар. конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. С.160-163.

Сярки М.Т., Шаров А.Н. Сезонная динамика планктонных сообществ Онежского озера // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера. Сб. матер. IV междунар. конф. 5-10 декабря 2005 г. Часть 2. Вологда, 2005. С.17-180.

Тимакова Т.А. Некоторые особенности разрушения клетчатки в водоеме, производственные воды целлюлозно-бумажного комбината // Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Л.: Наука, 1986. С.85-98.

Тимакова Т.А., Куликова Т.П., Полякова Т.Н., Теканова Е.В., Сярки М.Т. Гидроэкология: эвтрофирование экосистемы Онежского озера // Инженерная экология, № 6, 1998, С.14-25.

Тимакова Т.А., Куликова Т.П., Полякова Т.Н., Вислянская И.Г., Сярки М.Т.

Особенности формирования и функционирования биоты Онежского озера в условиях антропогенного эвтрофирования. Ладожское озеро / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2000. С.276-285.

Филимонова З.И., Круглова А.Н. О коловратках рек Карелии / Использование и охрана водных ресурсов бассейна Балтийского моря. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1994. С.161-192.

Хазов А.Р., Калинкина Н.М., Власова Л.И. Стабильность сообществ гидробионтов и оценка их биологического разнообразия в условиях минерального загрязнения водоемов северо-запада Карелии // Экология. 1999. № 5. С.373-374.

Чекрыжева Т.А. Видовой состав фитопланктона некоторых озер и рек Карелии. Препринт доклада. Петрозаводск, 1990. 39 с.

Чекрыжева Т.А. Фитопланктон озер системы р. Кенти / Влияние техногенных вод горнообогатительного комбината на водоемы системы р. Кенти. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1995. С.68-79.

Феоктистов В.М., Тимакова Т.М., Калугин А.И. Влияние Костомукшского ГОКа на водную экосистему Кенти-Кенто / Водные ресурсы Карелии и экология. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 1992. С.63-78.

Фрейндлинг В.А., Басов М.И., Рябинкин А.В. Природа оз. Паанаярви. Проблемы ее сохранения // Водные ресурсы Карелии и экология. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С.152-168.

Шарова Ю.Н., Кауфман З.С., Лукин А.А. Оогенез рыб Европейского Севера России при техногенном загрязнении. Петрозаводск, 2003. 130 с.

Biotic diversity of Karelia: condition of formation, communities and species. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. 2003. 241 p.

Ecosystems, fauna and flora of the Finnis-Russian Nature Reserve Friendship. Finnish Environment Institute, Helsinki. 1997. 364 p.

Kalinkina N.M. The classification of freshwater planktonic crustaceans in their tolerance to ion composition disturbance / Aquatic ecology at the dawn of 21 century. Book of abstracts, 3-5 October, 2005. Zoological Institute. St. Petersburg. 2005. P.35.

Ryabinkin A.V., A.V. Freindling, P.A. Lozovic, O.P. Sterligova, V.Y. Pervozvansky, A.I. Kalugin, A.L. Chupukov, N.V. Ilmast Structure and diversity of water ecosystem in lake Tolvajarvi (Russia) // The Karelian Biosphere Reserve Studies. North Karelian Biosphere Reserve, Joensuu, 1994. P.235-242.

Vlasova L.I., Komulainen S.F., Kucharev V.I., Litvinenko A.V., Lozovic P.A., Ryabinkin A.V., Salo Y.A., Freindling A.V., Chekryzheva T.A. Hydrographic, meteorological, hydrochemical and hydrobiological characterization and assessment of the territory //Inventory of natural complexes and ecological feasibility study of Kalevala National Park. Ed. Gromtsev A.N. Preprint of the paper. Petrozavodsk. 1998. P.9-14.