На правах рукописи

Шаров Андрей Николаевич

ФИТОПЛАНКТОН ХОЛОДНОВОДНЫХ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Специальность 03.02.10 – гидробиология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Борок 2020

Работа выполнена в ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук

Научный консультант:
Моисеенко Татьяна Ивановна
член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующая Отделом биогеохимии и экологии, заведующая лабораторией эволюционной биогеохимии и геоэкологии ФГБУН Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

Официальные оппоненты:
Баженова Ольга Прокопьевна
профессор, доктор биологических наук, профессор кафедры экологии, природопользования и биологии Факультета агрохимии, почвоведения, экологии, природообустройства и водопользования ФГБОУВО Омского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина

Габышев Виктор Александрович
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории флористики, геоботаники и мерзлотного лесоведения, Института биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук Федерального исследовательского центра "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук"

Разумовский Лев Владимирович
доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории охраны вод ФГБУН Института водных проблем Российской академии наук

Ведущая организация
ФГБУН Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук

Защита состоится «__»_____ 2020 г. в часов на заседании диссертационного совета Д002.036.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук по адресу: 152742, Ярославская область, Некоузский район, п. Борок, д. 109. Тел./факс: 8 (48547)24042; e-mail: dissovet@ibiw.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук по адресу: 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок, д. 109. и на сайте http://www.ibiw.ru, с авторефератом – в сети Интернет на сайтах ВАК РФ https://vak.minobrnauki.gov.ru/) и ИБВВ РАН (http://www.ibiw.ru/).

Автореферат разослан «____»_____ 2020 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор биологических наук Л.Г. Корнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Антропогенное влияние на водоемы обусловлено глобальными изменениями атмосферы, трансграничным переносом загрязняющих веществ и локальным воздействием производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Современные тенденции изменения климата проявляются в изменении погодных характеристик и в увеличении частоты и интенсивности экстремальных климатических событий (климатическая изменчивость). Глобальные современные климатические флуктуации и локальное антропогенное воздействие приводят к перестройке структуры и функционирования водных экосистем (Филатов, Меншуткин, 2017). Особенно чувствительными к влиянию климатических и антропогенных факторов являются пресноводные экосистемы полярных регионов (Anisimov et al., 2007). Типичные для полярных широт (Арктика и Антарктида) – холодноводные озера со средней температурой воды в летний период <15 °C (Китаев, 2007), которые, как правило, относятся к олиготрофному типу и характеризуются высоким качеством воды.

Север Европейской территории России характеризуется развитой промышленностью, основанной на добыче и переработке природных ресурсов. Регион богат водными объектами, которые используются в качестве источников питьевого водоснабжения и приемника сточных вод. Многие озера имеют рекреационное и рыбохозяйственное значение. Однако исследования экологических последствий антропогенного влияния на водные экосистемы этого региона носят локальный и нерегулярный характер.

К важнейшим компонентам водных экосистем относится фитопланктон, как основной первичный продуцент органического вещества, база всех трофических взаимодействий и индикатор изменений условий среды обитания.

Первые данные по фитопланктону северных водоемов Европы относятся к 19-му веку, периоду активной инвентаризации растительного и животного мира (Wahlenberg, 1812; Nylander, Saelan, 1859; Richard, 1889; Cleve, 1891; Hirn, 1895). Подробные исследования отдельных водоемов были проведены в начале 20-го века (Levander, 1905; Арнольди, Алексеенко, 1915; Свиренко, 1915; Ролл, 1923, 1933; Чернов, 1927; Цинзерлинг, 1929; Порецкий и др., 1934; Воронихин, 1935;

Косинская, 1935; Зинова, Нагель, 1935 и др.). Основное внимание уделялось флористическому составу водорослей. С середины прошлого века начаты исследования структуры альгофлоры водоемов северных широт, в том числе с учетом влияния антропогенных факторов (Комулайнен и др., 2006, 2011).

К настоящему времени выполнены многочисленные исследования, благодаря которым стали ясны закономерности антропогенных преобразований окружающей среды и отклика на антропогенный стресс биологических систем, в том числе сообществ фитопланктона (Moriarty, 1983; Яковлев, 1988, 1998; Forbes, Forbes, 1994; Newman, Jagoe, 1996; Моисеенко, 1998; Алимов, 2000; Шаров, 2004; Моисеенко и др., 2009; и др.). Появились данные о восстановлении водных экосистем после снижения загрязнения (Cairs, 2005; Falketal., 2006; Hobbs, 2007; Moiseenko et al., 2009), отмечено явление олиготрофизации (Willen, 1987; Greyetal., 1994; Great Lake Ecosystem report, 2000; Jappesen et al., 2002, 2005; VanDonk et al., 2008; Остапеня и др., 2011; Özkanetal., 2016 и др.).

Однако совместному изучению трансформации фитопланктона под влиянием изменения климата и комплекса антропогенных прямых и опосредованных воздействий на водные экосистемы, расположенные в высоких широтах, уделяется недостаточно внимания.

Цель работы. Выявление закономерностей структурной организации фитопланктона холодноводных озерных экосистем Севера Европейской территории России и Восточной Антарктиды при изменениях метеорологических условий (климата) и степени антропогенного воздействия.

Основные задачи:

1. Исследовать структурную организацию фитопланктона разнотипных озер Севера Европейской территории России и вскрывающихся / подледных ультраолиготрофных озер Восточной Антарктиды.

2. Оценить степень влияния климатических и антропогенных факторов (эвтрофирования, загрязнения тяжелыми металлами, закисления вод и термофикации) на развитие фитопланктона холодноводных озер.

3. Установить последовательность структурных преобразований фитопланктона после снижения антропогенного воздействия.

4. Определить основные критерии оценки качества вод по состоянию фитопланктона холодноводных озер.

Научная новизна. Впервые на основе изучения пространственно-временных аспектов развития фитопланктона в озерах Севера и Северо-Запада ЕТР (больших озер - Имандра, Онежское и Чудско-Псковское и малых озер Арктики и Субарктики) выявлены особенности его структуры и динамики под влиянием природных и антропогенных факторов (эвтрофирования, загрязнения тяжелыми металлами, закисления, термофикации). Исследован видовой состав и количественные характеристики фитопланктона крупных озер Севера ЕТР, малых арктических озер и озер приарктических регионов. Показано, что в арктических водоемах по видовому разнообразию преобладают диатомовые водоросли, а в бореальных – зеленые и диатомовые. По биомассе диатомовые водоросли доминируют преимущественно во всех холодноводных озерах, за исключением небольших арктических озер, где лидируют золотистые водоросли. Выявлены особенности реорганизации фитопланктона в ответ на действие антропогенных факторов. Доказано, что в северных водоемах комплексное действие тяжелых металлов и биогенных элементов не приводит к угнетению фитопланктона, а влияние закисления в совокупности с тяжелыми металлами усиливает токсичное действие последних. Особенностью отклика на закисление является увеличение вариабельности динамики биомассы фитопланктона.

Показано, что в разнотипных озерах Восточной Антарктиды в условиях сурового климата при световом и биогенном лимитировании происходит перераспределение автотрофных компонентов в формировании биоты водоемов: на фоне снижения обилия и разнообразия фитопланктона увеличивается роль микрофитобентоса и перифитона.

Разработан и апробирован комплексный фитопланктонный индекс (КФИ) – новый показатель качества вод холодноводных озер.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты вносят существенный вклад в исследование структурной организации, биоразнообразия и особенностей функционирования первичных

продуцентов озерных экосистем Северо-Запада России, арктических и антарктических регионов; выявляют закономерности влияния природных и антропогенных факторов среды на водные сообщества и их устойчивость в условиях изменяющегося климата, эвтрофирования и загрязнения природных вод; создают теоретическую основу для оценки влияния возможного потепления климата на водоемы, а также обоснования причин невозможности возврата озерных экосистем к естественному состоянию после снижения антропогенного пресса.

Научно-практическая значимость работы. Методологические подходы и критерии оценки качества воды по состоянию сообществ фитопланктона будут востребованы в практике экологического мониторинга. Результаты исследования фитопланктона холодноводных озер необходимы для разработки проектных материалов при строительстве и реконструкции производств на Севере, для оценки возможного воздействия на окружающую среду при планировании новых объектов.

Результаты работы нашли применение при оценке влияния комбината «Печенганикель» (Кольский п-ов) на состояние озерно-речной системы Пасвик и приграничных территорий в рамках программы российско-норвежского сотрудничества в области экологии; при реализации российских и международных проектов: по закисленным горным озерам Европы «Mountain Lakes Research», оценке воздействия глобальных изменений на европейские пресноводные экосистемы «EU-LIMPACTS», в ряде научно-исследовательских программ (INTAS, TACIS, РФФИ, Президиума РАН) мониторинга и оценки экологического состояния водных экосистем Севера ЕТР, а также при оценке влияния на водные экосистемы различных локальных источников загрязнения.

Полученные материалы использованы в учебном процессе при разработке курса лекций по лимнологии, гидробиологии и экологии.

Методы исследования. Методологической основой работы является междисциплинарный системный подход, рассматривающий в единстве гидрохимические, гидрологические и структурно-функциональные показатели водных экосистем с позиции концепции интегрированного единства взаимосвязанных антропогенно обусловленных и природных процессов, основанный на

фундаментальных работах в области гидробиологии (Reynolds 2006; Likens 2010; Алимов и др., 2013 и др.).

Материалом работы послужили 3250 проб фитопланктона, собранных в период с 1993 по 2016 г. на крупных и малых водоемах, подвергающихся воздействию сточных вод и влиянию аэротехногенного загрязнения: малые озера арктической зоны (10 озер), Субарктики (3 озера), бореальной зоны (10 озер) и Восточной Антарктиды (23 озера); крупные озера - Онежское, Ладожское, Чудско-Псковское, Умбозеро и Имандра. Исследован фитопланктон литоральной зоны Выгозера и пресноводной части эстуария р. Невы. Для оценки фоновых условий использованы литературные данные, а также результаты собственных исследований на акваториях, не подверженных прямому влиянию промышленных производств и хозяйственно-бытовых сточных вод.

Пробы фитопланктона отбирали батометром Рутнера, фиксацию и камеральную обработку проб осуществляли с использованием стандартных методов (Гусева, 1959; Кузьмин, 1975; Федоров, 1979; Tikkanen, 1986; Методические рекомендации…, 1988; Olenina et al., 2006).

Проведен сравнительный анализ количественных показателей (численность, биомасса) разных систематических групп фитопланктона, а также показателей видовой структуры (видовое богатство, видовое разнообразие, степень доминирования, размерная характеристика). Рассмотрены особенности изменения альгоценозов в комплексе с абиотическими факторами среды. Размерную структуру сообществ оценивали по среднему отношению общей биомассы водорослей и цианобактерий в пробе к их численности. Для оценки устойчивости сообществ использовали информационный индекс Шеннона, для оценки степени доминирования – индекс Симпсона, рассчитанные как по численности, так и по биомассе фитопланктона (Одум, 1975; Мэгарран, 1992). Для определения концентрации хлорофилла «а» воду фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.22-1 мкм. Экстракцию проводили 90%-ным ацетоном и измеряли оптическую плотность на спектрофотометре.

Оценку трофического статуса водоемов проводили, придерживаясь известных шкал (Китаев, 2007). Для оценки сапробности по методу

Пантле-Буку в модификации Сладечека индикаторную значимость отдельных видов определяли по Sládeček, 1973 и Marvan et al, 2005.

Взаимосвязь между климатическими/гидрохимическими переменными и характеристиками фитопланктона была проанализирована с использованием ранговой корреляции Спирмена и факторного анализа методом главных компонент (Statistica 6.0).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. К природным особенностям фитопланктона холодноводных озер Севера ЕТР относится высокое видовое разнообразие, низкие количественные показатели и преобладание диатомовых водорослей. Биомасса фитопланктона зависит от гидролого-гидрохимических параметров и степени антропогенного влияния. Видовое богатство фитопланктона определяется размерами водоема.

2. В олиготрофных водоемах Севера ЕТР сезонная динамика фитопланктона характеризуется одним весенним пиком биомассы. Весной подо льдом доминируют динофитовые и диатомовые водоросли. При эвтрофировании наблюдается дополнительное массовое развитие диатомовых, криптофитовых водорослей и цианобактерий осенью.

Подледный фитопланктон озер Восточной Антарктиды характеризуется бедным составом и низкой биомассой с доминированием пикопланктонных форм. В придонных сообществах автотрофов доминируют цианобактерии.

3. Увеличение продолжительности вегетационного безледного периода и поступления биогенных веществ с водосборной территории в результате климатической изменчивости (увеличение температуры и количества осадков) приводит к увеличению сезонной и межгодовой вариабельности биомассы фитопланктона, свидетельствующей о снижении устойчивости сообщества.

4. Антропогенное воздействие (хозяйственно-бытовые и промышленные стоки) способствует повышению обилия фитопланктона с ростом доли в нем криптофитовых водорослей и цианобактерий, характерных для эвтрофных вод. После снижения антропогенного эвтрофирования в составе фитопланктона увеличивается относительное количество потенциальных миксотрофов, которые способны использовать дополнительные источники фосфора, не доступные для автотрофного планктона, в конечном итоге

предотвращая уменьшение биомассы водорослей и концентрации хлорофилла «а».

5. Комплексный фитопланктонный индекс, основанный на величине отклонения показателей развития сообщества от фонового (референтного) состояния, служит надежным критерием оценки качества вод разнотипных озер.

Апробация работы. Основные результаты и положения работы докладывались на 35 российских и международных конференциях и симпозиумах: Экологические проблемы Севера Европейской территории России (Апатиты, 1996); III междунар. симпозиум по проблемам Баренцева моря (Киркенес, Норвегия, 1996); Съезды Гидробиологического общества РАН (Казань, 1996; Калининград, 2001); Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия (Апатиты, 1998); Международный симпозиум по проблемам Ладожского озера и других больших озер (Петрозаводск, 1999; Йоэнсу, Финляндия, 2002); Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии (Петрозаводск, 1999, 2001); Охрана водных биоресурсов в условиях интенсивного освоения нефтегазовых месторождений на шельфе и внутренних водных объектах (Москва, 2000); Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера (Сыктывкар, 2003; Вологда, 2005; Петрозаводск, 2009); Микология и альгология (Москва, 2004); Экологические проблемы северных регионов и пути их решения (Апатиты, 2004, 2012, 2019); Окружающая среда и влияние изменения климата на пресноводные экосистемы (Москва, 2005); Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий (Архангельск, 2005); Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований (Петрозаводск, 2006); Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика (Петрозаводск, 2006); Оценка воздействия глобальных изменений на европейские пресноводные экосистемы (Бланес, Испания, 2008); Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы, Критерии оценки качества вод и методы нормирования антропогенных нагрузок, Современные методы исследования и оценки качества вод, состояния водных организмов и экосистем в условиях антропогенной нагрузки (Борок, 2008); Междунар. симпозиум по проблемам больших озер

Европы (Норталье, Швеция, 2009); XXVIII Междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера» (Петрозаводск 2009); Междунар. науч. конф. «Проблемы экологии. Чтения памяти проф. М.М.Кожова» (Иркутск 2010); 4-я и 5-я Междунар. науч. конф., посвященные памяти проф. Г.Г.Винберга, «Современные проблемы гидроэкологии» (Санкт-Петербург, 2010, 2015); IV Всерос. конф. по водной экотоксикологии, посвященной памяти Б.А. Флерова, «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы» (Борок, 2011); 7-й и 8-й Междунар. Симпозиумы по Европейским пресноводным наукам (Жирона, Испания, 2011; Мюнстер, Германия, 2013); 7-я Междунар. науч. конф., BALTEX «Изменения в циклах энергии, воды и материи» (Богхольм, Швеция, 2013); I Междунар. конф. «Мониторинг состояния природной среды Антарктики и обеспечение деятельности национальных экспедиций» (Нарочь, Белоруссия, 2014); XVI Междунар. экол. форум «День Балтийского моря» (Санкт-Петербург, 2015); III Междунар. конф. «Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем» (Санкт-Петербург, 2017); I Междунар. конф. «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» (Петрозаводск, 2017); VII Междунар. конф. «Принципы и способы сохранения биоразнообразия» (Йошкар-Ола, 2019).

По материалам диссертации были сделаны доклады на семинаре Лаборатории пресноводной и экспериментальной гидробиологии Зоологического института РАН (г. Санкт-Петербург), на семинаре Лаборатории гидроэкологии Института водных проблем РАН (г. Москва), на семинаре Лаборатории альгологии Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (п. Борок Ярославской области), на заседании Ученого Совета Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

Личный вклад автора. Диссертационная работа основана на материалах полевых сборов, выполненных лично или при участии автора в комплексных экспедициях в период с 1993 по 2016 г. на ряде крупных и малых водоемов Севера ЕТР и Восточной Антарктиды. Все полевые материалы собраны, обработаны и проанализированы автором лично.

Автором сформулирована проблема, поставлены задачи, разработаны оригинальные методы и подходы, проанализированы результаты исследований и сформулированы выводы и обобщения,

подготовлены основные публикации по выполненной работе. В работе привлекались архивные материалы и базы данных Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Института водных проблем Севера КарНЦ РАН и Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, переработанные автором.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 83 печатных работ, в том числе 25 – в отечественных и зарубежных журналах, включенных в перечень ВАК, 1 – монография, 9 – глав в коллективных монографиях, 3 – в периодических рецензируемых изданиях и 45 – в материалах конференций.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 368 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов, списка литературы и приложения, включающего аннотированный каталог водорослей планктона исследованных водоемов. Она содержит 35 таблиц, 58 рисунков и 1 приложение. Список литературы включает 622 наименования, в том числе 265 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность чл.-корр. РАН Т.И. Моисеенко и д.б.н. Л.Г. Корневой за ценные советы; чл.-корр. РАН Н.Н. Филатову за организацию экспедиции в Антарктиду и обсуждение результатов. Автор глубоко признателен сотрудникам Лаборатории водных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН: к.г.н. С.С. Сандимирову, к.б.н. О.И. Вандыш, к.б.н. Л.Я. Каган, к.х.н. Л.П. Кудрявцевой, профессору В.А. Даувальтеру, профессору Г.В. Калабину; сотрудникам Института водных проблем Севера КарНЦ РАН: д.б.н. Н.М. Калинкиной, к.б.н. М.Т. Сярки, к.б.н. Т.А. Чекрыжевой, к.г.н. Е.В. Текановой; д.б.н. А.А. Лукину, к.б.н. А.В. Рябинкину, д.х.н. П.А. Лозовику, к.х.н. Н.А. Белкиной, к.х.н. Н.А. Ефременко за поддержку и содействие в полевых и лабораторных работах. Автор благодарен команде и капитану НИС «Эколог» С.В. Прошкину за помощь в экспедициях на Онежском, Ладожском озерах и Выгозерском водохранилище.

Экспедиционные и лабораторные исследования осуществлялись при финансовой поддержке РФФИ (гранты 98-05-79116, 98-05-64250, 99-05-79014, 07-05-00302, 08-05-10072, 10-05-00963, 19-04-01000) и Фонда содействия отечественной науке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Условия, определяющие существование фитопланктона в континентальных водоемах

В главе описаны основные закономерности действия экологических факторов, роль гидрологических, метеорологических и гидрохимических факторов в формировании среды обитания фитопланктона, особенности условий в литорали и пелагиали больших озер, общность и специфичность экосистем малых и средних озер.

Фитопланктонное сообщество — это сложная многокомпонентная система, развитие которой в водных экосистемах определяется многочисленными факторами и связями. Основная роль в развитии водорослей отводится световым условиям, которые определяются поступлением солнечной радиации и прозрачностью воды. Основные факторы, способствующие развитию фитопланктона:

Природные: климат, температура, освещенность, биогенные вещества, гидродинамические условия, пресс хищного зоопланктона.

Антропогенные: эвтрофирование (P, N), загрязнение (Ni, Cu, фенолы, нефтепродукты, и др.), закисление (pH, SO_4), термофикация ($\Delta t>6.0$ ^oC).

Ряд работ посвящен роли метеорологических, гидродинамических условий и биогенных элементов в процессах жизнедеятельности водорослей (Николаев, 1971; Healey, 1973; Россолимо, 1977; Киселев, 1980; Михеева, 1983; Левич и др., 1997; Алимов и др., 2013; Корнева, 2015). Соотношение в воде незаменимых химических элементов признается многими исследователями важным фактором, прямо влияющим на структуру сообщества фитопланктона в водоемах.

Известны разные подходы к изучению влияния факторов среды на развитие водорослей (Healey, 1973; Михеева, 1983; Левич и др., 1997; Корнева, 2015). Проведение лабораторных опытов стало возможным благодаря выделению монокультур водорослей и массовым их выращиванием на жидких средах. Однако результаты лабораторных экспериментов могут в большой степени корректироваться совместным влиянием многих факторов, не учитываемых в опыте. Поэтому широкое применение получили натурные эксперименты с изолированием больших объемов воды или с использованием всего водоема. Основываясь на анализе работ, выполненных с применением

разнообразных подходов к проблеме сукцессии видов в фитопланктонном сообществе, выделены некоторые связи структурно-функциональных показателей фитопланктона с факторами среды в исследованных водоемах Севера ЕТР (Шаров, 2004).

Различные районы больших водоемов и локальные заливы находятся на разных стадиях сукцессии и, как следствие, имеют различный трофический статус (Ладожское озеро…, 2002). Это приводит к увеличению разнообразия и видового богатства фитопланктона озера в целом. В прибрежной зоне роль локальных факторов более значимая. Небольшие озера арктической зоны отличаются бедным видовым составом сообществ фитопланктона и упрощенными пищевыми цепями, что определяет невысокую устойчивость данных экосистем (Шаров, 2004).

Глава 2. Объекты исследования. Краткое физико-географическое описание регионов и лимнологическая характеристика исследованных водоемов

Объектами исследования являлись сообщества фитопланктона водоемов Европейского Севера России и озера Восточной Антарктиды в различных климатических условиях и под влиянием разнотипного антропогенного воздействия (рис. 1). Среди исследованных водных объектов к категории «большие озера» по величине общей площади поверхности (более 100 км^2) относятся 6 водоемов, в том числе Великие озера мира – Ладожское озеро; очень большие – Онежское, Чудско-Псковское и Выгозеро; большие – Имандра и Умбозеро. К категории «малые озера», согласно общепринятым классификациям (Китаев, 2007), можно отнести озера с площадью водной поверхности 0.1-10 км^2. Озера с площадью зеркала 10-100 км^2 относят к категории «средние озера».

Исследованные водоемы значительно различались как по природным характеристикам, так и по уровню антропогенной нагрузки. Разнотипность озер определяется в первую очередь природными особенностями: площадь поверхности от 0.1 до 18135 км^2; площадь водосборной территории от 1 до 258300 км^2; географические и климатические особенности от Арктики и Антарктики до континентальной области умеренного климата; природные зоны тундры, лесотундры и европейской тайги; высота над уровнем моря от 0 до 475 м.

Рисунок 1. Районы проведения экспедиционных исследований в 1993-2016 гг.

Природно-климатические особенности определяют основные факторы, влияющие на развитие фитопланктона в водоемах: термический, световой режим и обеспеченность биогенными веществами.

По своим природным показателям холодноводные озера характеризуются высоким насыщением кислорода (95%). Цветность воды варьирует от 8 до 150 град. Pt-Co шкалы. Природные характеристики региона обусловливают олиготрофный тип озер. В природно-чистых водоемах содержание $P_{общ.}$ в среднем 6 мкг/л, $N_{общ.}$ 70–80 мкг/л. Безледный период длится в среднем 160 дней на малых и 210 дней на больших озерах Севера ЕТР.

Большинство пресноводных озер в Восточной Антарктиде большую часть года покрыто льдом. Среднегодовая температура воздуха -11 °С. Температура воды составляла 0.1–4 °С, pH варьировала от 6.8 до 7.5, электропроводность равнялась 0.02–0.45 мСм/см. Озера антарктических оазисов до сих пор являются слабо изученным природным объектом.

На Севере Европы в течение XX и первого десятилетия XXI века отмечается положительная тенденция изменения средней годовой температуры воздуха (рис. 2). Коэффициенты линейных трендов за период 1951–2009 гг. составляют 0.20–0.34 °С/10 лет для территории Карелии и около 0.30 °С/10 лет на территории Кольского полуострова (Филатов и др., 2012). Анализ изменения среднемесячной температуры воздуха в июле (самом теплом месяце в году) в районе Чудского озера за период 1989–2014 гг. выявил положительный тренд среднегодового роста в среднем на 2 °С (Sharov, Andreeva, 2015).

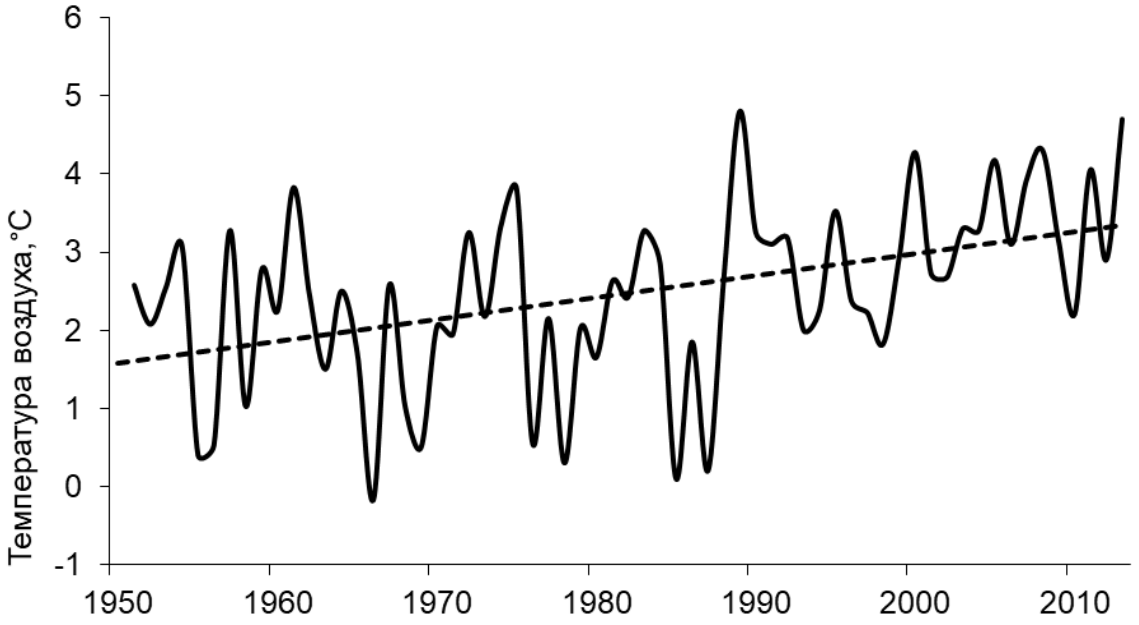

Рисунок 2. Среднегодовая температура воздуха на водосборном бассейне Онежского озера в 1951–2014 гг. (Sharov, Andreeva, 2015)

Наблюдаемые климатические изменения могут привести к трансформации структуры водных сообществ и их количественных характеристик. В водоемах Севера России изменения климата сказываются в первую очередь на ледовом режиме (Филатов и др., 2013). Температура водной массы Онежского озера в течение 2000–2009 гг. превышала среднее многолетнее значение, равное 4.3 °С, на 0.3–0.7 °С, а продолжительность безледного периода на Онежском озере возросла (рис. 3) в среднем от 215 дней за год в конце XIX века до 227 дней к началу XXI столетия (Филатов и др., 2012); озеро стало очищаться ото льда на 8–10 дней раньше. Безледный период на Чудско-

Псковском озере также имеет тренд на увеличение (рис. 3). Это может влиять на длину вегетационного периода и на сезонные циклы водных организмов.

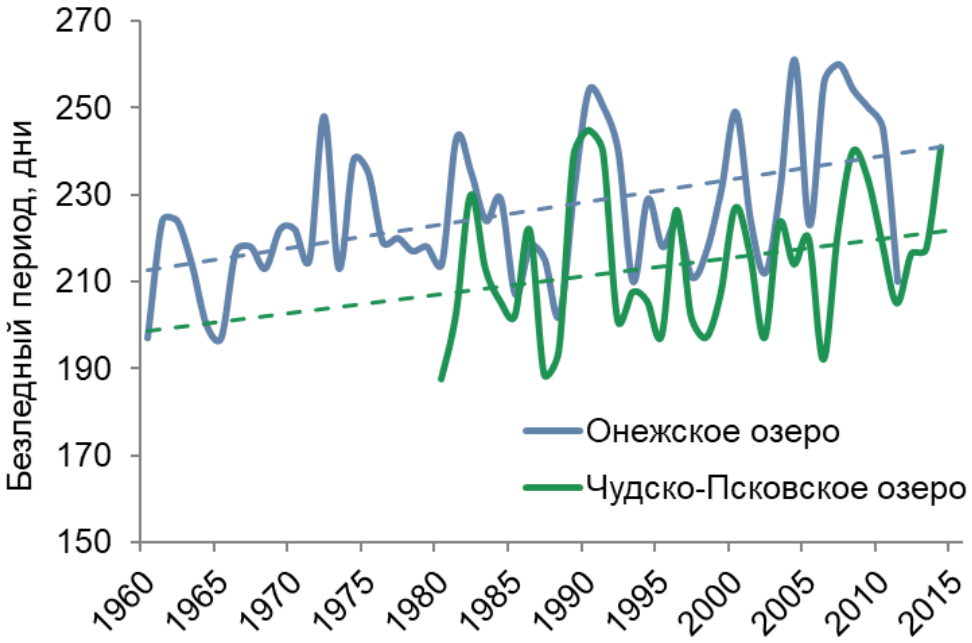

Рисунок 3. Изменение продолжительности безледного периода на Онежском и Чудско-Псковском озерах (Sharov, Andreeva, 2015)

Климатические условия Севера ЕТР находятся под сильным влиянием циркуляционных атмосферных процессов, характеризуемых индексом североатлантического колебания (САК). При положительных значениях индекса преобладают сильные западные ветры, несущие теплый и влажный воздух на Север Европейского континента, что особенно ярко проявляется в зимнее время. Ранняя весна (высокий индекс САК в зимний период) приводит к увеличению вегетационного периода, интенсивному прогреву воды, смещению сезонных циклов и увеличению продукционных показателей гидробионтов.

Глава 3. Разнообразие фитопланктона разнотипных водоемов Севера Европейской территории России и Восточной Антарктиды

В период исследований (1993-2016 гг.) в фитопланктоне различных озер на Севере ЕТР и Восточной Антарктиды выявлен 781 вид, разновидность и форма водорослей, из них: *Bacillariophyta - 368,*

Chlorophyta – 175, Cyanobacteria - 127, Chrysophyta - 62, Dinophyta - 19, Euglenophyta – 16, Cryptophyta – 14 (табл. 1).

Таблица 1.

Количество таксонов фитопланктона рангом ниже рода в исследованных водоемах

Отделы	Большие озера						Малые и средние озера			
	Ладожское	Онежское	Выгозерское водохранилище	Чудско-Псковское	Имандра	Умбозеро	Озера Арктики-Субарктики	Озера бореальной зоны (Карелия)	оз. Кенозеро (Архангельская обл.)	Озера Восточной Антарктиды
Cyanobacteria	38	103	11	43	27	1	14	20	16	21
Chrysophyta	23	59	25	2	26	5	23	9	5	1
Bacillariophyta	52	365	122	44	107	37	47	32	23	33
Xantophyta	6	10	2	1	-	-	3	1	-	10
Cryptophyta	7	10	2	9	4	1	8	4	4	1
Dinophyta	9	15	11	2	3	1	8	3	3	-
Euglenophyta	1	16	5	1	2	-	-	1	-	-
Chlorophyta	118	136	86	84	65	9	45	41	34	20
Всего	**254**	**714**	**264**	**186**	**234**	**54**	**148**	**111**	**85**	**86**

Проведенное сравнение видового состава доминирующих комплексов фитопланктонных сообществ в различных холодноводных озерах показывает, что видовое богатство водорослей в основном определяется размерами и характеристиками водосбора (Шаров, 2004, 2017). Общее число таксонов в видовом составе фитопланктона в исследованных озерах колебалось от 13 в малых озерах Антарктиды до 714 в Онежском озере и, как правило, нарастало по мере увеличения площади водосбора и количества поступающих биогенных веществ.

Анализ связи между характеристиками фитопланктона и размерами озер показал, что общее число видов имеет связь с площадью озера (рис. 4) и его водосборного бассейна. Ранговый коэффициент корреляции Спирмена (Rs=0.68, p = 0.001) показывает, что

данная связь статистически значима. Для биомассы фитопланктона такая связь также статистически значима (Rs=0.55, *p* = 0.003, n = 27).

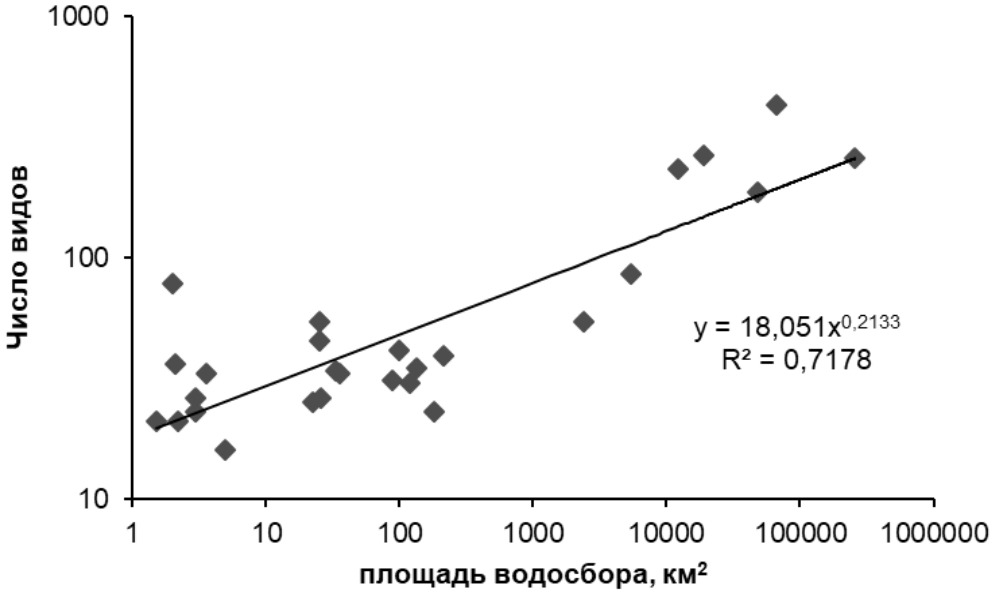

Рисунок 4. Зависимость числа видов фитопланктона от площади водосбора озер

Известно, что видовое богатство фитопланктона уменьшается в широтном направлении от тропических зон к полярным. Оно возрастает по мере увеличения объема воды и снижения минерализации (Алимов и др., 2013). Наибольшее число видов фитопланктона отмечается в озерах с емкостью (средняя/максимальная глубина) 0.4 и минерализацией воды 0.03 г/л (Алимов и др., 2013).

В фитопланктоне холодноводных больших озер преобладают диатомовые водоросли (табл. 2). В небольших озерах роль диатомовых снижается, и доминантами чаще выступают золотистые, криптофитовые и зеленые, иногда динофитовые и цианобактерии (Шаров, 2004).

Вспышки развития цианобактерий в районах исследований в 1993–2006 гг. не зарегистрированы (биомасса <0.1 мг/л). Хотя в отдельных мелководных заливах биомасса цианобактерий достигала 0.5 мг/л. По результатам исследований 2006-2014 гг. (Денисов, Кашулин, 2016) в оз. Имандра наблюдалось массовое развитие цианобактерий *Dolichospermum (Anabaena) lemmermannii* (Richter) Wacklin, Hoffmann& J.Komárek. Биомасса достигала экстремально высоких для Субарктики значений – свыше 50 мг/л.

Таблица 2

Относительная средняя биомасса доминирующих видов фитопланктона и соответствующие коды морфофункциональной классификации фитопланктона.

Вид	Код	Большие озера						Малые озера			
		Ладожское	Онежское	Выгозерское водохранилище	Чудско-Псковское	Имандра	Умбозеро	Озера Арктики-Субарктики	Озера бореальной зоны (Карелия)	оз. Кенозеро (Архангельская обл.)	Озера Восточной Антарктиды
Aulacoseira islandica	B	20	32	16	8	15	2	0.5	1	1	0
Aulacoseira distans	C	2	2	2	0.1	2	4	1	0	0.1	0
Aulacoseira italica	B	6	10	1	0	4	8	0.1	0	1	0
Aulacoseira granulata	P	0.1	1	0	6	0	0.1	0	0.1	12	0
Asterionella formosa	C	7	9	13	0.1	9	42	2	3	11	3
Cyclotella ssp.	B	2	1	3	2	5	5	5	1	2	0.2
Stephanodiscus ssp.	B	5	0.5	0.1	4	9	0	0.1	0.2	0.3	0.1
Rhizosolenia longiseta	A	0.1	0.5		0	6	2	2	22	7	0
Tabellaria fenestrata	N	9	11	28	38	8	5	8	15	40	1
Dinobryon ssp.	E	1	4	0	0.2	11	1	30	6	0,5	0
Ceratium hirundinella	L_O	0.1	0.5	1	3	5	0	0	2	1	0.1
Peridinium ssp.	L_O	0.5	3	0.5	0	10	1	10	7	2	0
Aphanizomenon flos-aquae	H1	23	0.1	0	14	0.1	0.5	0	0	0	0
Anabaena ssp.	H1	2	2	1	3	2	1	0.3	1	0.1	20
Cryptomonas ssp.	Y	17	3	1	3	9	0.1	3	1	0.1	0

В период исследований 1993–2016 гг. комплекс доминирующих видов с наибольшими частотами встречаемости и доминирования составляли 15 таксонов из нескольких отделов диатомовых, золотистых, перидиниевых, криптофитовых водорослей и цианобактерии (табл. 2). Согласно кодам морфофункциональной классификации (Reynoldsetal., 2002) пресноводного фитопланктона и наибольшей средней относительной биомассе доминирующих видов, ассоциации фитопланктона исследованных озер можно отнести к 9 типам: A, B, C, E, N, P, Lo, H1 и Y.

Группу A составляют виды, обитающие в высоко прозрачных озерах с низким содержанием биогенных веществ. Группу B – виды, живущие в перемешиваемых, мезотрофных средних размеров озерах, толерантные к световому дефициту, чувствительные к повышению pH, к началу стратификации, снижению содержания кремния. Тип C составляют виды, предпочитающие перемешиваемые, мелкие озера, толерантные к световому дефициту, чувствительные к истощению концентрации кремния в воде. N – виды мезотрофного эпилимниона, чувствительные к стратификации и толерантные к дефициту биогенных веществ. P – виды, предпочитающие эвтрофный эпилимнион, толерантные к средней освещенности и дефициту углерода, чувствительные к стратификации и снижению содержания кремния в воде. Y – обычно представители небольших обогащенных озер, фаготрофы, толерантные к низкой освещенности. E – виды, обычно обитающие в небольших олиготрофных озерах, чувствительны к дефициту кислорода и толерантны к низкому содержанию биогенных веществ. Группу H1 представляют диазотрофные виды, толерантные к низкому содержанию азота и углерода, чувствительные к перемешиванию толщи воды, низким фосфору и освещенности. В группе Lo представители разнотипных озер, чувствительны к перемешиванию.

Общая биомасса фитопланктона варьировала в широких пределах - от нескольких мкг/л в антарктических озерах до 34 мг/л в бореальном оз. Псковском. При эвтрофировании в районах поступления хозяйственно-бытовых сточных вод в субарктическом оз. Имандра биомасса достигала высоких величин (20 мг/л). В большинстве озер летняя биомасса фитопланктона обычно не превышала 3 мг/л (табл. 3).

Низкие количественные показатели и видовое разнообразие фитопланктона являются характерной чертой антарктических озер (Sharov et al., 2015; Шаров, Толстиков, 2018), где отсутствует классическая пищевая цепь и преобладает микробная петля (Laybourn-Parry et al., 1992).

Сезонная динамика биомассы фитопланктона исследованных водоемов характеризуется одним или несколькими максимумами. Весеннее развитие фитопланктона начинается подо льдом. В озерах Онежском и Ладожском наблюдался один весенний пик биомассы,

Таблица 3

Средняя за вегетационный сезон биомасса фитопланктона и концентрация хлорофилла «*а*» в исследованных водоемах

Отделы	Большие озера						Малые и средние озера			
	Ладожское	**Онежское**	**Выгозерское водохранилище**	**Чудско-Псковское**	**Имандра**	**Умбозеро**	**Озера Арктики-Субарктики**	**Озера бореальнойзоны (Карелия)**	**оз. Кенозеро (Архангельская обл.)**	**Озера Восточной Антарктиды**
Cyanobacteria	0.5±0.1	0.1±0.1	0.04±0.01	1.3±0.1	0.1±0.02	<0.01	0.1±0.01	0.2±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01
Chrysophyta	<0.01	0.1±0.1	<0.01	0.1±0.1	0.1±0.01	<0.01	0.2±0.01	0.1±0.01	0.02±0.01	<0.01
Bacillariophyta	0.5±0.1	1.4±0.3	0.8±0.2	1.2±0.3	0.5±0.03	0.89±0.1	0.1±0.03	2.1±0.1	2.54±0.1	<0.01
Cryptophyta	0.6±0.1	0.2±0.1	<0.01	0.1±0.1	0.4±0.05	<0.01	0.02±0.01	0.1±0.01	<0.01	<0.01
Dinophyta	<0.01	0.1±0.1	0.14±0.03	0.1±0.1	0.1±0.01	0.1±0.01	0.1±0.01	0.1±0.01	0.1±0.01	<0.01
Chlorophyta	0.2±0.1	0.1±0.1	0.1±0.01	0.2±0.1	0.3±0.02	<0.01	0.04±0.01	0.5±0.07	0.2±0.01	0.01±0.01
Общая биомасса, мг/л	**1.9±0.4**	**2.0±0.5**	**1.12±0.3**	**2.9±0.7**	**1.37±0.3**	**0.93±0.2**	**0.8±0.2**	**3.17±0.7**	**2.8±0.5**	**0.02±0.01**
Хлорофилл «а», мкг/л	5.2±1.1	2.7±0.7	4.1±0.5	21.1±3.5	2.6±0.5	1.2±0.3	0.6±0.2	5.4±1.2	4.5±1.2	0.2±0.1

связанный с развитием диатомовой водоросли *Aulacoseira islandica* (O.Müll.) Simonsen. В малых озерах севера Карелии и горной тундры Кольского полуострова весенний пик связан с развитием динофитовых водорослей (Шаров, 2004; Никулина, 2016).

- **Диатомовые водоросли *Bacillariophyta*.** Самая большая и распространенная группа водорослей в исследованных озерах. В большинстве водоемов доминирует практически весь год. Наиболее часто встречаются представители родов: *Aulacoseira, Asterionella, Tabellaria, Rhizosolenia, Diatoma, Fragillaria, Cyclotella, Stephanodiscus.*
- **Зеленые водоросли *Chlorophyta*.** Вторая группа по числу видов. Видовой состав сильно меняется в течение года. Чаще других доминируют рода*: Pandorina, Eudorina, Oocystis, Scenedesmus, Elakatothrix, Dictyosphaerium.*
- **Цианобактерии *Cyanobacteria.*** В период исследований до 2000-х гг. крайне редко наблюдались вспышки численности. С 2000 г. во второй половине летнего сезона отмечалось обильное развитие *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfsex Bornet & Flahault, *Microcystis*

aeruginosa (Kützing) Kützing, *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagn. et Komarek. В последние десятилетия ежегодно наблюдается массовое развитие видов родов *Aphanothece, Anabaena (Dolichospermum), Phormidium* во многих водоемах, в том числе в Арктике.

- **Золотистые *Chrysophyta.*** Широко распространенная группа, особенно в небольших арктических озерах. Наибольшее развитие достигается в середине лета. Выделяется один наиболее распространенный род - *Dinobryon*.
- **Динофитовые *Dinophyta.*** Наблюдаются весной подо льдом и в начале лета, однако в августе иногда может произойти массовое развитие видов рода *Peridinium*.
- **Криптофитовые *Cryptophyta.*** Довольно распространенные водоросли, часто доминируют в районах поступления хозяйственно-бытовых стоков. Наиболее встречаемые виды родов *Cryptomonas, Rhodomonas lacustris* Pascher & Ruttner, *Komma caudata* (L.Geitler) D.R.A.Hill.
- **Эвгленовые.** Редкая группа водорослей. Встречались только единичные экземпляры.

Глава 4. Отклик фитопланктона на изменение природных и антропогенных факторов

4.1. Влияние климатической изменчивости. Увеличение климатической изменчивости (потепление климата) в регионе исследования многократно усиливает эвтрофирование вод и вызывает массовое развитие водорослей фитопланктона и цианобактерий в летний период даже в северных водоемах (Денисов и др., 2017), что ранее в 1990-х гг. не наблюдалось (Шаров, 2004).

На примере оз. Онежского были изучены характеристики фитопланктона за 20-летний период в связи с факторами климатической изменчивости (Sharov et al., 2014). Корреляционный анализ обнаружил значимые ($p<0.05$) положительные связи между содержанием хлорофилла «а» и температурой воды (Rs = 0.66; p = 0.03) и отрицательные между содержанием хлорофилла «а» и продолжительностью безледного периода (Rs = -0.53; p = 0.05).

Выявлено, что общая численность фитопланктона зависит от продолжительности периода безо льда (Rs = -0.89; p = 0.006).

Наибольшей численность была для тех лет, когда был самым длительным период ледового покрова озера (Sharov et al., 2014). В то же время не обнаружены достоверные корреляционные связи между климатическими переменными и общей биомассой фитопланктона Онежского и Чудско-Псковского озера из-за сильных сезонных колебаний и возможного влияния других факторов (Sharov et al., 2014; Sharov, Andreeva, 2015).

В оз. Чудско-Псковском выявлено, что биомасса диатомовых водорослей в августе отрицательно коррелирует с температурой воды (Rs = -0.80; p = 0.01). Среднегодовое содержание азота коррелировало с уровнем воды в озере (Rs = 0.74; p = 0.02). Уровень воды в Чудском озере связан (Rs = 0.54; p= 0.003) со среднемесячным индексом североатлантического колебания (САК) в августе (Шаров, Андреева, 2016). Очевидно, что в маловодные годы с водосбора поступает меньше биогенных веществ в озеро, чем в многоводные годы, снижая степень развития фитопланктона.

Численность планктонных цианобактерий оз. Чудско-Псковского значительно возрастала (Rs = 0.89; p = 0.006) в годы с высоким индексом САК. Обнаружены тесные положительные связи (Rs = 0.83; p = 0.02) между концентрацией Р в воде в августе и летним индексом САК, а отрицательные с САК в марте (Rs = -0.82; p= 0.001) (Sharov, Andreeva, 2015).

Содержание хлорофилла «а» (Rs = -0.78; p = 0.01) и интенсивность первичного продуцирования фитопланктона находится в обратной зависимости от количества осадков в августе (Sharov et al., 2014), которое в свою очередь связано с продолжительностью солнечного сияния (Rs = -0.77; p = 0.01).

Множественный регрессионный анализ подтверждает тесную связь между САК и региональными климатическими переменными (температура воды, осадки, безледный период) при p<0.01, а также между индексом арктической осцилляции (АО) и этими климатическими переменными при p<0.02. Кроме того, этот анализ (при p<0.05) показывает, что концентрация хлорофилла «а» в воде определяется в основном глобальными показателями, зависящими от температуры воды, и связана с продолжительностью безледного периода (Шаров, Андреева, 2015).

Освобождение ото льда озер Антарктиды не приводит к прогреву воды, как это характерно для озер Восточной Фенноскандии, так как после схода льда происходит быстрое остывание водной массы от поверхности до дна в результате радиационного выхолаживания и ветро-волнового перемешивания (Шаров, Толстиков, 2018). При этом устанавливается изотермия с температурой 0.5 °С, что как минимум на 3°С ниже по сравнению с озерами, покрытыми льдом. При перемешивании воды происходит отрыв донных водорослей от субстрата и переходу их в планктонное состояние. При этом низкие значения биомассы и видового разнообразия подледного фитопланктона увеличиваются в десятки раз.

Оптические свойства воды и льда исследованных озер Антарктиды позволяют проходить достаточному количеству света до глубины свыше 30 м, что обеспечивает, совместно с постоянной температурой воды около 4 °С, хорошие условия для развития циано-бактериальных матов и мха на дне озер (Sharov et al., 2015).

4.2. Влияние антропогенных факторов. Структура экосистем, не подверженных антропогенным воздействиям, меняется во времени в зависимости от изменений внешних и внутренних факторов. Это эволюционные и связанные с ними сукцессионные процессы. Аналогичным образом структурные и функциональные изменения происходят при антропогенных воздействиях, например, эвтрофировании, загрязнении, ацидификации. В этих случаях процессы структурных и функциональных изменений протекают с большими скоростями, чем в природных условиях. Характерной особенностью антропогенного влияния на крупные озера (Ладожское, Онежское, Имандра) является смешанное загрязнение хозяйственно-бытовыми и промышленными сточными водами, содержащими как биогенные элементы, так и токсичные вещества. В период максимальных антропогенных нагрузок изменения водной химии произошли во всех трех озерах (табл. 4) по одному типу: снизилась прозрачность, увеличились pH, содержание сульфатов и хлоридов, биогенных элементов, появились контаминанты, обладающие токсичными свойствами (Моисеенко, Шаров, 2011).

Таблица 4

Гидрохимическая характеристика наиболее загрязненных районов больших озер

Показатель	Природное (фоновое) состояние			Период интенсивного загрязнения			Период снижения загрязнения		
	1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
pH	6.7	6.8	7.5	7.3	7.1	7.6	7.4	7.0	7.5
$P_{общ}$, мкг/л	7	9	11	26	54	178	26	24	34
PO_4, мкг/л	2	1	3	21	30	100	2	5	9
$N_{общ}$, мкг/л	250	350	450	436	750	920	195	648	890
NO_3, мкг/л	30	110	130	102	120	240	19	85	230
$N_{общ}/P_{общ}$	43	44	45	17	14	12	15	27	26
Si, мг/л	0.5	2	1	1	1.2	0.5	0.42	0.1	0.2
Chl “a”, мкг/л	0.4	0.7	0.7	3.8	8.4	8.0	3.6	6.8	7.9
Ni, мкг/л	<1	-	-	43	0.1	-	11.0	<0.1	-
Cu, мкг/л	<1	<1	<1	14	6.0	-	6.0	4.5	7.0

Примечание: 1 – плес Большая Имандра, 2 - Кондопожская губа Онежского озера, 3 - Волховская губа Ладожского озера в различные периоды антропогенной нагрузки (приведены средние значения за вегетационный период) (Моисеенко, Шаров, 2011).

Результаты проведенных исследований показывают, что в водоемах Севера в течение длительного действия техногенного загрязнения произошли качественные и количественные изменения во всех трофических звеньях экосистем (Моисеенко и др., 1999; Кашулин и др., 2018). Трансформация сообществ фитопланктона (табл. 5) определяется интенсивностью влияния различных антропогенных факторов: закисления, эвтрофирования, токсичного и теплового загрязнения, а также их комплексным воздействием (Шаров, 2017). В большинстве случаев при антропогенном влиянии увеличилась вариабельность динамики биомассы фитопланктона. Известно, что наименьшая вариабельность динамики биомассы характерна для арктических и тропических водоемов (Алимов и др., 2013).

Таблица 5

Показатели фитопланктона наиболее загрязненных районов (обозначения в табл. 4) больших озер (приведены средние значения за вегетационный период) (Моисеенко, Шаров, 2011)

Показатель	Природное (фоновое) состояние			Период интенсивного Загрязнения			Период снижения загрязнения		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Биомасса (B), мг/л	0.4	0.7	0.5	3.6	2.4	5.5	3.4	1.7	2.1
Числ-ть (N), кл.10^6/л	0.3	0.5	0.4	3.8	3.6	12.3	3.2	2.5	3.4
P, мг C/м^3 сутки	50	52	150	266	412	410	194	230	301
H (индекс Шеннона)	3.5	3.5	3.4	2.5	3.3	3.1	3.1	3.8	3.6
B/N, 10^{-6} г	1.0	1.0	1.3	0.9	0.6	0.4	1.0	0.7	0.6
%B *Stephanodiscus* sp.	0.3	0.2	0.3	6	1	3	8	2	4
%B *Cryptomonas* sp.	0.2	0.1	0.5	17	5	4	15	2	23
%B *Cyanobacteria*	3	3	4	9	6	65	11	7	32
%B *Chlorophyta*	4	2	2	21	5	7	20	8	10

4.2.1. Эвтрофирование. Антропогенная нагрузка определяет неоднородность распределения фитопланктона по акватории больших водоемов. Небольшие озера, как правило, испытывают опосредованное антропогенное воздействие через воздушное загрязнение и изменение характера деятельности на водосборной территории. При комбинированном воздействии антропогенных факторов наибольшее влияние на фитопланктон оказывают хозяйственно-бытовые сточные воды. В результате их поступления увеличивается общая биомасса и снижается видовое разнообразие фитопланктона, сопровождаемое перестройкой структуры доминирующих комплексов: возрастанием роли криптофитовых, динофитовых и зеленых (вольвоксовых) водорослей (табл. 5). Интенсивное развитие цианобактерий наблюдалось в Ладожском и Онежском озерах. Произошли структурные изменения сообщества фитопланктона в направлении развития видов, характерных для эвтрофных водоемов: цианобактерии - *Oscillatoria tenuis* C. Agardh ex Gomont, *Oscillatoria planctonica* Woloszynska, *Anabaena lemmermanii, Anabaena hassalii* (Kütz.) Wittz., *Aphanizomenon flos-aquae, Microcystis aeruginosa*; зеленые - *Ankistrodesmus pseudomirabilis* Korschik,

Dictyosphaerium pulchellum Wood, *Coelastrum microporum* Näg., *Pandorina morum* (Müll.) Bory, *Eudorina elegans* (Brebisson) Kützing; криптофитовые - *Cryptomonas* sp. Распространенные в северных водоемах золотистые и динофлагелляты встречались редко. Среди диатомовых водорослей практически отсутствовали обычные виды из родов *Asterionella* и *Tabellaria*. Массовыми являлись представители родов *Fragilaria, Diatoma, Aulacoseira, Stephanodiscus.*

Изменения структуры фитопланктона и его количественных показателей, связанные с антропогенным эвтрофированием, наиболее заметно проявляются в Петрозаводской и Кондопожской губах Онежского озера, Волховской губе Ладожского озера и плеса Большая Имандра (табл. 5).

4.2.2 Токсичное загрязнение. Загрязнение тяжелыми металлами (увеличение концентрации Ni в 90 раз и Cu в 6 раз в воде относительно фоновых) не оказывает выраженного токсического влияния на уровень биомассы фитопланктона в исследованных водоемах (Шаров 2004; Моисеенко, Шаров, 2011). Высокое содержание биогенных элементов в воде, поступающих с коммунальными сточными водами, вероятно, уменьшает токсичность и оказывает стимулирующее влияние на фитопланктон. В структуре фитопланктона происходит снижение разнообразия (табл. 6), увеличивается доля зеленых водорослей – преимущественно родов *Scenedesmus* и *Pandorina* (Шаров, 2005). Пороговые концентрации металлов по отношению к водорослям отличаются на порядки в случае присутствия в воде органических веществ и комплексных соединений. В присутствии высоких концентраций соединений тяжелых металлов в сообществе фитопланктона наблюдается угнетение или исчезновение некоторых видов (Петрова и др., 2002). Опыт натурных наблюдений даже на чрезвычайно загрязненных водоемах показывает, что, хотя доминирующие виды фитопланктона меняются, сообщество не деградирует полностью (Шаров, 2005, 2008). Несмотря на обеднение видового состава и общее угнетение сообщества под действием тяжелых металлов, полная его деградация отмечается лишь изредка даже при исключительно высоких концентрациях тяжелых металлов (Петрова, 1990).

Таблица 6

Количество видов (N),
индекс видового разнообразия Шеннона (H)
и доминирующие виды фитопланктона в исследованных водоемах
при различных видах и уровнях загрязнения

Воздействие	N	H	Доминирующие виды
Токсические и коммунальные стоки			
Ni 10-20 мкг/л	15-30	1.5 - 3.5	*Stephanodiscus minutulis, Aulacoseira islandica, Rhyzosolenia eriensis, Eudorina elegans, Cryptomonas* sp.
Ni 20-100 мкг/л	10 - 30	1.0 - 3.0	*Rhyzosolenia eriensis, Limnothrix planctonica, Phormidium tenue, Scenedesmus* spp., *Eudorina elegans, Pandorina morum.*
Эвтрофирование			
$P_{общ}$ 10-20 мкг/л	20 - 35	2.0 - 4.0	*Cryptomonas* sp., *Stephanodiscus* sp., *Scenedesmus* spp., *Aulacoseira islandica,*
$P_{общ}$>20 мкг/л	20 - 30	1.0 - 3.5	*Cryptomonas* sp., *Stephanodiscus* sp., *Aulacoseira islandica, Fragilaria* sp., *Sphaerocyctis schroteri, Eudorina elegans*
Термальные стоки			
Δt 3.0 -6.0 °C	20 - 35	2.0 - 4.0	*Ceratium hirundinella, Rhyzosolenia longiseta, Aulacoseira italica, Dinobryon bavaricum*
Δt>6.0 °C	10 - 30	1.0 - 3.5	*Ceratium hirundinella, Peridinium aciculiferum, Dinobryon bavaricum, Asterionella formosa,Diatoma* spp., *Fragilaria capucina, F. crotonensis, Tabellaria fenestrata, Sphaerocyctis schroteri*
Условно чистые районы	> 25	> 3.5	*Aulacoseira italica, A. alpigena, Asterionella formosa, Tabellaria fenestrata, Cyclotella comta, Rhyzosolenia longiseta, Dinobryon bavaricum, Peridinium aciculiferum*

Высокие значения общей биомассы фитопланктона для северных водоемов (17 мг/л) были зарегистрированы в оз. Куэтсъярви, при этом концентрация Ni в воде составляла 50-80 мкг/л (Шаров, 2004). Экспериментальные исследования (Polyak et al., 2011) показали, что статистически значимый эффект от действия металлов на цианобактерии наблюдался при концентрации меди >6–7 мкг/л, никеля >50–85 мкг/л. Такие высокие концентрации редко встречаются в природных водоемах.

4.2.3 Закисление. При изучении совместного влияния токсичных металлов и низких pH на биомассу и видовой состав фитопланктона ряда озер (Шаров, 2005), несмотря на высокие концентрации меди и никеля, четкой корреляции между биомассой и содержанием металлов

не выявлено. Видовое разнообразие (рис. 5) служит лучшим индикатором закисления, чем биомасса, достоверной связи которой с величиной pH не установлено.

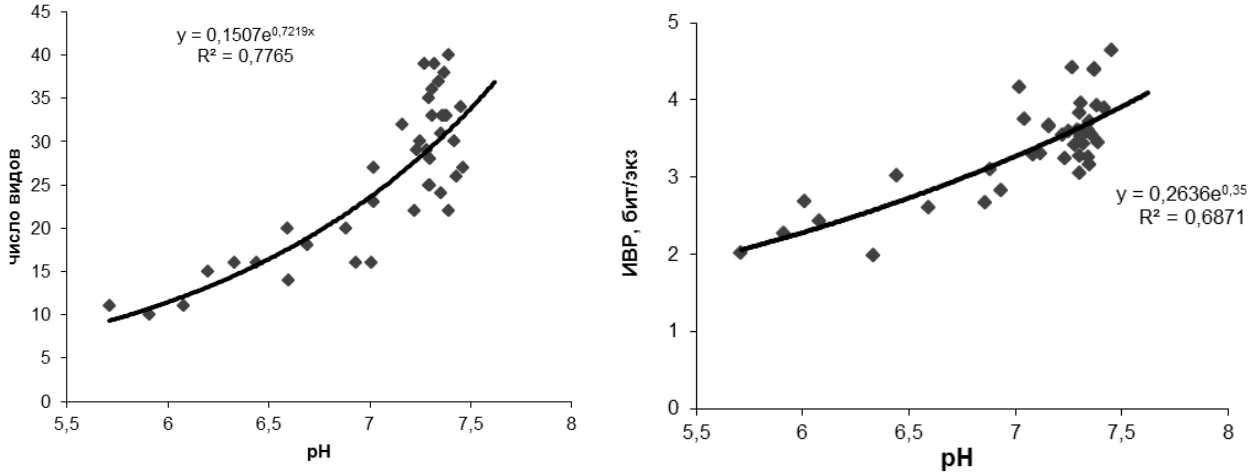

Рисунок 5. Зависимость числа видов (в пробе) фитопланктона и индекса видового разнообразия от pH воды в озерах Севера ЕТР (p<0.02) (Шаров, 2004)

При низких значениях pH воды (<5) биомасса фитопланктона иногда может достигать необычно высоких значений (Findlay, Kasian, 1986; Nenonen, 1991; Шаров, 2004), что, вероятно, связано с уменьшением пресса хищного зоопланктона на водоросли. Так как закисление водоемов приводит к снижению видового богатства зоопланктона, при этом остаются моновидовые сообщества устойчивых видов (*Eudiaptomus gracilis* (Sars)*, Bosmina longirostris* (O.F. Müller)) (Шаров, 2005). Соответственно увеличивается вариабельность динамики биомассы фитопланктона. Это было отмечено при исследовании небольших антропогенно закисленных озер на северо-западе Кольского п-ова (Шаров, 2004).

4.2.4 Термофикация. В зоне подогрева в результате сброса в оз. Имандра теплых вод Кольской АЭС изменения коснулись всех звеньев экосистемы. Но наиболее яркие проявления отмечены в сообществе фитопланктона, где произошли как количественные, так и структурные изменения (табл. 5). Максимальный прогрев поверхностного слоя воды в летний период достигает 26 °С, тогда как в необогреваемой зоне температура редко достигает 18 °С. Район влияния охватывает акваторию

радиусом около 5 км. Разница температуры достигает 10 ºС весной и 6 ºС летом (Шаров, 2004). Тепловое загрязнение в субарктических условиях ведет к увеличению обилия и изменениям структуры фитопланктона, сходным с теми, которые происходят при эвтрофировании. Наряду с общим увеличением количества планктонных водорослей отмечается образование теплолюбивых комплексов, в которых преобладает *Ceratium hirundinella* (Шаров, 2005, 2008). Высокие значения биомассы фитопланктона отмечены в наиболее прогреваемой части озера – в устье водосбросного канала. Из диатомовых преобладают *Rhizosolenia longiseta, Asterionella formosa* Hass., *Diatoma mesodon* (Ehr.) Kütz. *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kütz. Довольно часто встречаются *Fragilaria capucina* Desm. и *F. crotonensis* Kitt., колонии которых могут состоять из нескольких сотен клеток. Известно, что представители рода *Fragilaria* являются теплолюбивыми, в массе развиваются в прогретых слоях воды в условиях стратификации (Трифонова, 1990; Разумовский, 1998).

Зону влияния подогретых вод Кольской АЭС, вероятно, можно рассматривать как модельную акваторию для исследования отклика водных экосистем на возможное потепление климата.

4.3. Снижение антропогенной нагрузки. Водоемы способны к восстановлению, переходу в новое равновесное состояние системы после снижения антропогенной нагрузки (Моисеенко, Шаров, 2010; Moiseenko, Sharov, 2011).

Основываясь на обобщении многолетних исследований крупных озер Севера ЕТР: Ладожское, Онежское и Имандра, - сделан ретроспективный анализ их состояния; выявлены основные закономерности модификаций водных экосистем больших озер в условиях антропогенных нагрузок и их уменьшения (Моисеенко, Шаров, 2010). В период снижения антропогенной нагрузки на озера, начиная с 1990-х гг., обозначились тенденции к улучшению качества вод. Концентрации токсичных веществ в воде исследуемых заливах озер снизились (табл. 4): например: в оз. Имандра уменьшилась концентрация никеля как основного маркера загрязнения со 150 до 10 мкг/л; в Кондопожской губе Онежского озера снизилась концентрация лигносульфатов и фенолов, как маркеров загрязнения стоками целлюлозно-бумажной промышленности; в Ладожском также

уменьшились концентрации лигносульфатов и фенолов (Моисеенко, Шаров, 2011).

Содержание общих форм фосфора в Ладожском и Онежском озерах сократилось, в оз. Имандре - осталось на прежнем уровне; концентрации азота общего лишь слегка понизились во всех трех озерах (табл. 4). Концентрации биодоступных фосфатов и нитратов сократились значительно (в 6-20 раз), что свидетельствует об их более активной утилизации в изменившейся трофической структуре экосистемы. Интересна динамика кремния, концентрации которого не только не восстановились, но продолжают и планомерно снижаться из года в год, что связано с его активным поглощением диатомовыми водорослями.

Обилие фитопланктона снизилось в Волховской губе Ладожского озера и Кондопожской Онежского озера; в озере Имандра – сохраняется на прежнем уровне. Средние значения биомассы в озерах варьировали от 1.7 до 3.4 мг/л (табл. 5), а концентрации хлорофилла «*а*» - от 3.6 до 7.9 мкг/л (табл. 4). По-прежнему отмечается высокое обилие *Cryptomonas* sp*., Stephanodiscus* sp. и *Aulacoseira islandica.* Структура биомассы отличается от природного состояния большим количеством криптофитовых и зеленых водорослей. Высокая биомасса фитопланктона оз. Имандра в последние десятилетия связана с массовым развитием диатомовых водорослей и цианобактерий (Денисов и др., 2017).

После снижения антропогенного воздействия экосистемы не возвращаются в исходное природное состояние (Шаров, 2008; Моисеенко, Шаров, 2011). Происходит формирование новой стадии с характерными признаками. Снижение поступления общего фосфора с водосборного бассейна не приводит к быстрому падению концентрации хлорофилла «а» и обилия фитопланктона. При этом увеличивается относительное количество криптофитовых водорослей и цианобактерий.

Глава 5. Критерии оценки качества вод по индикаторам состояния фитопланктона в разнотипных водоемах

Современное понимание нормативов качества окружающей среды связывается, прежде всего, с обеспечением устойчивого

функционирования естественных экологических систем и предотвращением их деградации (Федеральный закон..., 2002). Качество воды является главенствующим фактором абиотической среды, определяющим устойчивость развития и степень деградации отдельных сообществ. В водных экосистемах ведущую роль в новообразовании первичного органического вещества играют водоросли. От их жизнедеятельности зависит функционирование всех остальных трофических уровней водоема.

В оценке состояния водоемов обычно используются следующие показатели фитопланктона:

- Общая биомасса (мг/л)
- Общая численность (клеток/л)
- Таксономическая структура (таксономические отношения)
- Видовое богатство / количество видов и связанные с ним показатели
- Биологическое разнообразие (индексы)
- Сапробность
- Размерная структура
- Доминирующие (ключевые виды), цветение
- Вредные виды (гипоксия, токсичность)
- Первичная продукция органического вещества
- Хлорофилл «а» (мкг/л)
- Функциональные группы R / K ; C- S- R (Reynoldsetal., 2002)
- Автотрофы / гетеротрофы
- Сукцессия

Проблема интерпретации значений индексов часто бывает очень сложна и может привести к существенным ошибкам. Величина индекса может быть вызвана специфическими метеорологическими или физико-химическими условиями. Форма зависимости величин индексов от степени загрязнения обычно бывает нелинейной. Например, видовое богатство и разнообразие достигают минимальных величин как в очень чистых, так и в очень загрязненных водах (Баринова и др., 2006).

Согласно руководящему документу «Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши РД 52.24.309-2011», программа проведения наблюдений по гидробиологическим показателям предусматривает определение

большого перечня параметров фитопланктона. Причем критерии оценки по показателям фитопланктона существуют только по индексу сапробности.

Поскольку фитопланктон зависит от региональных особенностей водоемов, невозможно использовать единую шкалу для оценки качества. Необходимо проводить нормирование относительно природного фонового состояния отдельных озер. Данный подход реализован в Европейской водной рамочной директиве (ЕС 2000). Для сравнения оценок качества среды обитания по различным показателям введен индекс EQR (Ecological Quality Ratio) - показатель качества. Это количественная оценка отклонения контролируемой водной экосистемы от ее естественного «ненарушенного» состояния. Ранжирование индекса экологического качества сделано по 5 классам (OSPAR, 2005; HELCOM, 2010) (табл. 7).

Таблица 7

Ранжирование индекса EQR по классам качества поверхностных вод (Шаров, 2017)

Класс качества вод	Характеристика / экологический статус	EQR
I	Очень чистая / Высокий	1-0.80
II	Чистая / Хороший	0.80-0.63
III	Удовлетворительно чистая / Посредственный	0.63-0.43
IV	Загрязненная / Плохой	0.43-0.23
V	Грязная / Очень плохой	0.23-0.01

Определение границ классов качества дается по величине отклонения от фонового (референтного) состояния. Индекс EQR равен 1, если наблюдаемые значения лучше или равны фоновым и приближаются к 0, когда отклонение от фонового становится большим (табл. 7).

Подход для определения фоновых условий основан на использовании: 1) исторических данных доиндустриального периода; 2) 90 перцентиль из набора данных для фоновых значений (до 1970-х гг.)

или отдаленных районов от источников загрязнения; 3) экспертного мнения.

Фоновые значения различных показателей фитопланктона в исследованных озерах (табл. 8) рассчитаны на основе собственных исследований (Моисеенко и др., 1999, 2002; Шаров, 2004, 2008; Шаров, Вислянская, 2007; Moiseenko et al., 2009; 2012; Моисеенко, Шаров, 2010, 2011; Филатов и др., 2013; Березина и др., 2015; Sharov et al., 2015; Шаров, Андреева, 2016) и с использованием литературных данных (Андреев, 1875, Верещагин, 1930; Крогиус, 1930; Рихтер, 1934; Порецкий и др., 1934; Воронихин и др., 1935; Крохин, Семенович, 1940; Лаугасте, 1966; Экосистема Онежского озера…, 2000, Ладожское озеро…, 2002, и др.). Как привило, средняя биомасса фитопланктона в холодноводных озерах не превышает 1 мг/л.

Таблица 8

Фоновые значения показателей фитопланктона исследованных озер (средние за вегетационный период)

Показатель	Большие озера						Малые и средние озера			
	Ладожское	Онежское	Выгозерское водохранилище	Чудско-Псковское	Имандра	Умбозеро	Озера Арктики-Субарктики	Озера бореальной зоны (Карелия)	оз. Кенозеро (Архангельская обл.)	Озера Восточной Антарктиды
Биомасса, мг/л	0.5±0.1	0.7±0.1	0.4±0.1	2.0±1	0.4±0.1	0.3±0.1	0.3±0.1	1.5±0.5	1.8±0.5	<0.06
Численность, кл10^6/л	0.4±0.2	0.5±0.1	0.2±0.1	1.0±0.5	0.3±0.1	0.2±0.1	0.3±0.1	0.3±0.1	0.3±0.1	<0.1
Хлорофилла, мкг/л	0.7±0.1	0.7±0.1	1.0±0.2	1.5±0.7	0.4±0.1	0.3±0.1	0.5±0.1	1±0.5	-	0.2±0.1
P, мг С/$м^3$ сутки	150±25	52±15	150±34	-	50±23	48±11	-	68±38	-	3±1
H (индекс Шеннона)	3.4±0.2	3.5±0.1	3.5±0.1	3.5±0.1	3.5±1.5	3.5±0.7	3.4±0.9	3.7±0.5	3.8±0.3	-
B/N, 10^{-6}г	1.3±0.1	1.0±0.2	1.7±0.5	2.0±0.5	1.3±0.2	1.5±0.2	1±0.2	5.7±1.2	6.0±2.0	0.5±0.1
%B *Stephanodiscus* sp	0.3±0.1	0.2±0.1	0.1±0.1	2.0±0.5	<0.3	<0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
%B *Cryptomonas*sp.	0.5±0.1	0.1±0.1	0.1±0.1	0.5±0.1	<0.2	<0.1	<1	20±10	<0.1	<0.1
%B Цианобактерий	4±2	3±1	4±2	7±2	3±2	<0.1	<0.2	10±5	1±0.5	10±5
%B Зеленых	2±1	2±1	3±1	5±1	4±1	2±1	3±1	3±1	3±2	10±3

Комплексный фитопланктонный индекс (КФИ) рассчитывается как простая средняя арифметическая из EQR для каждого показателя, так как эти отношения стандартизированы в 0-1 диапазоне. Оценка качества воды с использованием различных показателей может существенно отличаться (табл. 9).

Таблица 9

Показатели фитопланктона (над чертой), EQR (под чертой) и КФИ исследованных холодноводных водоемов (средние за вегетационный период)

Показатель	Большие озера*						Малые озера			
	Ладожское	Онежское	Выгозерское водохранилище	Чудско-Псковское	Имандра	Умбозеро	Озера Арктики-Субарктики	Озера бореальной зоны (Карелия)	оз. Кенозеро (Архангельская обл.)	Озера Восточной Антарктиды
Биомасса, мг/л	2.3±0.8	1.7±0.5	1±0.3	3.5±1.5	1.5±0.7	0.8±0.2	0.6±0.3	2±1	2.8±0.4	0.05±0.02
	0.22	0.41	0.40	0.57	0.27	0.5	0.5	0.75	0.64	1.0
Численность, кл. 10^6/л	1.5±0.4	0.9±0.2	0.9±0.2	6±3	0.7±0.2	0.4±0.1	0.5±0.2	0.4±0.1	0.4±0.1	0.1±0.1
	0.27	0.56	0.22	0.17	0.43	0.75	0.6	0.75	0.75	1.0
Хлорофилл«а», мкг/л	5.6±1.2	4±0.9	4±0.7	25±9	2.4±0.6	0.6±0.1	0.6±0.1	2±0.5	-	0.2±0.1
	0.13	0.18	0.25	0.06	0.17	0.5	0.83	0.5		1.0
P, мг С/м^3 сутки	317±68	200±46	200±36	-	150±34	80±15	90±17	120±21	-	3±1
	0.47	0.26	0.75		0.33	0.6	0.56	0.57		1.0
H (индекс Шеннона)	3.2±0.3	3.3±0.2	3.2±0.4	2.5±0.3	3.5±0.2	3.5±0.2	2.8±0.4	3.7±0.3	3.7±0.2	-
	0.94	0.94	0.91	0.71	1.0	1.0	0.82	1.0	0.97	
B/N	1.5±0.3	1.9±0.3	1.1±0.4	0.7±0.2	2.1±0.4	2±0.5	1.2±0.5	5±1	7.0±2	0.5±0.1
	1.0	1.0	0.64	0.35	1.0	1.0	1.0	0.88	1.0	1.0
% *Stephanodiscus* sp.	0.5±0.1	2±1	0.5±0.1	4±2	7±3	4±1	<0.2	<0.2	<0.1	<0.1
	0.6	0.1	0.2	0.5	0.04	0.08	1.0	1.0	1.0	1.0
% *Cryptomonas*sp.	5±3	10±4	1±0.2	5±1	10±3	<0.2	4±1	23±6	<0.2	<0.1
	0.1	0.01	0.1	0.1	0.02	0.1	0.25	0.87	1.0	1.0
% Цианобактерий	14±3	13±2	6±0.5	23±4	6±1	<0.2	3±1	15±2	1±1	10±5
	0.29	0.23	0.67	0.30	0.50	1.0	0.07	0.67	1.0	1.0
% Зеленых	8±1	9±1	12±1	10±2	8±1	2±0.3	3±0.4	4±1	4±1	10±5
	0.25	0.22	0.25	0.5	0.5	1.0	1.0	0.75	0.75	1.0
КФИ	0.43	0.39	0.44	0.36	0.43	0.65	0.66	0.77	0.9	1.0

*Для больших озер значения показателей фитопланктона указаны для акваторий, наиболее подверженных антропогенному влиянию.

Индекс разнообразия Шеннона дает завышенную оценку качества вод в условиях эвтрофирования, что уже отмечалось ранее (Баринова,

2000; Баринова и др., 2006). Значения хлорофилла «а» остаются долгое время высокими даже после уменьшения биогенной нагрузки и снижения загрязнения (Greyetal., 1994; Great Lake Ecosystem report, 2000). Низкая оценка по показателю относительной биомассы криптофитовых водорослей может быть связана с отсутствием их в начальные периоды исследований (Вислянская, 1986, 1999; Петрова, 1990). Использование нескольких показателей снижает вероятность ошибочной оценки и повышает надежность результатов.

Заключение

Видовое богатство планктонных водорослей в холодноводных водоемах в основном определяется размерами и характером водосбора. В исследованных озерах Севера ЕТР и Антарктиды обнаружен 781 таксон фитопланктона рангом ниже рода. В фитопланктоне больших озер по числу видов и биомассе преобладают диатомовые водоросли. В малых озерах их разнообразие и количественные характеристики снижаются. При этом увеличивается пропорция в общей биомассе золотистых, криптофитовых, зеленых, иногда динофитовых водорослей и цианобактерии.

Биомасса фитопланктона в период исследования варьировала в широких пределах - от нескольких мгк/л в антарктических озерах до 34 мг/л в оз. Псковском. При эвтрофировании даже в субарктическом озере она могла достигать 20 мг/л в районах поступления хозяйственно-бытовых сточных вод. Тепловое загрязнение в субарктических условиях ведет к увеличению обилия и изменениям структуры фитопланктона, сходным с теми, которые происходят при эвтрофировании. Средневегетационная биомасса фитопланктона в природно-чистых холодноводных озерах, как правило, не превышала 1 мг/л.

Низкие количественные показатели и видовое разнообразие являются характерной чертой фитопланктона антарктических озер. Фитопланктон крайне беден в связи с низкими температурами воды и содержанием биогенных веществ. Несмотря на значительную толщину льда (до 3 м), световые условия достаточны для развития автотрофных организмов на дне озер до глубины 30 м. На дне озер обнаружены цианобактериальные маты.

Климатические изменения могут привести к трансформации структурных и количественных характеристик водных сообществ. В водоемах Севера России изменения климата сказываются в первую очередь на ледовом режиме. Это может влиять на продолжительность вегетационного периода и на сезонные циклы водных организмов. В то же время достоверных корреляционных связей между климатическими характеристиками (температура, осадки, безледный период, САК и др.) и биомассой фитопланктона не обнаружено. Изменение климата отразилось на увеличении сезонной и межгодовой динамике биомассы фитопланктона.

Возможное потепление климата в северных регионах замедлит процессы восстановления озер, поскольку усилятся приток и круговорот биогенных элементов, преимущественное развитие получат более теплолюбивые виды, характерные для эвтрофных вод, а типичные арктические не восстановят свою численность.

В период снижения антропогенной нагрузки на озера, начиная с 1990-х гг., обозначились тенденции к улучшению качества вод по гидрохимическим показателям и восстановлению экосистем. Однако при снижении концентрации токсичных и биогенных веществ в воде исследуемых заливов озер не наблюдалось значительного падения концентрации хлорофилла «а» в воде и восстановления структуры фитопланктона до фоновых показателей. Структура биомассы фитопланктона изменяется в сторону преобладания цианобактерий, зеленых и криптофитовых водорослей.

Для количественной оценки состояния водоемов целесообразно использовать отклонение измеряемых показателей фитопланктона от природных фоновых характеристик (EQR). Комплексный фитопланктонный индекс (КФИ) рассчитывается как простая средняя арифметическая из EQR для каждого показателя, так как эти отношения стандартизированы в диапазоне от нуля до единицы. Использование нескольких показателей снижает вероятность ошибочной оценки и повышает надежность результатов.

Выводы

1. Холодноводные озера Севера ЕТР характеризуются высоким видовым богатством фитопланктона, которое определяется размерами

водоема и характером его водосбора. Фитопланктон антарктических озер отличаются бедным составом с преобладанием пикопланктонных форм.

2. Средние значения биомассы фитопланктона больших озер Севера ЕТР составляют 1–2 мг/л, в составе сообществ преобладают диатомовые водоросли. В малых озерах арктической зоны при доминировании золотистых водорослей средняя биомасса фитопланктона колеблется от 0.1 до 1 мг/л. В небольших озерах бореальной зоны, где средняя биомасса достигает 1–6 мг/л, преобладают криптофитовые, зеленые, иногда динофитовые водоросли и цианобактерии. В экстремально холодноводных озерах Восточной Антарктиды биомасса фитопланктона не превышает 0.01 мг/л.

3. Климатические изменения оказывают существенное влияние на фитопланктон холодноводных озер. Потепление климата усиливает эвтрофирование вод и стимулирует массовое развитие цианобактерий. Содержание хлорофилла «а» положительно коррелирует с температурой воды и отрицательно с продолжительностью периода открытой воды. Численность цианобактерий положительно коррелирует с индексом САК. Концентрация биогенных веществ в воде положительно коррелирует с количеством осадков. В то же время, при общем тренде потепления и увеличения продолжительности безледного периода, увеличения общей биомассы фитопланктона не наблюдается.

4. Основным лимитирующим фактором развития фитопланктона в холодноводных озерах являются температура и содержание биогенных веществ в воде. Поступление биогенных и органических веществ с хозяйственно-бытовыми сточными водами приводит к эвтрофированию, характеризующемуся увеличением общей биомассы фитопланктона до 20 мг/л и перестройкой структуры доминирующих комплексов фитопланктона – возрастание до 30% доли криптофитовых и до 60% доли зеленых вольвоксовых водорослей. В экосистемах малых озер под влиянием низких pH и тяжелых металлов происходят снижение видового разнообразия и увеличение вариабельности биомассы фитопланктона.

5. После снижения антропогенного воздействия экосистемы больших озер не возвращаются в исходное природное состояние. Снижение содержания фосфора в воде не приводит к быстрому (более 20 лет) падению концентрации хлорофилла «а» и обилия

фитопланктона вследствие изменений состава его доминирующих видов и функциональных групп: увеличивается относительное количество потенциальных миксотрофов, которые способны использовать дополнительные источники фосфора, не доступные для фотоавтотрофов.

6. Оценку качества вод по индикаторам состояния фитопланктона в разнотипных холодноводных водоемах необходимо проводить с учетом отклонения наблюдаемых показателей от референтных (фоновых). Для снижения вероятности ошибочной оценки и повышения надежности результатов предложен комплексный фитопланктонный индекс, который рассчитывается на основе усреднения индексов экологического качества ключевых показателей.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

СТАТЬИ В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЯХ, ИЗ ПЕРЕЧНЯ РЕКОМЕНДОВАННОГО ВАК

СТАТЬИ В ЖУРНАЛАХ, ИНДЕКСИРУЕМЫХ В SCOPUS И WEB OF SCIENCE

1. Даувальтер В.А., Моисеенко Т.И., Родюшкин И.В., Кудрявцева Л.П., **Шаров А.Н.** Миграция и круговорот серы в субарктическом озере Имандра, загрязняющемся стоками горно-металлургического производства // **Геохимия.** 1999. №6. С. 626–636.

2. Моисеенко Т.И., Вандыш О.И., Яковлев В.А, Лукин А.А., **Шаров А.Н.** Изменения биоразнообразия поверхностных вод Севера в условиях закисления, евтрофирования и токсичного загрязнения // **Водные ресурсы.** 1999. №4. С. 492–501.

3. **Шаров А.Н.** Сезонная динамика фитопланктона двух озер Кольского полуострова // **Биология внутренних вод.** 2003. № 2. С. 59–62.

4. Lukin A., Dauvalter V., Kashulin N., Yakovlev V., **Sharov A.,** Vandysh O. Assessment of copper-nickel industry impact on a Subarctic Lake ecosystem // **Science of the Total Environment.** 2003. Vol. 306. P. 73–83.

5. **Шаров А.Н.** Влияние техногенного загрязнения на фитопланктонные сообщества водоемов Субарктики (на примере Кольского п-ова) // **Биология внутренних вод.** 2005. №2. С. 61–68.

6. Moiseenko T.I., Voinov A.A., Megorsky V.V., Gashkina N.A., Kudryavtseva L.P., **Sharov A.N.**, Sharova J., Vandysh O.I., Koroleva I.N. Ecosystem and human health assessment to define environmental management strategies: The case of long-term human impacts on an Arctic Lake // **Science of the Total Environment.** 2006. Vol. 369. P. 1–20.

7. **Шаров А.Н.** Индикаторная роль фитопланктона в оценке долговременных изменений качества вод больших озер // **Водные ресурсы.** 2008.Т35. №6. С. 668–674.

8. Moiseenko T.I., **Sharov A.N.**, Vandysh O.I., Kudryavtseva L.P., Gashkina N.A. Long-term modification of Arctic lake ecosystem: reference condition, degradation and recovery // **Limnologica**. 2009. Vol. 39. N 1. P. 1–13.

9. Моисеенко Т.И., **Шаров А.Н**., Гашкина Н.А., Вандыш О.И., Кудрявцева Л.П. Антропогенная трансформация арктической экосистемы озера Имандра: тенденции к восстановлению после длительного периода загрязнения // **Водные ресурсы.** 2009. Т. 36. № 3. С. 312–325.

10. Моисеенко Т.И., **Шаров А.Н.** Модификации водных экосистем в период и после снижения антропогенного загрязнения // **Доклады Академии наук.** 2011. Т. 441. № 3. С. 419–442.

11. Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И., Руховец Л.А., Толстиков А.В., **Шаров А.Н.** Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменение климата // **Доклады Академии наук.** 2012. Т. 444. № 5. С. 554–557.

12. Moiseenko T.I., **Sharov A.N.,** Voinov A.V., Shalabodov A.D. Long-term changes in the large lake ecosystems under pollution: The case of the North-East European Lakes // **Geography Environment Sustainability.** 2012. №1 (5). P. 67–83.

13. **Sharov A.N.,** Berezina N.A., Nazarova L.E., Poliakova T.N., Chekryzheva T.A. Links between biota and climate-related variables in the Baltic Region using Lake Onega as an example // **Oceanologia.** 2014. Vol. 56. № 2. P. 291–306.

14. **Sharov A.N.,** Berezina N.A., Tolstikov A.V. Life under ice in the perennial ice-covered Lake Glubokoe in summer (East Antarctica) // **Lakes and Reservoirs: Research and Management.** 2015. Vol. 20. P. 120–127.

15. **Sharov A.,** Andreeva I. Phytoplankton responses to climate change in the large lakes of the Baltic Sea basin // **Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis.** 2015. 15 (2). P. 349–358.

16. Berezina N.A., Gubelit Y.I., Petukhov V.A., Polyak Y.M., **Sharov A.N.,** Kudryavtseva V.A., Lubimtsev V.A., Shigaeva T.D. An integrated approach to the assessment of the Eastern Gulf of Finland health: a case study of coastal habitats // **Journal of Marine Systems**. 2017. Vol. 171. P. 159–171.

17. Suarez E.L., M-C Tiffay, N. Kalinkina, T. Chekryzheva, **A. Sharov,** E. Tekanova, M. Syarki, R.E. Zdorovennov, E. Makarova, E. Mantzouki, P. Venail, B.W. Ibelings. Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and. after ice-off in the large Lake Onego (Russia) // **Inland Waters**. 2019. Vol. 9. N 2. P. 200–212.

18. Moiseenko, T.; **Sharov, A.** Large Russian Lakes Ladoga, Onega, and Imandra under Strong Pollution and in the Period of Revitalization: A Review. **Geosciences.** 2019. Vol. 9, 492.

СТАТЬИ В РОССИЙСКИХ ИЗДАНИЯХ, ИНДЕКСИРУЕМЫЕ В РИНЦ

19. **Шаров А.Н.,** Рябинкин А.В., Комулайнен С.Ф. Гидробиологическая характеристика водных объектов в районе строительства горно-обогатительного комбината на базе месторождения апатит-нефелиновых руд Олений ручей (Кольский п-ов) // **Труды КарНЦ РАН.** 2009. Т. 9. № 4. С. 76–84.

20. Моисеенко Т.И., **Шаров А.Н.** Трансформация водных экосистем больших озер при изменении антропогенной нагрузки // **Вестник Тюменского государственного университета.** 2010. №7. С. 51–57.

21. **Шаров А.Н.,** Толстиков А.А. Исследование озер Восточной Антарктиды // Водные проблемы Севера и пути их решения. **Труды КарНЦ РАН.** 2011. Т. 9. № 4. С. 142–143.

22. Панин А.Л., Богумильчик Е.А., **Шаров А.Н.,** Власов Д.Ю., Зеленская М.С., Толстиков А.В., Тешебаев Ш.Б., Ценева Г.Я., Краева Л.А., Сбойчаков В.Б., Болехан В.Н Цианобактериальные маты как объекты мониторинга антарктических экосистем // **Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3: биология.** 2013. № 2. С. 3–12.

23. Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Баклагин В.А., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Толстиков А.В., **Шаров А.Н.** Влияние изменений климата на экосистемы озер // **Вестник РФФИ.** 2013. №2 (78). С. 43–50.

24. Березина Н.А., Ю.И. Губелит, Л.В. Жакова, Т.М. Тимакова, В.А. Петухов, **А.Н. Шаров.** Структурные характеристики биотических сообществ каменистой литорали Выгозерского водохранилища // **Труды КарНЦ РАН.** 2013. № 6. С. 28–36.

25. **Шаров А.Н.,** Андреева И.В. Пространственно-временная организация фитопланктона Чудско-Псковского озера // **Принципы экологии.** 2016. Т. 5. № 5. С. 71–80.

СТАТЬИ В ПРОЧИХ РЕФЕРИРУЕМЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЯХ

26. **Шаров А.Н.** Оценка качества вод разнотипных холодноводных озер по показателям фитопланктона // Региональная экология. 2017. № 2(48). С. 40–47.

27. **Шаров А.Н.,** Толстиков А.В. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды // Региональная экология. 2018. № 3(53). С. 5–14.

28. **Шаров А.Н.,** Никулина В.Н., Максимов А.А. Фитопланктон небольшого арктического озера в условиях климатической изменчивости // Региональная экология. 2019. № 2 (56) С. 51-56.

МОНОГРАФИИ

1. **Шаров А.Н.** Фитопланктон водоемов Кольского полуострова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. 113 с.

ГЛАВЫ В КОЛЛЕКТИВНЫХ МОНОГРАФИЯХ

2. Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильящук Б.П., **Шаров А.Н**., Шарова Ю.Н., Вандыш О.И., Королева И.М. Антропогенная модификация оз. Имандра. Москва. "Наука". 2002. 401с.

3. Комулайнен С.Ф., Антипина Г.С., Вислянская И.Г., Иешко Т.А., Лак Г.Ц., Чекрыжева Т.А., **Шаров А.Н.**, Шелехова Т.С. Библиография работ по водорослям Европейского Севера России (Республика Карелия, Мурманская область). Петрозаводск. Кар. НЦ РАН. 2006. 68 с.

4. **Шаров А.Н.,** Вислянская И.Г. Фитопланктон // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. [КарНЦ РАН, Ин-т водных проблем Севера; отв. ред.: П.А. Лозовик, Т.П. Куликова, Н.Н. Мартынова]. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2007. С. 49–54.

5. Чекрыжева Т.А., **Шаров А.Н.** Фитопланктон // Атлас Онежского озера (ред. Н.Н. Филатов). Петрозаводск: КарНЦРАН. 2010.С. 111–112.

6. Moiseenko T.I., **Sharov A.N.** The Retrospective Analysis of Aquatic Ecosystem Modification of Russian Large Lakes under Anthropogenic Impacts // Ecotoxicology around the Globe. (Ed.J.E. Visser). Nova Science Publishers, 2011. P. 309–324.

7. Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство. Ч. 1. Полевые исследования / Алешина О.А., Волкова Л.А., … **Шаров А.Н.** и др. (всего 22 человека) / под ред. Т.И. Моисеенко. Тюмень: Изд-во ТюмГУ. 2011. 128 с.

8. Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство. Ч. 2. Камеральные работы / Алешина О.А., Волкова Л.А., … **Шаров А.Н.** и др. (всего 26 человек) / под ред. Т.И. Моисеенко. Тюмень: Изд-во ТюмГУ. 2012. 304 с.

9. Moiseenko T.I., **Sharov A.N.**, Vandysh O.I., Yakovlev V.A., Gashev C.N. Change of Biodiversity of Subarctic Freshwater Ecosystems: Case Study-Russian North-West Region // Aquatic Ecosystems. (ED. Sheila A. Browne). New York: Nova Science Publishers. 2012. P. 195–216.

10. Березина Н.А., **Шаров А.Н.**, Тимакова Т.М., Сярки М.Т., Губелит, Ю.И., Жакова Л.В., Петухов В.А., Сластина Ю.А. Структура литоральных водных сообществ Выгозерского водохранилища в современных условиях // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и измерения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2015. С. 329–336.