

На правах рукописи



МАКАРОВА Елена Михайловна

**ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОГУМУСНЫХ
ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПО КОМПЛЕКСУ
МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Специальность: 1.5.15. Экология (Биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Петрозаводск – 2024

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера (обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук")

- Научный руководитель** **Калинкина Наталия Михайловна**
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидробиологии Института водных
проблем Севера – обособленного подразделения
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра "Карельский научный
центр Российской академии наук" (ИВПС КарНЦ РАН)
- Официальные** **Косолапов Дмитрий Борисович**
оппоненты: кандидат биологических наук,
заведующий лабораторией микробиологии Института биологии
внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
- Сопрунова Ольга Борисовна**
доктор биологических наук,
заведующая кафедрой прикладной биологии и микробиологии
Институт рыбного хозяйства, биологии и природопользования
АГТУ
- Ведущая организация:** **Бюджетное учреждение высшего образования**
Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет», г. Сургут

Защита состоится 21 декабря в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени кандидата наук 24.2.433.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова», по адресу: 364907, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. А. Шерипова, 32, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова» по адресу: <http://www.chesu.ru/>

Автореферат размещен на сайте ВАК при Минобрнауки России <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Л.Л. Сатуева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Бактерии играют главную роль в геохимических процессах, участвуя в передаче энергии и вещества в пищевых сетях (Кузнецов, 1970; Кузнецов и др., 1985). Высокая скорость метаболизма обеспечивает бактериям более быструю, чем у других компонентов биоты, реакцию на незначительные изменения условий среды, а разнообразие способов функционирования обеспечивает способность к деструкции специфических веществ, в т.ч. и антропогенного происхождения, недоступных другим организмам (Кузнецов, 1970; Горленко и др., 1977; Драбкова, 1981; Бакаева, Никаноров, 2006; Копылов, Косолапов, 2008; Копылов, Косолапов, 2011; Кузнецова и др., 2019). В связи с этим, микробиологические показатели, включающие различные функциональные группы бактерий, являются весьма информативными, отражая степень загрязнения водоемов легкоминерализуемым органическим веществом (ОВ), нефтепродуктами, фенольными соединениями, хозфекальными стоками и др. (Романенко, 1985; Марголина, 1989; Копылов и др., 2004; Уманская, 2005; Кондакова, 2007; Копылов, Косолапов, 2008; Перетрухина и др., 2011; Шеховцева, 2011; Гелашвили и др., 2016; Богатов, Федоровский, 2017).

Важную роль в процессах деструкции ОВ различной природы бактериопланктон играет в реках, где он может достигать более 80% в суммарной биомассе планктонного сообщества (Сорокин, 1987; Олейник, 1991; Копылов и др., 2004; Копылов и др., 2006). Наиболее значима роль бактерий в экосистемах малых рек полугорного типа, характеризующихся небольшой глубиной и быстрым течением (0.5 м/с), где доминируют детритные пищевые цепи питания (Комулайнен, 2005; Крылов, 2005; Egiatti, Cremonese, 2006; Копылов, Косолапов, 2011; Богатов, Федоровский, 2017).

Реки Карелии характеризуются большим содержанием в воде гумусовых веществ, что отражается в высокой цветности их воды и объясняется повышенной степенью заболоченности водосборной территории (Крупнейшие..., 2015). В свою очередь, гумусовые вещества оказывают сложное воздействие в целом на водные экосистемы (Лозовик, 2006; Моисеенко, 2009; Geddes, 2009; Cole et al., 2011; Arvola et al., 2014; Моисеенко и др., 2017), и в частности, на бактериопланктон – важный индикатор качества воды (Visser, 1985; Tranvik, Höfle, 1987; Jones et al., 1988). Специфический природный состав речных вод, обусловленный высоким содержанием гумусовых веществ и связанного с ними железа, может изменять влияние антропогенных факторов на экосистемы городских водотоков.

Интенсивное антропогенное воздействие испытывают реки Лососинка и Неглинка, притоки Онежского озера, которые протекают по территории г. Петрозаводска и принимают неочищенные стоки ливневой канализации. Согласно шкале гумусности П.А. Лозовика (2006), воды рек Лососинки и

Неглинки являются высокогумусными. Эти две реки впадают в Петрозаводскую губу Онежского озера – источник централизованного питьевого водоснабжения г. Петрозаводска. В нижнем течении прибрежные участки двух рек активно используются населением города для рекреации, что может вызвать потенциально опасное микробиологическое загрязнение рек. В связи с этим, важной задачей является оценка загрязнения городских водотоков и их санитарного состояния по микробиологическим показателям. Эффективность микробиологической индикации существенно возрастает при одновременном использовании химических показателей качества воды (Алекин и др., 1973; Руководство..., 1992; Шорникова, 2009). До настоящего времени отсутствовали комплексные исследования пространственно-временной изменчивости микробиологических и химических показателей экологического состояния притоков Онежского озера – рек Лососинки и Неглинки.

Степень разработанности проблемы. Регулярные наблюдения химического состава притоков Онежского озера были начаты еще в 60–е годы XX века (Соловьева, Расплетина, 1973). Известно, что в долинах рек, протекающих по территории г. Петрозаводска происходит разгрузка подземных вод, влияющая на химический состав воды основного русла, что приводит, например, на р. Неглинке к увеличению минерализации речной воды в нижнем ее течении (Andronikov et al., 2019). Первые исследования бактериопланктона в притоках Онежского озера начали проводить с конца 80-х годов XX века (Филимонова, 1990). Зачастую исследования были связаны с оценкой влияния прибрежных территорий, испытывающих антропогенное воздействие. О степени загрязнения водотоков свидетельствовали высокие численности эколого-трофических групп бактериопланктона, характеризующие загрязнения речных вод легкоминерализуемым ОВ, нефтепродуктами и хозяйственно-бытовыми стоками (Тимакова, 2013; Теканова и др., 2015). Однако комплексных химических и микробиологических исследований притоков Онежского озера не проводилось. Наши исследования направлены на теоретические аспекты влияния гумусовых веществ при одновременном воздействии антропогенного фактора на бактериопланктон в малых реках.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования выступают притоки Онежского озера, в том числе, протекающие по урбанизированной территории г. Петрозаводска. Предметом исследования является оценка состояния речных экосистем, находящихся под антропогенным воздействием с использованием химических и микробиологических показателей качества воды.

Цель исследования – оценить экологическое состояние высокогумусных притоков Онежского озера на урбанизированных территориях по комплексу микробиологических и химических показателей, а также определить

биоиндикаторную значимость различных эколого-трофических групп бактериопланктона.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Изучить химический состав притоков Онежского озера с учетом региональных особенностей и антропогенного фактора.

2. Исследовать пространственную и сезонную изменчивость количественных показателей эколого-трофических групп бактериопланктона и его размерно-морфологическую структуру.

3. Оценить биотический баланс речных экосистем на основе продукционно-деструкционных параметров.

4. Провести анализ влияния региональных особенностей химического состава воды и водосборной территории на формирование бактериального сообщества.

Научная новизна и теоретическое значение. Впервые проведено комплексное исследование пространственного распределения и сезонной динамики химических и микробиологических показателей притоков Онежского озера в условиях влияния заболоченной водосборной территории и различной степени антропогенной нагрузки; по комплексу микробиологических и химических показателей выполнена оценка экологической ситуации в изученных реках.

Впервые получены сведения о размерно-морфологической структуре бактериопланктона, отражающей влияние водосборной территории на речные экосистемы.

Впервые для экосистем притоков Онежского озера Лососинки и Неглинки, протекающих на урбанизированных территориях, и руч. Железного, не испытывающего антропогенного воздействия, проанализированы сезонные изменения продукционно-деструкционных показателей, свидетельствующих о преобладании гетеротрофного звена в планктонном сообществе в условиях быстрого течения рек полугорного типа.

Практическая значимость. Полученные результаты имеют практическое значение для контроля санитарной ситуации в используемых для рекреационных целей реках, протекающих по территории г. Петрозаводска. Полученные данные могут быть использованы для контроля санитарной ситуации в Петрозаводской губе Онежского озера, которая принимает воды высоко загрязненных по микробиологическим показателям рек Лососинки и Неглинки и служит источником централизованного водоснабжения города Петрозаводска.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для усовершенствования экологического мониторинга рек по комплексу биологических и химических показателей, а также уточнения влияния антропогенного фактора на притоки Онежского озера, где высокие концентрации

железа являются не следствием загрязнения, а региональной особенностью химического состава вод Карельского гидрографического региона.

Полученные данные использованы при разработке научно-популярных лекций о воздействии антропогенных факторов на Онежское озеро и его водосбор в рамках проведения научно-образовательных семинаров для экскурсоводов, учителей, студентов вузов, СПО и школьников г. Петрозаводска.

Выполнено зонирование и составлена карта-схема качества воды притоков Онежского озера по гидрохимическим и микробиологическим показателям.

Методология и методы исследования. Теоретической основой работы являются методологические подходы к оценке экологического состояния малых рек по комплексу микробиологических и химических показателей. В основу работы положены данные полевых исследований различных притоков Онежского озера, испытывающих разную степень антропогенной нагрузки. Камеральная обработка проб проводилась с использованием общепринятых в водной микробиологии и гидрохимии методик. Статистическая обработка данных была выполнена лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

Положения, выносимые на защиту:

1. В экологическом мониторинге оценку загрязненности высокоцветных речных вод по показателям химического состава необходимо выполнять с учетом влияния на них региональных природных факторов.

2. Количественные показатели различных эколого-трофических групп бактериопланктона являются приоритетными индикаторами экологического состояния высокогумусных притоков Онежского озера.

3. Для малых рек полугорного типа, характеризующихся высокими скоростями течения и высокой антропогенной нагрузкой, характерен гетеротрофный тип функционирования экосистемы.

4. Микробиологические показатели притоков Онежского озера, испытывающих разную антропогенную нагрузку, связаны с содержанием органических веществ, поступающих с терригенным стоком и ливневыми водами, и мало зависят от природных особенностей химического состава речных вод региона.

Степень достоверности результатов. В работе использованы принятые зарубежные и общероссийские методы сбора, обработки и анализов химических и микробиологических показателей. Степень достоверности обеспечивается значительным объемом фактического материала (162 пробы воды), количество лабораторных анализов – свыше 2000. Результаты полевых наблюдений были подвергнуты статистической обработке с оценкой их достоверности.

Апробация результатов исследования. Материалы диссертации представлены на школе-конференции «Науки о Земле: задачи молодых» (Петрозаводск, 2014 г., 2015 г., 2021 г.), международной молодежной школе-

конференции «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии» (Петрозаводск, 2014 г.), лимнологической школе-практике «Winter Limnology-course» (Helsinki, Finland, 2015), школе-конференции для молодых ученых на о. Валаам (2015 г.), 68-й Всероссийской (с международным участием) научной конференции обучающихся и молодых ученых (Петрозаводск, 2016 г.), научной конференции «Природное и культурное наследие Европейского севера: фундаментальные и прикладные исследования» (Петрозаводск, 2016 г.), V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Петрозаводск, 2016 г.), VI Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Петрозаводск, 2020 г.), XXVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021» (Москва, 2021 г.), XXIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022» (Москва, 2022 г.), международной научно-практической конференции «Оценка состояния ресурсов, экосистем озер и морей в условиях современных изменений климата и социально-экономического развития» (Петрозаводск, 2022 г.), 76-й Всероссийской с международным участием школе-конференции молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление» (Нижний Новгород, 2023 г.), XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» (Киров, 2023 г.), VIII Всероссийской конференции по водной экотоксикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы» (Борок, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из которых 3 статьи – в рецензируемых научных журналах, включенных в список изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России для опубликования результатов диссертаций, 1 статья – в журнале, входящем в Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 187 страницах, содержит 62 таблицы, 65 рисунков. Список литературы включает 302 наименования, среди которых 81 – на иностранных языках.

Связь работы с научными программами. Материалы диссертационной работы были использованы при написании отчета научно-исследовательской работы «Оценка воздействия свалки твердых бытовых отходов в местечке Орзег на подземные и поверхностные воды» (2014 г.). Материалы диссертационной работы были использованы при написании отчетов по грантам РФФИ: № 15-34-50529 «Оценка возможности формирования бактериями природных наночастиц металлов в водных объектах гумидной зоны России» (2015 г.), № 16-35-00026 «Биогеохимические аспекты загрязненности малых водных объектов

урбанизированных территорий Южной Карелии» (2016-2017 гг.). Материалы диссертационной работы в 2021 и 2022 годах вошли в качестве разделов в отчеты по теме Госзадания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН № 0185-2021-0007 «Диагноз состояния и долгосрочный прогноз изменений экосистем крупнейших озер-водохранилищ Севера ЕЧР (Онежского и Выгозера), входящих в систему Беломоро-Балтийского водного пути».

Личный вклад автора. В основу материалов положены результаты собственных исследований в 2014–2016 гг. притоков Онежского озера. Сбор и обработка полевого материала, систематизация и анализ полученных данных, статистическая обработка, написание и оформление рукописи работы выполнены лично автором.

Соответствие паспорту научной специальности. Научные положения диссертации соответствуют специальности 1.5.15. Экология по направлениям исследования «Антропогенное воздействие на сообщества и экосистемы. Биоиндикация, биомониторинг» (п. 10 паспорта специальности).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, д.б.н. Калинкиной Н.М. А также за всестороннюю помощь и поддержку к.б.н. Текановой Е.В., м.н.с. Милянчуку Н.П., к.б.н. Никеровой К.М., Дмитриевой Ю.Ф., Кравченко И.Ю., к.г.н. Назаровой Л.Е., к.г.-м.н. Бородулиной Г.С., Балаганскому А.Ф., к.х.н. Сабылиной А.В., к.б.н. Слуковскому З.И., Ференц Н.С., Смирновой Е.С., Падчиной А.Г., Лазарьковой А.А.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе рассмотрены региональные особенности формирования химического состава поверхностных вод Карельского региона. Обобщены результаты исследований химического состава воды и состояния биоты в притоках Онежского озера — реках Лососинке и Неглинке, протекающих по урбанизированной территории. Изучаемые реки характеризуются высокой скоростью течения (0,5 м/с) и наличием порогов. Зафиксированы низкие показатели количественного развития и видового разнообразия фито-, зоопланктона, перифитона, в которых отмечается присутствие видов-индикаторов антропогенного загрязнения (Вислянская, 1990; Куликова, Сярки, 1988; Комулайнен, Морозов, 2007; Сластина и др., 2011). Бентосные сообщества приустьевых участков рек характеризуются хирономидно-олигохетным комплексом (Слуковский, 2014; Барышев, 2023). Состояние макрозообентоса и рыб в реках Лососинки и Неглинки свидетельствует о загрязнении водотоков токсичными веществами (Лукина, Беличева, 2013; Slukovskii, Polyakova, 2017). Микробиологические исследования выполнялись спорадически, касались продукционно-деструкционных процессов, оценки количества в речных водах

отдельных групп бактерий и свидетельствовали о неблагополучной санитарной ситуации в городских реках (Тимакова, 2013; Теканова и др., 2015). Однако микробиологическая индикация в комплексе с определением химических показателей различных притоков Онежского озера ранее не проводилась.

В главе 1 рассмотрена роль микробиологических исследований в биомониторинге водных экосистем, проведен анализ индикаторной значимости различных эколого-трофических групп бактериопланктона, исследованы принципы определения качества воды по микробиологическим показателям.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика природных условий и особенности формирования речного стока. Климат Карелии влажный, умеренно континентальный с чертами морского. Климатические особенности региона выражаются в низкой температуре воды, коротком вегетационном периоде водных экосистем и избыточной увлажненности водосборной территории (Назарова, Филатов, 2004; Филатов и др., 2014). Для климатических условий характерна резкая изменчивость метеорологических показателей за короткие отрезки времени. В среднем количество истинно пасмурных дней достигает 120 за год. В районе г. Петрозаводска теоретически возможная продолжительность солнечного сияния составляет около 1674 часов за год, средняя годовая температура воздуха — +2,4°C, средняя температура самого теплого месяца — июля — составляет +16,1°C, влажность в среднем достигает 70–90%, число дней с осадками почти доходит до 200 (Назарова, 2013).

Бассейны рек г. Петрозаводска сложены кристаллическими породами Балтийского щита, тип почв – подзолистые с железо-гумусовым горизонтом, рельеф среднехолмистый с относительными высотами холмов и гряд 15–40 м (Карпечко, 2013; Балаганский и др., 2015; Сабылина, Ефремова, 2017). Химический состав рек формируется за счет заболоченности водосборов (до 13%), атмосферных осадков, влияния подземных вод, склонового стока с селитебных территорий (Бородулина, 2013; Сабылина и др., 2024).

Характеристика притоков Онежского озера. Основными объектами исследований послужили малые реки юго-западного побережья Онежского озера — реки Лососинка и Неглинка, протекающие по территории г. Петрозаводска (рис. 1). Реки относятся к полугорному типу, среднемноголетний расход воды в р. Лососинке — 3,7 м³/с, в р. Неглинке — 0,5 м³/с. Длина рек Лососинки и Неглинки — 25 и 14 км соответственно. Глубина водотоков варьирует в пределах 0,2–0,5 м на порожистых участках и до 1–3 м — на плесовых участках (Карпечко, 2013). Величина уклона р. Лососинки — 5,0‰, р. Неглинки — 7,6‰ (Slukovskii, Polyakova, 2017). Основными источниками загрязнения этих рек на протяжении многих лет являются ливневый городской сток, небольшие промышленные

производства, смыв с территории железнодорожного депо и частного сектора, высокая нагрузка автотранспортного парка и расширение застраиваемой территории (Государственный..., 2000–2022; Тимакова, 2013; Крутских и др., 2016).

Притоки Нелукса, Орзega, Деревянка, Большая Уя, Пухта, Шокша, руч. Железный относятся к малым рекам юго-западного побережья Онежского озера (рис. 1), имеют длину от 10 до 28 км, со среднемноголетним расходом воды 0,29–3,45 м³/с. Река Лижма — северо-западный приток Онежского озера (рис. 1), длиной 67 км и среднемноголетним расходом воды 5,08 м³/с. Реки Кумса и Вичка относятся к притокам северного побережья Онежского озера, их длина составляет 62 и 30 км соответственно, а средний годовой расход воды — 7,06 и 1,4 м³/с соответственно (Литвиненко, Кухарев, 1990; Каталог..., 2001; Ресурсы..., 1975). Влияние антропогенного фактора на притоки юго-западного и северо-западного побережий связано со стоком с территорий дачных поселений и турбаз, на реки Кумса и Вичка — кроме того, со стоками с территории г. Медвежьегорска.

Характеристика станций отбора проб на притоках Онежского озера. Исследования химического состава воды и количественного развития бактерий проводили на 23 станциях 12 притоков Онежского озера в 2014–2016 гг.

В качестве регулярных станций отбора проб на притоках территории г. Петрозаводска в 2014–2015 гг. были выбраны 4 станции — на р. Лососинке, 3 станции — на р. Неглинке (рис. 1).

Пробы отбирали ежемесячно с поверхности воды в безледоставный период. Дополнительно измеряли температуру воды. Для характеристики антропогенной нагрузки на реки урбанизированной территории использовали данные химического состава воды 14 ливневых стоков, поступающих в р. Лососинку, и 10 ливневых стоков — в р. Неглинку. Данные по химическому составу 24 стоков ливневой канализации за октябрь 2014 г. и июль 2015 г., а также их объему стока предоставлены отделом экологии мэрии г. Петрозаводска (Отчет..., 2014, 2015). В работе были использованы данные по метеорологическим условиям в районе исследования и гидрологическому режиму городских рек за 2014–2015 гг.

Разовые исследования были выполнены на приустьевых участках 10 разнотипных притоков юго-западного, северо-западного и северного побережья Онежского озера в июле и сентябре 2014–2016 гг.

Все изученные притоки различались по химическому составу воды и уровню антропогенной нагрузки. Среди этих притоков детально в сезонном аспекте был изучен руч. Железный как модельный водоток, химический состав воды которого наиболее ярко отражает региональные особенности водных объектов Карелии (высокие показатели цветности воды и содержания общего железа). За время исследований притоков Онежского озера было отобрано 162

пробы воды. Выполнено 1156 химических анализов, 1373 микробиологических анализов и 100 продукционно-деструкционных анализов.

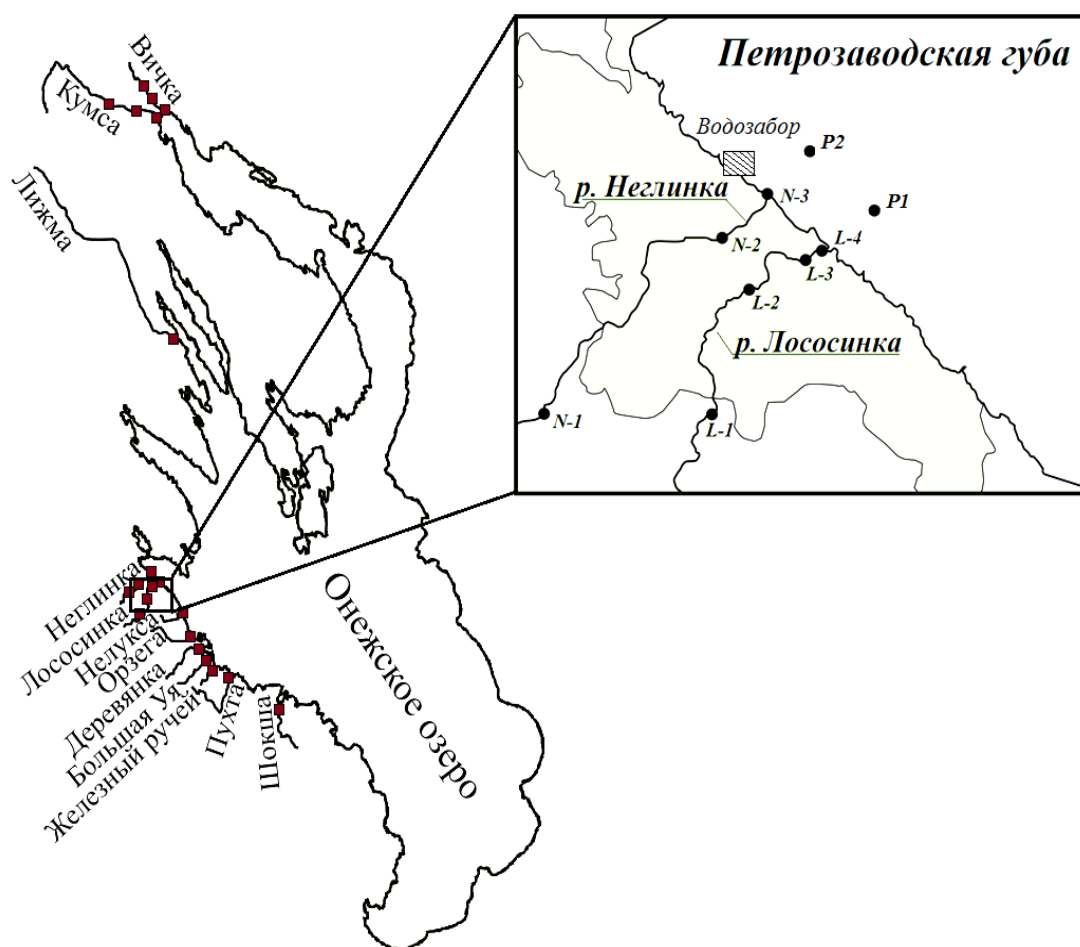


Рисунок 1. Схема расположения станций отбора проб на притоках Онежского озера

Исследования в Петрозаводской губе Онежского озера. Для оценки влияния речных вод на качество воды Петрозаводской губы Онежского озера по микробиологическим показателям в августе 2015 г. были отобраны 2 пробы в поверхностном горизонте на расстоянии 500 м от устьев рек Лососинки и Неглинки на станциях P1 (глубина 14 м) и P2 (глубина 18 м) соответственно (рис. 1).

Микробиологические методы исследований. Общую численность бактерий определяли методом прямого счета на черных поликарбонатных трековых мембранах производства Whatman ($D_{\text{пор}}=0,2$ мкм) на люминесцентном микроскопе МИКМЕД-2 (увеличение $\times 1600$) с предварительным окрашиванием клеток акридиновым оранжевым (Handbook..., 1993). Размеры клеток измеряли при помощи компьютерной программы MultiMedia Catalog (ММС). Средний объем клеток ($V_{\text{ср}}$) вычисляли как объем подходящих им по форме стереометрических фигур. Биомассу бактерий (ББ) рассчитывали по (Кузнецов, Дубинина, 1989). Сапрофитные бактерии (СБ) выращивали на РПА при 22°C в

течение 7 суток, гетеротрофные бактерии (ГБ) — на РПА:10, фенолоксиляющие (ФОБ) — на минеральной среде с добавлением фенола, чашки с ГБ и ФОБ экспонировали в течение 10 сут. при 22°C. Угледородокисляющие бактерии (УОБ) культивировали на среде Диановой — Ворошиловой с добавлением очищенного агара Дифко, мазута и эмульгатора ТВИН-80 (Кузнецов, Дубинина, 1989), экспонировали в течение 10 сут. при 22°C.

Для получения накопительной культуры нитрифицирующих бактерий (НБ) использовали жидкую среду Сориано — Уокера с индикатором рН феноловым красным (Кузнецов, Дубинина, 1989). Для определения общего микробного числа (ОМЧ) колонии выращивали на РПА при 37°C в течение 24 ч. Для определения общих колиформных бактерий (ОКБ) пробы воды фильтровали через мембранные фильтры ($D_{пор}=0,45$ мкм), которые помещали на агаризованную среду Эндо, экспонировали при 37°C в течение 24 ч. После инкубации выполняли цитохромоксидазный тест (МУК 4.2.1884-04). За время исследований определено 10 микробиологических показателей (табл. 1).

Таблица 1. Количество химических и биологических анализов за 2014–2016 гг.

Химические показатели			
Показатель	Число проб	Показатель	Число проб
рН	141	NO ₂ ⁻	54
Цветность	119	NO ₃ ⁻	54
O ₂	138	P _{общ}	117
ПО	54	P _{мин}	108
ХПК	62	Fe _{общ}	55
БПК ₅	133	Нефтепродукты	58
ВВ	63		
Микробиологические показатели			
Показатель	Число проб	Показатель	Число проб
ОЧБ	158	ОКБ	158
СБ	158	ОМЧ	158
ГБ	158	УОБ	157
ФОБ	158	НБ	134
ББ	67	V _{ср}	67
Продукционно-деструкционные показатели			
Скорость фотосинтеза	50	Деструкция ОВ	50

Измерение скоростей фотосинтеза фитопланктона и деструкции ОВ планктонным сообществом производили общепринятым скляночным методом в кислородной модификации по изменению концентрации кислорода в светлых и темных склянках после инкубации в течение 24 ч (Винберг, 1960; Кузнецов, Дубинина, 1989). Содержание кислорода в склянках измеряли йодометрическим методом Винклера (Кузнецов, Дубинина, 1989).

Гидрохимические методы исследований. В 2014 г. были определены: рН, цветность, концентрация растворенного кислорода, перманганатная

окисляемость (ПО), биологическое потребление кислорода (БПК₅), нитритный (NO₂⁻) и нитратный (NO₃⁻) азот, общий (P_{общ}) и минеральный (P_{мин}) фосфор по различным методикам (Алекин и др., 1973; Руководство..., 1977; РД 52.24.381-2006). Для косвенной оценки содержания гумусовых веществ использовали показатель гумусности $H_{um}=\sqrt{(ЦВ*ПО)}$ (ЦВ — значение цветности, град.)

(Лозовик, 2013). В 2015 г. определяли взвешенные вещества (ВВ), рН, $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$, содержание общего железа ($Fe_{\text{общ}}$), цветность и химическое потребление кислорода воды (ХПК) по методикам (Алекин и др., 1973; Руководство..., 1977; ПНД Ф 14.1:2.106-97; ПНД Ф 14.1:2.110-97; ПНД Ф 14.1:2:4.248-07; ГОСТ 31868-2012; РД 52.24.427-2013). Содержание нефтепродуктов определяли по методике (РД 52.24.476-2007). Концентрация растворенного кислорода и БПК₅ была определена согласно стандартной методике (Руководство..., 1977). За время исследований определено 13 химических показателей воды (табл. 1).

Методы статистического анализа данных. При статистической обработке данных рассчитывали медианное значение выборки и его ошибку, применяли непараметрические методы статистики (коэффициент корреляции Спирмена, критерии Уилкоксона, Манна—Уитни, Крускала—Уоллиса), использовали метод главных компонент (principal component analysis — PCA) (Коросов, 1996; 2007; Шитиков и др., 2005). Статистическая обработка данных осуществлялась в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

Весь иллюстративный материал (фотографии, рисунки, графики) и таблицы выполнены лично автором, за исключением раздела 1.3.2 диссертации, где указаны источники заимствования.

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Оценка антропогенной нагрузки на притоки Онежского озера. По данным за 2014 г., объем речного стока р. Лососинки составил 0,104 км³/год, в то время как объем ливневых стоков — 0,03 км³/год. Аналогичные данные для р. Неглинки за 2014 г.: 0,013 и 0,004 км³/год соответственно. Объем ливневых стоков составил около 30% от общего объема стока каждой реки, что свидетельствует о высокой антропогенной нагрузке на водотоки. Согласно предоставленным данным за октябрь 2014 г. и июль 2015 г. (Отчеты..., 2014; 2015), содержание загрязняющих веществ превышало ПДК_{рх} в десятки раз (табл. 2). Таким образом, высокая антропогенная нагрузка на реки Лососинку и Неглинку определяется не только большим объемом ливневых стоков, но и высокими концентрациями в них загрязняющих веществ. Необходимо отметить, что высокое содержание $Fe_{\text{общ}}$ в ливневых стоках г. Петрозаводска не связано с антропогенной нагрузкой, а обусловлено геохимическими особенностями водосборных территорий рек (Бородулина, 2013; Крутских и др., 2016; Andronikov et al., 2019; Бородулина и др., 2020).

В главе 3 также представлена краткая характеристика антропогенного влияния на другие изученные притоки юго-западного, северо-западного и северного побережий Онежского озера.

Таблица 2. Загрязняющие вещества в воде ливневых стоков г. Петрозаводска, поступающих в реки Лососинку и Неглинку в октябре 2014 г. и июле 2015 г. (Отчеты..., 2014; 2015)

Показатель	ПДК	Р. Лососинка			Р. Неглинка		
		Min-max* M±m	% проб, превышающих ПДК	Максимальная кратность превышения ПДК	Min-max* M±m	% проб, превышающих ПДК	Максимальная кратность превышения ПДК
ВВ, мг/дм ³	+0,25 к фону	<u>2-560</u> 57±13	80	149	<u>2-665</u> 78±19	69	295
БПК ₅ , мг/дм ³	2,1	<u>0,4-37,7</u> 5,8±0,8	88	19	<u>0,58-198</u> 15,5±5	87	99
Нефтепродукты, г/дм ³	0,05	<u>0,007-13,2</u> 0,76±0,2	91	264	<u>0,016-10,1</u> 1,2±0,3	92	202
Fe _{общ} , мг/дм ³	0,1	<u>0,001-5,84</u> 0,89±0,15	75	58	<u>0,12-15,6</u> 2±0,4	100	156

Примечание. Для расчета ПДК_{рх} ВВ в 2014 г. использовали данные отдела экологии мэрии г. Петрозаводска, в 2015 г. — собственные данные; *Min-max — минимальные и максимальные величины; M±m — средняя величина и ошибка средней.

Анализ пространственного распределения и сезонной динамики химического состава воды. Химические показатели изученных рек разделили на две группы. Первая группа — показатели, характеризующие влияние заболоченной водосборной территории (региональный геохимический фон): косвенные показатели содержания трудноминерализуемых гумусовых веществ (ПО, ХПК) и связанное с ними Fe_{общ}, цветность, а также pH — индикатор содержания, в том числе, и гуминовых кислот (Лозовик, 2013). Вторая группа — показатели, характеризующие антропогенное влияние на реки (содержание легкоминерализуемых ОВ, определяемых по БПК₅, различные формы фосфора и минерального азота, содержание ВВ и нефтепродуктов, поступление которых связано с выпусками ливневых вод (табл. 2), а также содержание в воде растворенного кислорода, расходуемого на окисление легкоминерализуемого ОВ).

Химические показатели, характеризующие особенности природного состава речных вод. На загородных участках рек Лососинки и Неглинки, а также на руч. Железном установлены высокие значения показателей (табл. 3), характеризующих влияние заболоченной водосборной территории, что характеризовало изученные участки рек как высокогумусные.

Химические показатели загрязнения речных вод. Наибольшие показатели загрязнения речных вод характерны для городского участка р. Неглинки. Для руч. Железного подтвержден фоновый статус по химическим показателям (табл. 3).

Сезонная и пространственная изменчивость показателей химического состава воды. На основании анализа данных с использованием РСА выявлена роль сезонного фактора в распределении химических показателей в р. Лососинке

и пространственного фактора — для объяснения изменчивости химических показателей воды р. Неглинки.

Таблица 3. Показатели химического состава воды городских рек Лососинки и Неглинки, фонового участка руч. Железного в период исследований в 2014–2015 гг.

Показатели	Р. Лососинка		Р. Неглинка		Руч. Железный
	ст. L-1 (загородный участок)	городской участок	ст. N-1 (загородный участок)	городской участок	ст. IV
pH	<u>6,5–7,7</u> 7,0±0,2	<u>5,0–7,9</u> 7,3±0,1	<u>4,3–6,6</u> 4,8±0,3	<u>6,5–8,0</u> 7,2±0,1	<u>6,3–7,3</u> 6,6±0,2
Цветность, град.	<u>38–192</u> 109±19	<u>35–201</u> 133±9	<u>98–410</u> 286±54	<u>21–286</u> 108±26	<u>48–268</u> 203±18
Fe _{общ} , мг/л	<u>1,06–2,76</u> 1,45±0,25	<u>0,99–3,42</u> 1,56±0,25	<u>1,22–5,09</u> 2,36	<u>0,67–4,04</u> 1,68±0,3	<u>0,78–3,58</u> 1,94±0,67
ПО, мг О/л	<u>12,5–39,9</u> 10,1±1,2	<u>3,7–13,5</u> 9,4±1,0	<u>9,4–12,7</u> 10,3±0,8	<u>9,1–11,2</u> 10,2±0,4	<u>9,1–11,7</u> 10,7±0,7
Hum (гумусность), ед.	<u>20–43</u> 33±6	<u>18–42</u> 26±1	<u>30–64</u> 44±9	<u>14–57</u> 29±6	<u>43–56</u> 50±3
ХПК, мг О ₂ /л	<u>13–40</u> 19±4	<u>10,9–34,3</u> 23,3±2,3	<u>33,7–47,2</u> 38±3,6	<u>12,5–46,8</u> 25,2±4,2	<u>21–73</u> 33±6
О ₂ , мг О/л	<u>5,7–12,1</u> 9,9±0,4	<u>4,4–12,9</u> 10,1±0,2	<u>7,6–11,2</u> 8,9±0,5	<u>5,6–11,5</u> 9,6±0,3	<u>2,9–12,5</u> 8,9±0,8
Насыщение, %	<u>60–92</u> 85±3	<u>47–96</u> 87±1	<u>62–87</u> 72±3	<u>51–92</u> 82±1	<u>26–101</u> 82±6
ВВ, мг/л	<u>9–58</u> 36±13	<u>3–238</u> 21±5	<u>9–92</u> 24±6	<u>4–120</u> 15±3	<u>1–25</u> 13±5
БПК ₅ , мг О ₂ /л	<u>1,04–3,85</u> 1,34±0,1	<u>0,86–3,71</u> 1,55±0,09	<u>0,88–3,42</u> 1,53±0,2	<u>1,09–6,62</u> 3,39±0,4	<u>0,53–3,45</u> 1,66±0,41
NO ₂ ⁻ , мг N/л	<u>0,001–0,012</u> 0,005±0,003	<u>0,001–0,09</u> 0,009±0,002	<u>0,009–0,024</u> 0,016±0,004	<u>0,026–0,254</u> 0,196±0,04	<u>0,008–0,18</u> 0,048±0,024
NO ₃ ⁻ , мг N/л	<u>0,001–0,29</u> 0,18±0,06	<u>0,001–0,68</u> 0,22±0,04	<u>0,04–0,26</u> 0,21±0,06	<u>0,33–2,89</u> 0,56±0,1	<u>0,17–0,25</u> 0,20±0,01
P _{общ} , мг P/л	<u>0,018–0,232</u> 0,043±0,007	<u>0,011–0,186</u> 0,038±0,005	<u>0,019–0,162</u> 0,039±0,006	<u>0,046–0,34</u> 0,136±0,02	<u>0,018–0,042</u> 0,023±0,003
P _{мин} , мг P/л	<u>0,005–0,063</u> 0,039±0,008	<u>0,004–0,082</u> 0,031±0,005	<u>0,004–0,042</u> 0,025±0,004	<u>0,033–0,27</u> 0,122±0,02	<u>0,005–0,034</u> 0,018±0,003
Нефтепродукты, г/л	<0,02	<0,02–0,2	<0,02	<0,02–0,37	<0,02

Примечание. В числителе — min–max; в знаменателе — медиана и ее ошибка; для нефтепродуктов только min–max.

Химический состав воды притоков юго-западного, северо-западного и северного побережий Онежского озера. Реки содержат повышенное количество Fe_{общ} (0,1–3,7 мг/л), которое превышает ПДК_{рх} в 1,1–33 раза. Вода большей части притоков (реки Нелукса, Орзega, Пухта, Шокша, Вичка) характеризуется высокой цветностью (64–285, в среднем 123 град.). Величины ПО и ХПК для этих рек варьируют от 15 до 48 мг О/л и от 34 до 100 мг О₂/л соответственно, величина

гумусности — в пределах 31–117 (среднее 53), что соответствует высокогумусным рекам. Другая группа рек — Деревянка, Большая Уя, Лижма, Кумса — характеризуется более низкими показателями цветности (19–62, в среднем 43 град.), ПО (8–16 мг О/л) и ХПК (25–40 мг О₂/л). Величина гумусности для этих притоков варьирует в пределах 12–53 (среднее 28), что характеризует их как среднегумусные. Во всех изученных притоках выявлен нейтральный рН воды (6,85–7,9). Для изученных притоков в связи с малой антропогенной нагрузкой величины БПК₅ были невелики (0,5–1,7 мг О₂/л), так же как и содержание ВВ (0–7 мг/л), Р_{общ} (0,010–0,097 мг Р/л), Р_{мин} (0,001–0,047 мг Р/л).

Оценка загрязненности речных вод с использованием удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ), рассчитанного по всему комплексу химических показателей, характеризовала все участки рек Лососинки и Неглинки как высоко загрязненные. Класс загрязненности участков рек снизился при исключении из расчета УКИЗВ химических показателей, отражающих влияние регионального природного фактора (рН, Fe_{общ}), что позволило точнее установить антропогенно загрязненные участки рек.

ГЛАВА 4. БАКТЕРИОПЛАНКТОН ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Количественные показатели бактериопланктона и их пространственное распределение. Доминирующими в природном бактериопланктонном сообществе являются ГБ благодаря способности этой группы к высокой скорости роста при низких концентрациях ОВ. СБ способны развиваться при высоких концентрациях легкоминерализуемого органического субстрата и являются индикаторами активности процесса самоочищения воды. ФОБ — индикаторы поступления фенольных соединений. Индикаторами загрязнения воды нефтяными углеводородами являются показатели численности УОБ. Все показатели бактериопланктона увеличивают свою численность на городских участках рек в 11–20 раз по сравнению с загородными участками (табл. 4).

Количество НБ, осуществляющих первую ступень нитрификации — превращение аммонийных соединений до нитритных форм азота, за 2014–2015 гг. на всех станциях отбора проб достигало в среднем несколько сотен в 1 мл. Максимальные значения НБ отмечались на городских участках рек и достигали нескольких тысяч в 1 мл.

Санитарное состояние притоков оценивали по количественным показателям ОМЧ и ОКБ, численность которых свидетельствовало о возможном фекальном загрязнении и степени безопасности речных вод для рекреационного использования. На городских участках рек численность ОКБ увеличивалась в среднем в 14–35 раз (табл. 4). Здесь же отмечались не превышающие пороговое значение, равное 4, показатели СБ/ОМЧ (МУК 4.2.1884-04), что указывало на наличие в речных водах условно-патогенных микроорганизмов.

Таблица 4. Бактериопланктон городских рек Лососинки и Неглинки, фоновый участок руч. Железного в период исследований в 2014–2015 гг.

Показатели	Р. Лососинка		Р. Неглинка		Руч. Железный
	ст. L-1 (загородный участок)	городской участок	ст. N-1 (загородный участок)	городской участок	ст. IV
ОЧБ, млн кл/мл	<u>1,4–3,3</u> 2,0±0,2	<u>1,0–4,8</u> 2,7±0,2	<u>0,4–4,0</u> 1,1±0,3	<u>0,9–18</u> 3,6±0,3	<u>0,83–4,8</u> 1,84±0,2
V, мкм ³	<u>0,11–0,23</u> 0,15±0,03	<u>0,1–0,26</u> 0,21±0,03	<u>0,08–0,16</u> 0,12±0,01	<u>0,08–0,28</u> 0,23±0,04	<u>0,07–0,24</u> 0,11±0,01
ББ, мг/л	<u>0,16–1,6</u> 0,37±0,12	<u>0,2–1,42</u> 0,61±0,2	<u>0,04–0,52</u> 0,22±0,07	<u>0,27–4,19</u> 1,12±0,27	<u>0,29–1,57</u> 0,43±0,1
СБ, тыс. КОЕ/мл	<u>0,21–4,41</u> 0,74±0,3	<u>0,64–8,37</u> 3,68±0,74	<u>0,1–3,96</u> 0,98±0,26	<u>1,0–196,2</u> 16,43±4,3	<u>0,32–24,4</u> 1,21±0,25
ГБ, тыс. КОЕ/мл	<u>0,44–9,04</u> 2,17±0,65	<u>1,06–20</u> 8,4±1,16	<u>0,18–10,64</u> 1,4±0,27	<u>7,1–511</u> 29,3±8,0	<u>1,23–28,0</u> 4,06±1,2
ФОБ, тыс. КОЕ/мл	<u>0,14–2,57</u> 0,37±0,36	<u>0,49–5,93</u> 2,24±0,25	<u>0,08–3,93</u> 0,48±0,25	<u>0,44–149</u> 11,9±3,7	<u>0,26–22,7</u> 1,58±0,31
УОБ, тыс. КОЕ/мл	<u>0,02–0,87</u> 0,08±0,02	<u>0,04–1,54</u> 0,34±0,06	<u>0,01–0,55</u> 0,2±0,05	<u>0,14–23</u> 1,75±1,07	<u>0,04–0,76</u> 0,21±0,05
ОКБ, тыс. КОЕ/л	<u>1,0–65,0</u> 3,9±4,7	<u>13,5–690</u> 53,2±6,6	<u>0,3–389</u> 13,9±5,7	<u>38,4–6400</u> 492±180	<u>0,2–673</u> 12,3±6,1
ОМЧ, тыс. КОЕ/мл	<u>0,01–0,55</u> 0,11±0,03	<u>0,15–7,88</u> 0,6±0,08	<u>0,01–1,23</u> 0,07±0,02	<u>0,1–150</u> 5,95±3,02	<u>0,01–5,28</u> 0,16±0,07

Значимое различие ($p < 0,05$) показателей развития всех групп бактерий между фоновыми и городскими участками рек Лососинки и Неглинки подтверждается по критерию Манна — Уитни.

При оценке влияния речных вод на Петрозаводскую губу, оказалось, что в озерной воде уже на расстоянии около 500 м от устья количество СБ, ГБ, ФОБ и УОБ сокращается в 19–34 раза, ОЧБ снижается незначительно (в 2 раза). Главной причиной такого снижения является масштабное разбавление речных вод озерными в летнее время и хороший водообмен в заливе. Объем водных масс в губе составляет 1,55 км³, период водообмена — 1,6 месяца (Lozovik et al., 2019).

Сезонная изменчивость микробиологических показателей. Заметное влияние на бактериопланктон малых рек полугорного типа оказывают метеорологические условия. Частые осадки определяют смыв ОВ и микроорганизмов с водосбора, что обуславливает в воде рек, практически на всем протяжении их русла, высокую сезонную изменчивость количественных показателей бактериопланктона (Тимакова, 2013). В целом для рек Лососинки и Неглинки характерна высокая изменчивость микробиологических показателей, из-за чего статистическая значимость с природными факторами (температура, расход воды) отсутствовала.

Для руч. Железного в оба года исследований были характерны синхронные изменения численности эколого-трофических групп бактериопланктона с одним

пиком численности в летний период. Значимый коэффициент корреляции Спирмена ($p < 0,05$) был отмечен при оценке связей между температурой воды и показателями ОЧБ и ОКБ лишь в 2014 г.

Размерно-морфологическая структура бактериопланктона. Палочковидные формы бактерий являются активным компонентом микробного сообщества (Румянцева, Косолапов, 2015; Кузнецова, 2017; Кузнецова и др., 2020). В р. Лососинке и на городском участке р. Неглинки доля палочек за оба года исследований составила в среднем 63% от ОЧБ, что свидетельствует о влиянии антропогенного фактора, связанного с увеличением поступления органических веществ различной природы и их деструкции, а также об интенсивном протекании процессов самоочищения в водотоках (Разумов, 1962; Шорникова, 2008; Хмелевская, 2013; Токинова и др., 2014; Богданова, 2015). На загородной станции р. Неглинки в бактериопланктоне доминировали кокковые формы бактерий, характерные для чистых водоемов (Кожова, 1989), их доля в сообществе в среднем за 2014–2015 гг. составила 52% от ОЧБ.

Оценить функциональное состояние бактериопланктона косвенно позволяет размерная структура бактериального сообщества. Бóльшая доля мелких кокков на загородных участках рек Лососинки и Неглинки свидетельствует о более низком трофическом статусе по сравнению с городскими участками. Увеличение доли крупных палочек на городских участках рек по сравнению с загородными участками показывает наличие необходимых для клеточного метаболизма питательных веществ в среде.

В воде руч. Железного за оба года исследований отмечалось доминирование палочковидных форм бактерий (до 65% от ОЧБ). Доля активных форм клеток (мелкие кокки и крупные палочки) в воде руч. Железного соответствовала аналогичным показателям загородного участка р. Неглинки.

Показатели бактериопланктона притоков юго-западного, северо-западного и северного побережий Онежского озера. Для изученных рек ОЧБ в среднем достигала 2,4 млн кл/мл, ОКБ — 10,73 тыс. КОЕ/л, ОМЧ — 183 КОЕ/мл, СБ — 1,7 тыс. КОЕ/мл, ГБ — 5,58 тыс. КОЕ/мл, ФОБ — 1,55 тыс. КОЕ/мл, УОБ — 669 КОЕ/мл, численность НБ только для рек Деревянки, Вички и Кумсы достигала нескольких десятков в 1 мл, в то время как для остальных притоков их численность была менее десятков в 1 мл.

ГЛАВА 5. ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАНКТОНА ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Для изученных водотоков характерен отрицательный биотический баланс (превышение величины деструкции над продукцией) (рис. 2), что свидетельствует о присутствии большого количества аллохтонного ОВ.

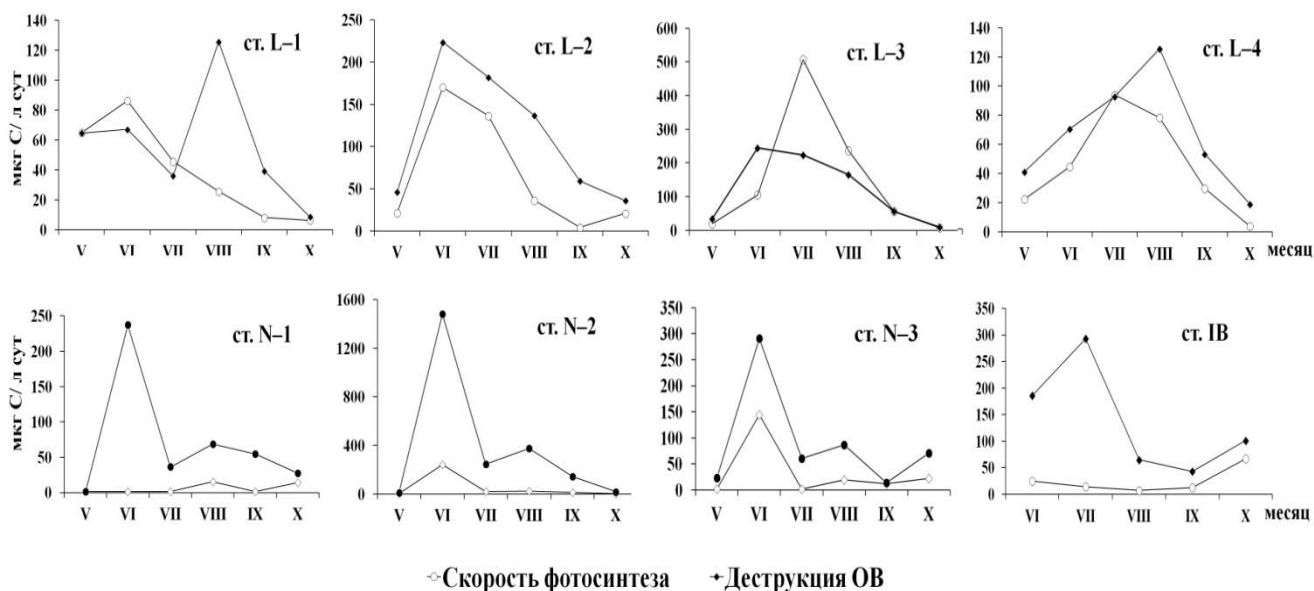


Рисунок 2. Сезонная динамика скорости фотосинтеза и деструкции ОВ в воде р. Лососинки (ст. L-1, L-2, L-3, L-4), р. Неглинка (ст. N-1, N-2, N-3) и руч. Железного (ст. IB) в 2014 г.

На загородных участках рек Лососинки, Неглинка и руч. Железного это превышение составляло 1,5, 12 и 5,5 раза соответственно, на городских участках рек Лососинки и Неглинка — 1,1 и 5,6 раза соответственно. В целом отрицательный биотический баланс изученных водотоков свидетельствует в первую очередь о гетеротрофном типе функционирования речных экосистем. В то же время морфологические и гидрологические особенности малых рек полугорного типа препятствуют интенсивному развитию фито- и зоопланктона (Куликова, Сярки, 1988; Сластина и др., 2011), что приводит к доминированию микробного звена (Копылов, Косолапов, 2011). Увеличение скорости деструкции ОВ вниз по течению реки указывает на поступление легкоминерализуемого ОВ в речные воды и о протекании процессов самоочищения.

ГЛАВА 6. МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА С УЧЕТОМ ИХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

В условиях влияния на речные экосистемы заболоченной водосборной территории важной задачей становится изучение возможных связей между содержанием гумусовых веществ и количественными показателями бактериопланктона, что позволяет уточнить индикаторную роль бактерий при биомониторинге высокоцветных вод. Для решения этой задачи использовали РСА. Основой для этого анализа послужили логарифмированные химические и микробиологические показатели воды 17 станций 12 притоков Онежского озера за 2015 г. Благодаря широкому диапазону состава воды, как природных (цветность воды, $Fe_{общ}$, ХПК, рН), так и антропогенно обусловленных химических

показателей (БПК₅, ВВ, Р_{общ}), удалось выявить химические показатели, с которыми могла быть связана численность разных групп бактерий в воде.

Анализ данных (РСА) показал, что три первые главные компоненты (ГК) отразили 74 % общей изменчивости признаков (табл. 5). Значимый вклад в ГК1 внесли все группы бактерий и величина БПК₅, отражающая содержание легкоминерализуемого ОВ, поступающего с ливневыми городскими стоками. Следовательно, количество бактерий в воде притоков отражает влияние антропогенного фактора.

Таблица 5. Распределение факторных нагрузок в главные компоненты при изучении связей между химическими и микробиологическими показателями притоков Онежского озера (Макарова и др., 2023)

Исходные показатели	ГК1	ГК2	ГК3
Содержание кислорода	0,5	0,4	-0,1
рН воды	-0,1	0,8	0,5
Цветность	0,2	-0,7	-0,6
ХПК	0,1	-0,7	0,5
БПК ₅	-0,8	0,1	-0,1
ВВ	-0,3	0,2	-0,5
Р _{общ}	0,2	-0,3	0,8
ОЧБ	-0,7	0,4	0,0
ОКБ	-0,7	0,0	-0,1
ОМЧ	-0,9	-0,1	0,1
СБ	-1,0	-0,1	0,1
ГБ	-1,0	-0,1	0,1
ФОБ	-1,0	-0,1	0,1
УОБ	-1,0	-0,1	0,1
Дисперсия	6,48	2,14	1,79
Доля в общей дисперсии, %	46	15	13

Примечание. Жирным шрифтом выделены нагрузки признаков со значимым вкладом ($p < 0,05$) в значения главных компонент.

Р_{общ} и цветность вошли в третью главную компоненту с противоположными знаками, можно считать, что соединения фосфора в речных водах имеют антропогенное происхождение. Корреляционный анализ доказал, что статистически значимые значения коэффициента корреляции Спирмена (0,5–0,9) были обнаружены для микробиологических данных и величиной БПК₅ (основной показатель влияния антропогенных источников загрязнения). Это позволяет применить общепринятые классификации качества воды, предназначенные для выявления антропогенно измененных участков водных объектов по микробиологическим показателям.

Применимость микробиологической индикации к оценке качества речных вод была проверена путем сравнения микробиологических результатов с данными анализа химического состава вод с использованием экологической классификации качества поверхностных вод суши (Оксиюк и др., 1993). Поскольку для притоков

В ГК2 вошли показатели, характеризующие влияние заболоченного водосбора (рН, цветность, ХПК), при этом ни одна группа бактерий не внесла значимого вклада в ГК2. Это доказывает отсутствие прямого влияния природного фактора на количественные показатели бактериопланктона. В ГК3 со значимым вкладом вошел один показатель — Р_{общ}. Этот элемент поступает в реки в основном с ливневыми водами. Кроме того, фосфор может поступать в водоемы с гумусовым веществом в форме железосвязанного фосфора (Лозовик, 2006). Принимая во внимание, что

Онежского озера характерен высокий природный фон по некоторым показателям химического состава (цветность, рН, Fe_{общ}, ПО, ХПК), то их не включали в оценку качества воды. В анализ вошли химические показатели, отражающие влияние антропогенной нагрузки: БПК₅, содержание нефтепродуктов и ВВ, Р_{общ} и Р_{мин}, насыщение воды кислородом. Из микробиологических показателей были использованы показатели ОЧБ, СБ и ОКБ. Класс качества воды рассчитывался как среднее значение по группе химических показателей и отдельно — по группе микробиологических показателей. Станции изученных притоков ранжировались от максимального класса качества по микробиологическим показателям к минимальному (рис. 3).

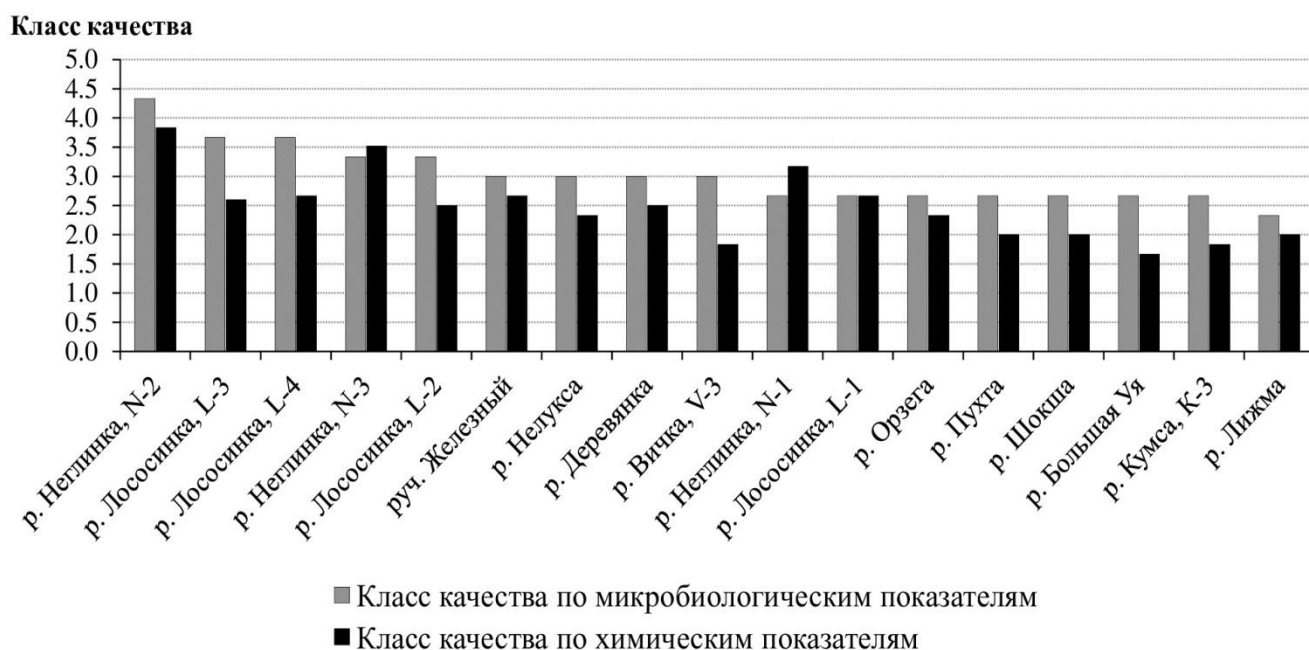


Рисунок 3. Диаграмма классов качества воды на различных станциях по микробиологическим и химическим показателям

Таким образом, были установлены наиболее загрязненные участки рек по двум группам изученных показателей: городские участки рек Лососинки и Неглинки, а также руч. Железный показали наибольшую загрязненность и по химическим, и по микробиологическим показателям. Наиболее чистыми оказались приустьевые станции рек Лижмы и Кумсы.

Коэффициент корреляции Спирмена между усредненными классами качества вод, рассчитанными по химическим и микробиологическим показателям, составил 0,6 и был значимым ($p < 0,05$). Таким образом, проведенный анализ подтверждает применимость общепринятых классификаций по микробиологическим показателям для оценки качества вод высокоцветных притоков, находящихся под антропогенным влиянием. Это позволило выполнить классификацию качества вод притоков Онежского озера по микробиологическим показателям с использованием различных классификаторов. Оценки качества

варьировали от чистых вод (2 класс качества) (устье р. Лижмы) до грязных вод (5 класс качества) (городские участки рек Лососинки и Неглинки).

В главе 6 рассмотрены возможные методы очистки и ремедиации водотоков. Предложены профилактические и восстановительные мероприятия, связанные с установкой локальных очистных сооружений, облагораживанием водосборной территории, изъятием донных отложений, созданием биоплато из высшей водной растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что наибольшей загрязненностью характеризуются реки Лососинка и Неглинка, протекающие по территории г. Петрозаводска, где проживает более 260 000 человек. Загрязненные воды этих притоков поступают в Петрозаводскую губу Онежского озера и могут ухудшать качество ее воды, которая используется для питьевого водоснабжения города. В связи с этим биоиндикация качества воды и оценка экологической ситуации на притоках Онежского озера являются весьма актуальными.

Для более точной оценки экологической ситуации на реках Карелии необходимо применение дифференцированного подхода, который предполагает расчет индексов качества воды отдельно: по химическим показателям, отражающим, с одной стороны, влияние природных факторов, а с другой стороны, антропогенных источников загрязнения. Микробиологическая индикация качества воды в притоках Онежского озера является важнейшим средством контроля экологической ситуации и должна проводиться круглогодично.

ВЫВОДЫ

1. Региональные особенности химического состава воды на всех станциях изученных притоков Онежского озера связаны с повышенной заболоченностью (10–13%) их водосборов и определяют высокие показатели цветности воды (110–290 град), содержания общего железа (1.4–2.4 мг/л) и пониженные значения рН (до 4.8). На городских участках рек выявлена высокая антропогенная нагрузка, связанная с поступлением ливневых стоков г. Петрозаводска (30% от объема речных вод) и высокими концентрациями в них загрязняющих веществ. Содержание органического вещества, определяемого по БПК₅, в ливневых стоках превышает ПДК в 1.2–94.3 раз, взвешенных веществ – в 1.2–132 раз, нефтепродуктов – в 1.9–78.6 раз.

2. Количественные показатели бактериопланктона характеризовались значимыми различиями на загородных и городских участках рек Лососинки и Неглинки. Сезонная динамика численности бактерий-индикаторов нефтяного загрязнения, санитарного состояния, сапробности на городских участках рек

Лососинки и Неглинки слабо связана с гидрологическим и температурным режимом рек и отражает влияние стока загрязняющих веществ с городской территории. В составе бактериопланктона городских участков увеличивалась доля крупных палочковидных форм, характеризующихся интенсивным метаболизмом и свидетельствующих о поступлении легкоминерализуемых органических веществ.

3. Для рек Лососинки, Неглинки и ручья Железного характерен отрицательный биотический баланс (отношение продукции к деструкции 0.1–0.9), который свидетельствует о гетеротрофном типе функционирования речных экосистем и протекании процессов самоочищения.

4. Бактериопланктон является приоритетным экспрессным биоиндикатором экологического состояния малых рек полугорного типа по сравнению с другими планктонными формами и позволяет выявить загрязнение вод легкоминерализуемым органическим веществом, фенольными соединениями и нефтепродуктами. Установлено, что городские участки рек Лососинки и Неглинки характеризуются высокими показателями численности общих колиформных бактерий (53.2–492 тыс. КОЕ/л) и общего микробного числа (0.6–5.95 тыс. КОЕ/мл), что свидетельствует о высокой антропогенной нагрузке и потенциальной санитарной опасности речных вод для населения г. Петрозаводска.

5. Количественные показатели эколого-трофических групп бактериопланктона изученных рек, протекающих по урбанизированным территориям, обусловлены поступлением органических веществ антропогенного происхождения, что позволяет применять микробиологические показатели для оценки экологической ситуации в высокогумусных притоках Онежского озера.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

1. **Макарова Е.М.**, Tekanova E.V., Kalinkina N.M. Bacterioplankton Status in the Lososinka River (Tributary of Lake Onego) and the Water Quality by Microbiological Indicators// *Biology Bulletin*. 2022. 49 (1). pp. 1996–2003. [DOI:10.1134/S1062359022100363](https://doi.org/10.1134/S1062359022100363)

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

2. Теканова Е.В., **Макарова Е.М.**, Калинкина Н.М. Оценка состояния воды притоков Онежского озера в условиях антропогенного воздействия по микробиологическим и токсикологическим показателям // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015. № 9. С. 44–52.

3. Теканова Е.В., **Макарова Е.М.** Микробиологическая индикация загрязнения воды реки Нелукса (Карелия) // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2016. № 8 (161). С. 109–114.

4. **Макарова Е.М.**, Калинкина Н.М., Сабылина А.В. Возможность применения микробиологических показателей для оценки состояния водотоков с высокой

цветностью воды (на примере притоков Онежского озера) // Принципы экологии. 2023. № 3. С. 36–50. DOI:10.15393/j1.art.2023.14043

Публикации в других изданиях:

5. Теканова Е.В., **Макарова Е.М.**, Калинкина Н.М. Экологическая оценка качества воды урбанизированного притока Онежского озера по химическим показателям // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3 (87). С. 75–84. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.3.75-84

Материалы и тезисы докладов конференций:

6. **Макарова Е.М.** Микробиологические показатели в оценке состояния поверхностных вод // моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии. Лекции науч. сотр., преподавателей и мол. ученых для вузов – Петрозаводск, 2015. С. 115–124.

7. Теканова Е.В., **Макарова Е.М.**, Калинкина Н.М. Биоиндикация и биотестирование состояния рек урбанизированных территорий Карелии // Роль науки в решении проблем региона и страны: фундаментальные и прикладные исследования. Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 70-летию КарНЦ РАН – Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2016. С. 343–346

8. **Макарова Е.М.**, Теканова Е.В. Сезонная динамика микробиологических показателей рек г. Петрозаводска // Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика) – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 121–124.

9. **Макарова Е.М.** Оценка динамики гидрохимических и микробиологических показателей урбанизированных рек с применением анализа главных компонент // Материалы Междунар. молод. науч. форума «ЛОМОНОСОВ-2021» [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2021.

10. **Макарова Е.М.** Оценка состояния урбанизированного притока Онежского озера (на примере р. Неглинки) по гидрохимическим и микробиологическим показателям // Материалы Междунар. молод. науч. форума «ЛОМОНОСОВ-2022» [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2022.

11. **Макарова Е.М.** Индикация состояния притоков Онежского озера по микробиологическим показателям с учетом региональных особенностей химического состава вод // Тез. докл. в 76-й Всерос. школы-конф. молод. учен. «Биосистемы: организация, поведение, управление» – Н. Новгород, Университет Лобачевского. 2023, С. 202.

12. **Макарова Е.М.** Оценка качества воды притоков Онежского озера, протекающих по территории г. Петрозаводска, по химическим и микробиологическим показателям // Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XVIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Книга 1. – Киров: ВятГУ, 2023. С. 190–195.

13. **Макарова Е.М.** Оценка качества воды притоков Онежского озера по показателям бактериопланктона с учетом региональных особенностей химического состава их вод // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: сборник материалов VIII Всерос. конф. по водной экотоксикологии, посвященной 85-летию со дня рождения Б.А. Флёрова – Ярославль: Филигрань, 2023. С. 261–263.