На правах рукописи

ТИКУШЕВА ЛЮДМИЛА НИКОЛАЕВНА

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДОРОСЛЕВЫХ СООБЩЕСТВ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ И БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКАЯ ТУНДРА)

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Нижний Новгород
2022

Работа выполнена на базе кафедры экологии Института естественных наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина»

Научный руководитель:	кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела флоры и растительности Севера Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (г. Сыктывкар) **Патова Елена Николаевна**
Официальные оппоненты:	доктор биологических наук, доцент, заведующий лабораторией альгологии ФБГУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина» Российской академии наук (пос. Борок) **Корнева Людмила Генриховна** кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и зоологии Института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (г. Нижний Новгород) **Старцева Наталья Александровна**
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук (г. Кировск)

Защита состоится «___» __________ 2022 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета 24.2.340.05 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, Институт биологии и биомедицины

E-mail: dis212.166.12@gmail.com **Факс**: (831) 462-30-85

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: https://diss.unn.ru/files/2022/1297/diss-Tikusheva-1297.pdf, с авторефератом – в сети Интернет на сайте ВАК России по адресу: http://vak.minobrnauki.gov.ru

Автореферат разослан «___» __________ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат биологических наук — Д.Е. Гаврилко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Экосистемы Крайнего Севера стали зоной не только традиционного природопользования, но и техногенного освоения недр. Происходит нарастание антропогенного пресса на биоту, трансформация и уничтожение уникальных природных объектов. Актуальность комплексного исследования водных экосистем Полярного Урала и прилегающей территории Большеземельской тундры обусловлена нарушениями природных ландшафтов в результате строительства и эксплуатации магистрального газопровода «Ямал-Центр» на его участке «Бованенково-Ухта», и транспортных путей по его обслуживанию, пересекающих все основные водотоки и водосборы на данной территории. В результате происходит загрязнение окружающей среды техногенными выбросами. Планомерного изучения изменений, происходящих в природных комплексах под влиянием этих объектов, не проводится в связи с удаленностью и труднодоступностью региона. Остается мало исследованной значительная часть фоновых территорий. Имеются работы по географии и гидрологии водных объектов Полярного Урала (Голдина, 1972; Кеммерих, 1961; Миронова, Покровская, 1964; Хохлова, 2002); биоразнообразию водных и наземных экосистем Полярного Урала и Большеземельской тундры (Альгофлора…, 1994; Особенности структуры…, 1994; Природная среда тундры…, 2005; Богданов и др., 2004; Биоразнообразие…, 2007). С применением методов математического моделирования выполнена прогнозная оценка воздействия эмиссий данного трубопровода на окружающую среду (Башкин и др., 2002, 2006; Казак, 2002; Самсонов, 2006). Получены первые сведения о влиянии объектов газопровода на водные и наземные экосистемы Полярного Урала по результатам полевых исследований (Патова и др., 2014а, 2014б).

Альгологические исследования в районе Большеземельской тундры и Полярного Урала в большей степени носят флористический характер, водорослевые сообщества остаются недостаточно полно изученными. Новые направления хозяйственного освоения Крайнего Севера обусловливают необходимость экологической оценки водных объектов и прогноза их изменения в условиях антропогенного воздействия.

Трансформация структуры водорослевых сообществ является диагностическим признаком состояния водоёмов. Исследования изменений альгоценозов и условий водной среды в результате воздействия объектов магистрального газопровода на территории Большеземельской тундры и Полярного Урала ранее не проводились. Бассейн р. Кара является мало исследованным, большинство водных объектов сохраняют статус ненарушенных или слабо трансформированных. Поэтому кроме научной ценности сведений о биологическом и экологическом разнообразии водорослей региона исследований, полученные результаты могут быть использованы для оценки воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду на данной территории и для организации экологического мониторинга в будущем.

Цель и задачи работы. Цель исследования – выявить основные направления трансформации водорослевых сообществ в горных и тундровых водных объектах в зоне комплексного загрязнения при строительстве и эксплуатации магистрального газопровода.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1) изучить природные особенности исследованных водных объектов Большеземельской тундры и Полярного Урала, на основе анализа химического состава поверхностных природных вод, донных отложений определить факторы среды, влияющие на трансформацию водорослевых сообществ;

2) выявить видовой состав водорослей рек и озер бассейна реки Кара, провести

таксономический, эколого-географический анализ альгоценозов, а также выделить доминирующие комплексы для исследованных водных объектов;

3) оценить изменения структуры водорослевых сообществ в условиях воздействия строительства и эксплуатации линейных сооружений, связанных с транспортировкой газа, их адаптивные реакции к совокупному действию факторов среды, выявить индикаторные таксоны и экологические группы водорослей на данный вид воздействия;

4) выполнить оценку экологического состояния водных объектов в условиях строительства и эксплуатации магистрального газопровода с использованием комплексного подхода на основе гидрохимических и альгологических данных.

Научная новизна и теоретическая значимость. Впервые для водных объектов бассейна р. Кара проведено комплексное изучение таксономической, эколого-географической структуры и закономерностей развития сообществ водорослей. Определены химические показатели водной среды и донных отложений, основные загрязнители вод, рассчитаны коэффициенты донной аккумуляции тяжелых металлов в тундровых водоёмах Полярного Урала и Большеземельской тундры. Установлены направления изменения альгоценозов в условиях воздействия строительства и эксплуатации объектов магистрального газопровода. Обобщены сведения о диагностических признаках альгоценозов фоновых и загрязнённых водных объектов региона исследований. Впервые получены сведения о водорослях-индикаторах качества среды для мало изученных и труднодоступных водных объектов Большеземельской тундры и Полярного Урала, как не нарушенных, так и испытывающих антропогенное воздействие. Составлен аннотированный список видов водорослей для мало изученного района Большеземельской тундры и Полярного Урала, насчитывающий 206 видов с внутривидовыми таксонами из 7 отделов, содержащий информацию об их эколого-географических характеристиках и встречаемости в каждом из исследованных водных объектов. Результаты работы вносят вклад в развитие представлений об особенностях структуры альгоценозов Большеземельской тундры и Полярного Урала, изменениях видового состава водорослей в условиях антропогенного воздействия объектов магистрального газопровода, пополняют знания о разнообразии и экологии водорослей водных объектов Субарктики.

Практическая значимость. Полученные данные пригодны для составления сводок о региональной флоре. Таксономические списки водорослей исследованных регионов и сведения по экологии и распространению видов могут быть использованы при подготовке российских и международных диагностических ключей и определителей. На основе полученных данных об изменении видового состава водорослей, химических показателей воды и донных отложений разработана программа экологического мониторинга состояния водных объектов в зоне влияния магистрального газопровода с использованием альгоиндикации и данных химического анализа, в которой сформулированы диагностические признаки разных уровней загрязнения и предложены наблюдаемые показатели. По материалам исследования подготовлены рекомендации для создания новой особо охраняемой природной территории Республики Коми в бассейне реки Силова-Яха. Материалы диссертации также были использованы при разработке курсов лекций и практических работ по экологическому мониторингу и оценке воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду на кафедре экологии ФГБОУ ВО «Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина».

Соответствие паспорту научной специальности. Научные положения диссертации соответствуют шифру специальности 1.5.15. Экология (антропогенное воздействие на сообщества и экосистемы; разработка критериев оценки состояния среды, биоиндикация).

Положения, выносимые на защиту:

1. Водные объекты в зоне влияния магистрального газопровода сохраняют свои природные особенности (гидро-карбонатно-кальциевый тип вод с низкой минерализацией), при этом проявляется техногенное загрязнение вод и донных отложений нефтепродуктами, ртутью, тяжелыми металлами.

2. Основу альгофлоры (без учета диатомовых) водных объектов исследованного района составляют представители отделов Cyanoprokaryota, Streptophyta, Chlorophyta. В водорослевых сообществах по числу видов преобладают представители родов Cosmarium, Scenedesmus, Staurastrum, Closterium. Различия в структуре сообществ в большей степени обусловлены принадлежностью к одному бассейну, чем наличием загрязнений.

3. В условиях влияния аэротехногенного загрязнения и поступления сточных вод от объектов магистрального газопровода происходит повышение трофического статуса рек и озёр, что проявляется в изменении видового состава, таксономической и экологической структуры альгоценозов и комплекса доминирующих видов.

4. Водорослевые сообщества низкоминерализованных тундровых водных объектов реагируют увеличением видового разнообразия при начальном и среднем уровне загрязнения в зоне влияния газопровода. Снижение числа видов проявляется в сильнозагрязненных водных объектах – непроточных озерах в непосредственной близости от объектов газопровода.

Апробация результатов. Автор принимал личное участие в постановке **цели и задач работы**, в комплексных экспедиционных исследованиях, отборе альгологических образцов, проб природной поверхностной воды и донных отложений для химического анализа, идентификация водорослей различных таксономических групп (все отделы, за исключением диатомовых водорослей, определение которых в рамках комплексных исследований выполнено сотрудником ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН – А.С. Стениной), осуществлении статистической обработки материала, а также обсуждении и теоретическом осмыслении полученных результатов. Доля личного участия автора в сборе материала, написании и подготовке публикаций составляет 60–95%.

Основные результаты работы были доложены и представлены на международных, российских и региональных научно-практических конференциях: Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2013-2014), Всероссийской конференции «Молодёжь и наука Севера» (Сыктывкар, 2013); Всероссийской научной конференции «Биоразнообразие экосистем крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана» (Сыктывкар, 2013), на круглом столе «Экологические проблемы Российского Севера в контексте промышленного развития региона», посвященном десятилетию кафедры экологии Сыктывкарского государственного университета (Сыктывкар, 2013), Межрегиональной научно-практической конференции «Роль университетов в реализации арктической стратегии России: экологические, технологические, социокультурные аспекты» (Ухта, 10-12 октября 2013 г.), Международной научной конференции «Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге» (Борок, 2014), Всероссийской научной конференции «Освоение Севера и проблемы природовосстановления» (Сыктывкар, 2014), Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития сети ООПТ Европейского Севера и Урала» (к 20-летию образования объекта Всемирного Наследия ЮНЕСКО «Девственные леса Коми», 85-летию организации Печоро-Илычского заповедника, Сыктывкар, 2015), на Международном симпозиуме «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» (Новосибирск, 2015), Межрегиональной научно-практической конференции «Вклад академической науки в развитие производительных сил Европейского Севера России» (посвящена 95-летию со времени образования Республики Коми) (Сыктывкар 18-19 мая 2016 г.), II Международной научной школе-конференции «Цианопрокариоты/цианобактерии: систематика, экология, распространение» (Сыктывкар, 16-21 сентября 2019 г.). Работа выполнена в рамках плановых госбюджетных тем Института биологии Коми НЦ УрО РАН, проектов УрО РАН Фундаментальные исследования «Арктика» № 12-4-7-004-АРКТИКА и «Комплексная оценка водных экосистем Европейской Арктики, трансформированных в результате добычи и транспортировки углеводородов, разработка критериев их охраны для обеспечения воспроизводства биоресурсов» № 15-15-4-36, при поддержке гранта Русского географического общества «Организация комплексной экспедиции на Полярный Урал для выделения в российской Арктике территорий высокой природоохранной ценности», грантов РФФИ № 15-04-06346, №18-04-00643, № 18-04-00171.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 4 – в периодических изданиях, входящих в список ВАК, отдельные разделы трех коллективных монографий (по одной главе в каждой, в соавторстве).

Структура и объём работы. Решение поставленных задач определило структуру диссертационной работы, состоящую из введения, 5 глав, заключения, выводов, 7 приложений. Диссертация изложена на 212 страницах, в том числе 140 страниц основного текста. Работа иллюстрирована 12 таблицами и 31 рисунком. Список использованной литературы включает 292 источника, в том числе 83 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и признательность за неоценимую помощь в определении видов и всестороннюю поддержку научному руководителю к.б.н. Е.Н. Патовой; большое уважение и слова благодарности соавторам публикаций, коллективу кафедры экологии Института естественных наук ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина», лаборатории геоботаники и сравнительной флористики Института биологии Коми НЦ УрО РАН за помощь в выполнении работы. Автор признателен за внимание к работе и ценные замечания сотрудникам Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Отдельная благодарность за консультации при математической обработке данных д.б.н. В.Н. Якимову, к.б.н. А.Б. Новаковскому и М.Д. Сивкову. Очень благодарна моей семье за понимание и поддержку при написании работы. Работу посвящаю моей сестре, математику М.Н. Юркиной, ушедшей из жизни от COVID-19.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. История исследований водорослей естественных и антропогенно трансформированных водоёмов Большеземельской тундры и Полярного Урала (обзор литературы)

В главе рассмотрена изученность и основные результаты альгологических исследований водоёмов Большеземельской тундры и Полярного Урала на основе обзора литературных данных, также выявлены диагностические признаки альгоценозов чистых водных объектов и в условиях разных видов загрязнений. Базисом для экологических исследований данных районов являются работы обобщающего характера (Альгофлора…, 1994; Природная среда …, 2005; Биоразнообразие…, 2007 и др.; Стенина, 2009).

Глава 2. Природные условия районов исследований

В данной главе приведены сведения о географическом положении, климатических и гидрологических характеристиках исследованных территорий, которые относятся к бассейну р. Кара и отличаются обилием разных по происхождению водоёмов, принадлежность которых к бассейну одной реки даёт возможность сопоставления результатов (рисунок 1).

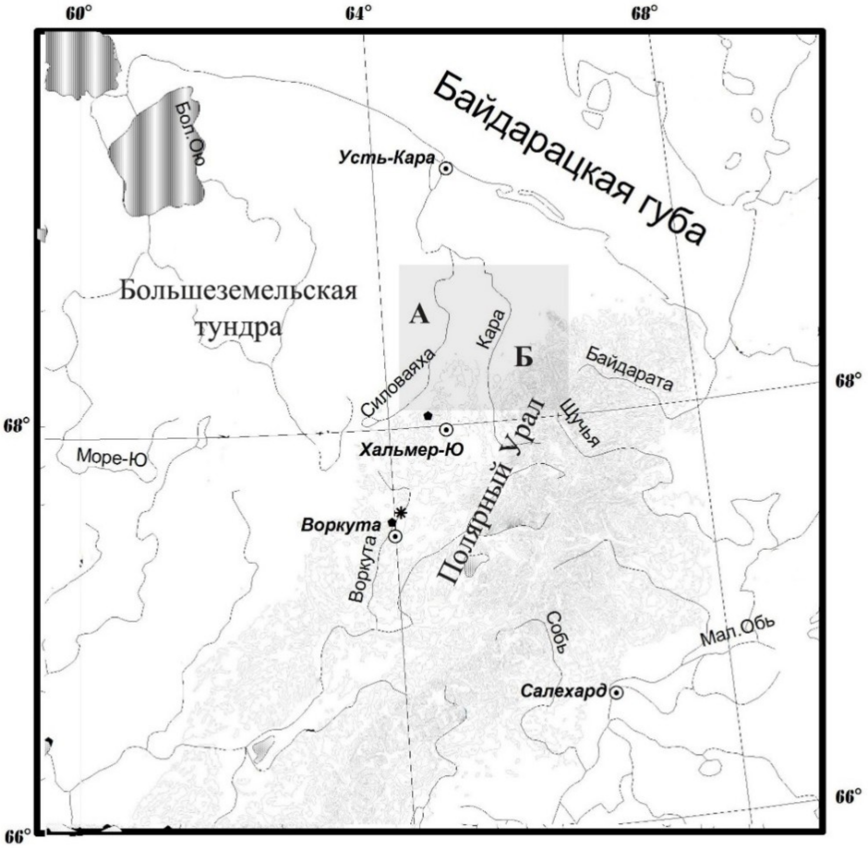


Рисунок 1. Карта-схема районов исследований.

Условные обозначения: ☐ Место отбора проб: А – р. Силова-Яха, её приток р. Хальмеръю, озёра Хальмерты, Круглое, Тройное, без названия – № 3, № 4, № 5 (фоновый район); Б – р. Кара и её притоки – реки Б. Лядгей, Нярма, озёра Б. Манясейто, Коматы, без названия № 1 (в зоне воздействия трассы газопровода).

Глава 3. Материалы и методы исследования

Материалы исследования. Объектом исследования являются сообщества водорослей пресноводных экосистем западного склона Полярного Урала и восточной части Большеземельской тундры из отделов Cyanoprokaryota, Rhodophyta, Dinophyta, Euglenozoa, Ochrophyta, Chlorophyta и Streptophyta, а также привлечены литературные данные по диатомовым водорослям (Стенина, 2009; 2015). Определены и проанализированы физико-химические параметры водной среды. Отбор проб воды, донных отложений и водорослей фитопланктона и перифитона проведен в июле-августе 2011-2013 гг. общепринятыми методами (Гидрохимические показатели…, 1999). Обследовано 5 рек и 9 озер: р. Силова-Яха, её приток р. Хальмеръю, озёра Хальмерты, Круглое, Тройное, без названия – № 3, № 4, № 5, находятся на значительном удалении от крупных населенных пунктов, относятся к бассейну р. Силова-Яха, на водосборе которой влияние магистрального газопровода отсутствует. При этом имеются иные источники загрязнения (традиционное природопользование – оленеводство, туризм). Река Кара и её притоки – реки Б. Лядгей, Нярма, а также озёра Б. Манясейто, Коматы, без названия № 1, обследованы в зоне воздействия трассы газопровода «Бованенково-Ухта» и транспортных путей по его обслуживанию (грунтовая автомобильная дорога с забетонированными мостовыми переходами), которые пересекают все основные водотоки и водосборы в бассейне р. Кара.

Все реки исследованы в местах их пересечения магистральным газопроводом. Для оценки влияния антропогенного воздействия на реки пробы природной поверхностной воды, донных отложений и водорослей в водотоках отобраны на двух участках для каждой реки, на расстоянии 500 м от дороги: на условно чистом (выше моста по течению) и загрязненном (ниже по течению реки). В озерах пробы отобраны в планктоне и в бентосе. Исследованы 52 альгологических пробы, 19 проб природной поверхностной воды, 9 проб донных отложений.

Методы исследования. Отбор проб водорослей проводили общепринятыми в альгологических исследованиях методами (Методика изучения…, 1975; Руководство…, 1983). Определение водорослей осуществлено автором с использованием микроскопа Nikon Eclipse 80i с встроенной цифровой фотокамерой с программой для анализа изображений при увеличении ×400, ×1000. При идентификации водорослей использованы отечественные и зарубежные определители с учетом современных номенклатурных изменений по базе данных AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2020). В работе приведен систематический список водорослей. Эколого-географический анализ выполнен с использованием баз данных (Баринова и др., 2006; Давыдов и др., 2019). Обилие водорослей оценивали по 6-и бальной шкале (Васильева, Ремигайло, 1982), при увеличении ×400. В анализе структуры водорослевых сообществ применены индексы видового разнообразия Шеннона-Уивера, выровненности, Пиелоу, Симпсона, Шелдона и Бергера-Паркера (Песенко, 1982), расчет индексов выполнен с помощью программы Excel. Оценка сходства видового состава альгоценозов выполнена с помощью программного модуля «Graphs» (Новаковский, 2004) на основе коэффициента Съеренсена-Чекановского.

Химический анализ проб воды и донных отложений выполнен по метрологически аттестованным методикам в экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (аттестат аккредитации РОСС RU.0001.511257). Выполнена оценка загрязненности вод и донных отложений по коэффициентам донной аккумуляции (КДА) – соотношению концентрации загрязняющего вещества в донных отложениях к его концентрации в воде (Методические указания…, 2014), отобранной одновременно в этом же створе. Величины КДА, равные $n\times10$ (где n = от 1 до 9) при низких концентрациях загрязняющих веществ в воде и донных отложениях характеризуют обстановку в водном объекте как относительно удовлетворительную. Значения КДА до $n\times10^2$ и повышенные концентрации загрязняющих веществ в воде указывают на поступление в водный объект свежего загрязнения. Значения КДА, равные от $n\times10^3$ до $n\times10^4$, свидетельствуют о высоком уровне хронического загрязнения водного объекта. На основании КДА, свидетельствующих о наличии свежих и хронических загрязнений, определяют специфические загрязняющие вещества в сточных водах и предполагаемый источник загрязнения.

Статистический анализ по выявлению влияния химических показателей на состав водорослей выполнен методом канонического анализа соответствий (Canonical Correspondence Analysis - CCA, предикторами модели служили показатели химического состава вод), а также программ Statistica 13.0 (StatSoft, США), R (версия 3.5.1) и Excel надстройки – ExStatR (Новаковский, 2016).

Глава 4. Трансформация водных объектов в бассейне реки Кара в зоне влияния магистрального газопровода

Гидрохимические показатели исследованных водных объектов находятся преимущественно в пределах природной нормы. Установлено, что в условиях воздействия газопровода лотические системы трансформируются в меньшей степени, чем лентические.

Статистический анализ показал достоверное изменение ряда изученных параметров водной среды в зоне воздействия газопровода на водоемы (рисунок 2).

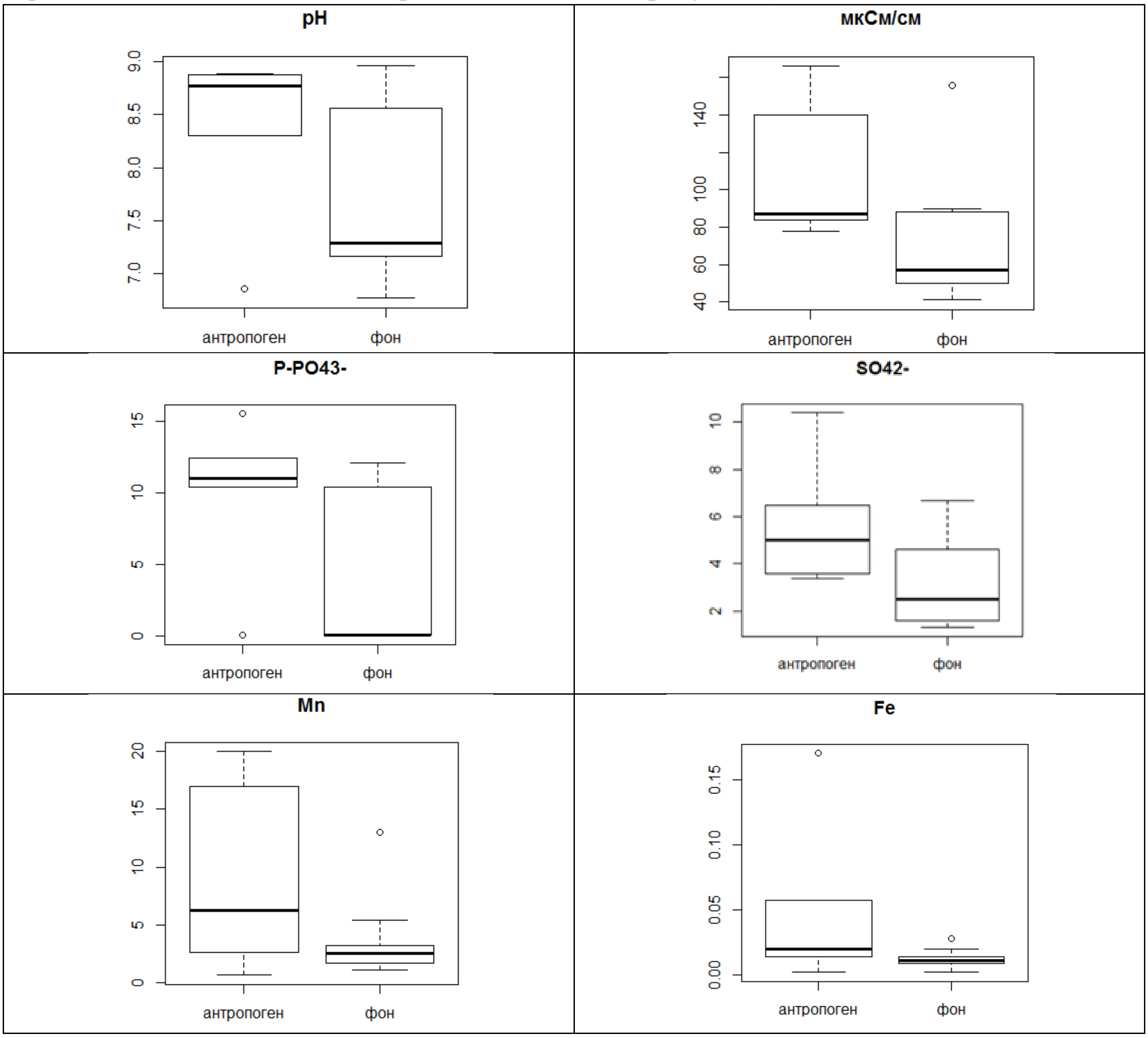


Рисунок 2. Парное сравнение гидрохимических показателей для фоновых и антропогенно трансформированных водоемов с использованием непараметрического рангового критерия Манна-Уитни (при $p<0,05$). (параметры, для которых значения в антропогенных водоемах выше по сравнению с фоном)

Загрязнение территории выхлопными газами автотранспорта, обслуживающего газопровод, и в следствие перевыпаса оленей (в результате изъятия территорий) приводит к увеличению концентрации в водоемах $N_{общ}$, NH_4^+, NO_3^-, $C_{неорг}$, $C_{орг}$. Наиболее загрязнёнными из обследованных водных объектов по всем гидрохимическим показателям являются озёра Коматы и № 1. Для них также выявлено высокое содержание нефтепродуктов: в оз. № 1 – 0,014, оз. Коматы – 0,011 мг/дм^3 (в остальных – менее 0,0050 мг/дм^3) и Fe: 0,17 и 0,057 мг/дм^3 в воде, соответственно (в первом достигает значения 1.7 ПДК$_{рыбохоз}$), при фоновом значении 0,002–0,028 мг/дм^3, что может быть признаком антропогенного загрязнения Fe от объектов газопровода. Содержание тяжелых металлов в остальных пробах воды не превышало установленные гигиенические уровни. Признаки загрязнения проявляются при сопоставлении данных химического анализа природной поверхностной воды и донных отложений. Отмечено повышенное содержание нефтепродуктов, Zn, Cu, Fe, Hg и других тяжёлых металлов, поступающих в водоёмы при аэротехногенном воздействии объектов газопровода и смыве поллютантов с прилегающей территории. Коэффициенты донной аккумуляции (КДА) (таблица 1) показали высокий уровень хронического загрязнения большинства обследованных водных объектов Hg (КДА>5200), для оз. Коматы и импактной зоны р. Кара КДА<1000 свидетельствует о свежем поступлении этого поллютанта. Для импактных участков рек зарегистрирован высокий уровень хронического загрязнения нефтепродуктами, для озёр № 1 и Коматы – наличие их свежего поступления.

Таблица 1. **Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в воде и донных отложениях исследованных водных объектов**

	Cu, мг/кг	Pb, мг/кг	Cd, мг/кг	Zn, мг/кг	Ni, мг/кг	Co, мг/кг	Cr, мг/кг	As, мг/кг	Hg, мкг/кг	НП, мг/кг
Термокарстовое оз. № 1 (воздействие дороги и компрессорной станции)										
Вода	1.7	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	1.8	<0.010	0.014
д/о	12.0	5.6	1.3	33	21	6.1	16	14	46	27
КДА	7.06	>2.8	>6.5	>13.2	>42	>12.2	>32	7.78	>4600	192.86
оз. Коматы (воздействие дороги)										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	0.7	<0.50	<0.50	<0.50	<0.010	0.011
д/о	4.2	1.2	0.21	25	11	5.2	12.5	1.7	6	6.3
КДА	>4.2	>0.6	>1.05	>10	15.7	>10.4	>25	>3.4	>600	572.73
р. Нярма, выше моста										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.010	0.022
д/о	8.1	3.5	0.53	34	14	6.7	16	4.7	23	7
КДА	>8.1	>1.75	>2.65	>13.6	>28	>13.4	>32	>9.4	>2300	318.18
р. Нярма, ниже моста (воздействие дороги)										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	0.67	<0.010	<0.0050
д/о	250	47	0.9	1800	31	10	40	9	52	29
КДА	>250	>23.5	>4.5	>720	>62	>20	>80	13.43	>5200	>5800
р. Большой Лядгей, выше моста										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	0.67	<0.010	<0.0050
д/о	6.5	2.0	0.46	40	14	6.9	19	3.7	10	5.1
КДА	>6.5	>1	>2.3	>16	>28	>13.8	>38	5.5	>1000	>1020
р. Большой Лядгей, ниже моста (воздействие дороги)										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	0.59	<0.010	0.010
д/о	19	5.3	0.54	190	16	8	22	4.5	13	14
КДА	>19	>2.65	>2.7	>380	>32	>16	>44	7.63	>1300	1400
р. Кара, выше моста										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	0.9	<0.010	н/а
д/о	5.1	2.1	0.38	28	14	6.1	13.5	3.9	11	7
КДА	>5.1	>1.05	>1.9	>11.2	>28	>12.2	>27	4.3	>1100	-
р. Кара, ниже моста (воздействие дороги)										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	0.9	<0.010	<0.0050
д/о	8.3	1.8	0.6	43	22	9	19	4.8	9	5.8
КДА	>8.3	>0.9	>3	>17.2	>44	>18	>38	5.3	>900	>1160
оз. Манясейто										
Вода	<1.0	<2.0	<0.20	<2.5	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.010	н/а
д/о	5.1	3.8	0.31	29	12	3.9	11.8	3.0	20	<5.0
КДА	>5.1	>1.9	>1.55	>11.6	>24	>7.8	>23.6	>6	>2000	-

Примечание: д/о – донные отложения: н/а – не анализировали

Среди специфических загрязнителей придорожного пространства, поступающих в текущем времени, также отмечены Zn и Cu (таблица 1). В отношении этих элементов на основании КДА можно сделать вывод о возможном формировании зон техногенных геохимических аномалий: содержание Cu в воде обследованных водоёмов отмечено на уровне 0,22–2,1 мкг/дм^3, а в донных отложениях р. Нярма концентрация Cu на фоновом участке составила 8,1, в зоне загрязнения – 250 мг/кг. Аналогично, экстремально высокие значения отмечены также для Zn в донных отложениях на загрязнённых участках рек: 190 – в р. Б. Лядгей, 1800 мг/кг – в р. Кара (при этом в верхних створах этих рек – соответственно 40 и 34, что сопоставимо со средним значением для фоновых участков других водоемов – 31,6 мг/кг). Для остальных химических элементов отмечены КДА, характеризующие обстановку в водном объекте как удовлетворительную. Таким образом, в настоящее время водные экосистемы справляются с воздействием газопровода, о чем свидетельствуют результаты гидрохимического анализа, при этом отмечено накопление техногенных загрязнений в донных отложениях. В большей степени аккумулируются Hg, нефтепродукты, Cu и Zn – специфические загрязнители от автотранспорта.

Увеличение интегральных показателей содержания органических веществ (цветности, $N_{общ.}$, $C_{общ.}$) в водоемах в зоне загрязнения, а также накопление поллютантов (Fe, Hg, Zn, Cu, As) сказывается на уровне сапробности и изменяет качество вод, что отражается на видовом составе и структуре альгоценозов.

Глава 5. Структура водорослевых сообществ и оценка экологического состояния исследованных водных объектов

Таксономический анализ. Выявлено 206 видов (в том числе внутривидовых форм, без учета диатомовых), включающих представителей 87 родов из 46 семейств, 7 отделов (рисунок 2, таблица 2). В тех же водных объектах отмечено 178 видов диатомовых с разновидностями и формами из 62 родов, 27 семейств (Стенина, 2015). Основу флоры водных объектов исследованного района составляют представители отделов Bacillariophyta, Cyanoprokaryota, Streptophyta, Chlorophyta (таблица 2). Доминирующими семействами из исследованных нами групп водорослей (без учета диатомовых) являются *Desmidiaceae* (46), *Scenedesmaceae* (16), *Nostocaceae* (14), *Aphanizomenonaceae*, *Closteriaceae*, *Selenastraceae* (по 9), *Merismopediaceae* (8 видов), что согласуется с результатами других авторов (Альгофлора…, 1994; Биоразнообразие…, 2007).

В водорослевых сообществах обследованных водных объектов по числу видов (без учета диатомовых) преобладают представители родов *Cosmarium*, *Scenedesmus* s. l., *Staurastrum*, *Closterium* (таблица 3). 12 ведущих по видовому разнообразию родов объединяют 108 (52 %) выявленных видов. Наибольшей встречаемостью в обследованных водных объектах характеризуются *Pediastrum boryanum* (33,32 %), *Spirogyra* sp. (29,40 %), *Cosmarium formosulum* (27,44 %), *Tribonema minus* (25,48 %), *Dolichospermum flosaquae* (23,54 %), *Nostoc caeruleum* и *N. paludosum* (по 21,56 %), *Closterium leibleinii*, *Cosmarium botrytis*, *Staurastrum gracile* (по 19,6 %), *Chaetophoropsis elegans, Cosmarium reniforme*, *Pediastrum duplex* (по 17,64 %), *Acutodesmus acutiformis*, *S. ellipticus*, *S. communis*, *Messastrum gracile*, *Ulothrix zonata* (по 15,68 % от общего числа проб). Основу доминирующих комплексов формируют представители родов *Dolichospermum, Cosmarium, Anabaena, Tetraspora, Nostoc, Dinobryon* характерные для летнего фитопланктона всех обследованных водоемов.

Реки и озера Большеземельской тундры и Полярного Урала проявляют широкий спектр условий для развития водорослей, соответственно в значительной степени варьирует видовое разнообразие их альгоценозов, что отражается в невысоких коэффициентах сходства. Дендрограмма (рисунок 3) отображает в целом различие видового состава водорослей для рек и озёр района исследований. В правой части дендрита сходства сгруппировались альгоценозы озёр, отдельную ветвь формируют сообщества рек.

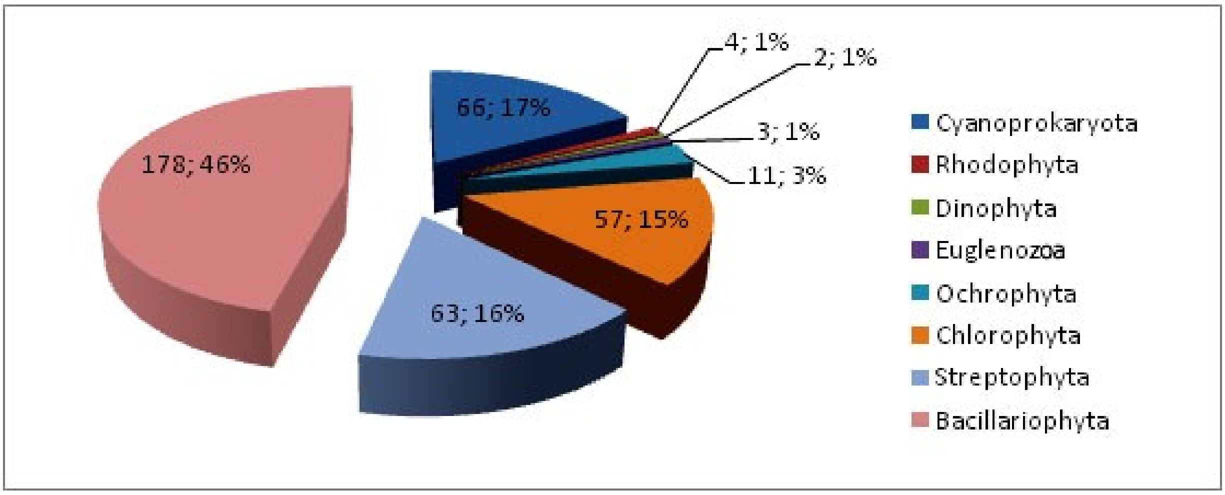


Рисунок 2. Таксономическая структура альгоценозов водных объектов в обследованном районе

Примечание: указаны число видов и форм водорослей в отделах, а также их доля от общего количества (для диатомовых – по данным А.С. Стениной).

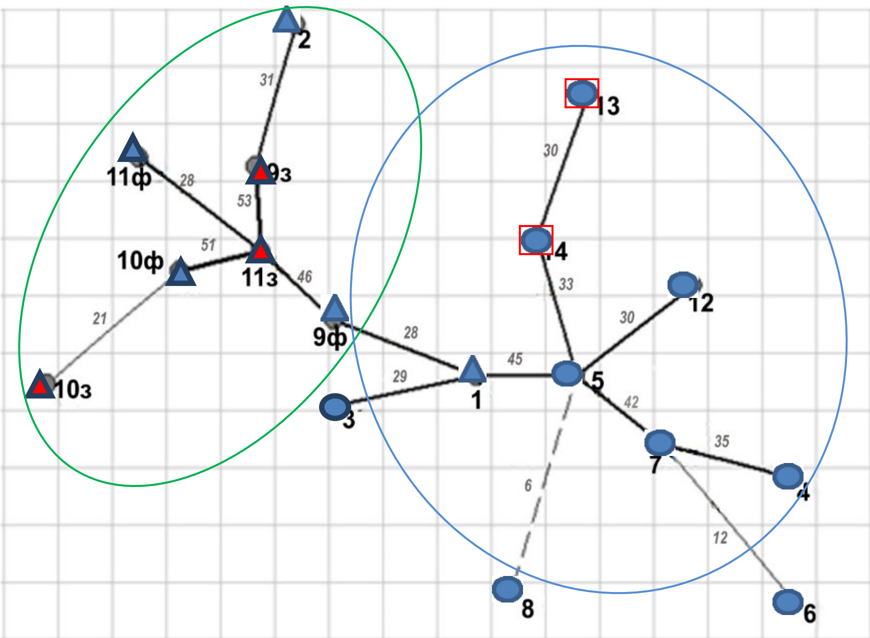


Рисунок 3. Дендрит сходства видового состава альгоценозов обследованных водных объектов (без учета диатомовых) на основе качественного коэффициента Съеренсена-Чекановского (K_{sc})

Условные обозначения: 1 – р. Силова-Яха, 2 – р. Хальмеръю, 3 – оз. Хальмерты, 4 – оз. Круглое, 5 – оз. Тройное, 6 – оз. № 3, 7 – оз. № 4, 8 – оз. № 5, 9з – р. Кара, ниже моста, 9ф – р. Кара, выше моста, 10з – р. Нярма, ниже моста, 10ф – р. Нярма, выше моста, 11з – р. Б. Лядгей, ниже моста, 11ф – р. Б. Лядгей, выше моста, 12 - оз. Б. Манясейто, 13 – оз. Коматы, 14 – оз. № 1. На ребрах графа отмечены значения K_{sc}. Реки отмечены треугольниками (включены в зеленый овал), озера – кругами (включены в синий овал).

Флористический состав водорослевых группировок отображает природные особенности исследованных водоемов: заболоченные водосборы, холодные воды с низкой минерализацией, бедный ионный состав, невысокое содержание биогенных элементов и органических веществ.

Таблица 2. **Систематическая структура альгофлор водных объектов бассейна реки Кара (за исключением диатомовых)**

Обследованные водные объекты	Отделы, число видов водорослей							
	Cyanoprokaryota	Rhodophyta	Dinophyta	Euglenozoa	Ochrophyta	Chlorophyta	Streptophyta	Всего
все водные объекты	66	4	2	3	11	57	63	206
р. Силова-Яха	24	3	0	0	3	17	20	67
р. Хальмеръю	3	0	0	0	2	5	7	17
оз. Хальмерты	13	2	1	0	0	6	6	28
оз. Круглое	9	0	1	0	0	13	17	40
оз. Тройное	16	0	0	0	2	24	19	61
оз. № 3	4	0	0	0	0	0	0	4
оз. № 4	3	0	0	0	0	10	15	28
оз. № 5	2	0	0	0	0	0	0	2
р. Кара (фон)	8	1	0	0	0	13	10	32
р. Кара (импакт)	2	0	0	0	0	5	8	15
р. Б. Лядгей (фон)	3	0	0	0	1	2	0	6
р. Б. Лядгей (импакт)	4	0	0	0	0	8	3	15
р. Нярма (фон)	2	0	0	0	0	6	4	12
р. Нярма (импакт)	2	2	0	0	0	3	0	7
оз. Б. Манясейто	17	0	0	0	8	10	30	65
оз. Коматы	11	0	0	3	1	6	11	32
оз. № 1	10	0	0	1	0	22	8	41

Таблица 3. **Ведущие роды в водорослевых сообществах обследованных водных объектов (за исключением диатомовых)**

Род	Число видов	Ранг
Cosmarium	25	1
Staurastrum	14	2
Scenedesmus s.l.	11	3
Closterium	9	4
Anabaena	8	5
Nostoc	7	6

Род	Число видов	Ранг
Dolichospermum	6	7-8
Monoraphidium	6	7-8
Dinobryon	5	9-10
Spirogyra	5	9-10
Другие роды (76)	110	-

Эколого-географический анализ. В структуре альгофлоры обследованных водных объектов по географическому распространению преобладают космополиты (89 %), доля других групп составляет: 7 % – арктобореальные виды, по 3 % арктомонтанные и бореальные виды, 1 % – арктические виды водорослей. Полученные результаты соответствуют данным других авторов (Альгофлора…, 1994).

По географическим характеристикам треть водорослей обследованных водных объектов относятся к видам с космополитным (19 %) и голарктическим (13 %) ареалами, также отмечены циркумполярные, биполярные, европейские, евроазиатские и палеотропические виды. Таким образом, основу альгоценозов формируют экологически толерантные виды, с широкой экологической амплитудой, что обусловлено природными особенностями водных объектов. По отношению к кислотности водной среды преобладают виды-индифференты. По галобности преобладают олигогалобы-индиффиренты (75%), что характерно для низкоминерализованных вод. Олигосапробные виды составляют 13%. В исследованных водных объектах преобладают β-мезосапробы (33 %), значительна доля о–β, (β–о)-мезосапробов (20%) и о-α-мезосапробов (16 %), что является зональным признаком в связи с большой заболоченностью территории водосбора рек Большеземельской тундры.

Показатели биологического разнообразия сообществ водорослей представлены в таблице 4. Полученные индексы видового разнообразия, как для фоновых, так и загрязненных водоемов указывают на невысокое разнообразие сообществ водорослей в целом для исследованного региона, что объяснимо суровостью климатических условий и бедностью вод биогенными элементами. При этом показатели большинства индексов для исследованных водотоков и озер в фоновых и антропогенно загрязненных условиях также имеют различия.

Для водотоков наиболее низкие показатели равномерности распределения видов и бóльшая степень доминирования отдельных видов отмечены в условиях загрязнения (таблица 4), для озер такая тенденция не прослеживается. По индексам видно, что сообщества фитопланктона рек в фоновых условиях более выровненным, и бета-разнообразие увеличивается и снижается степень доминирования. Уменьшение разнообразия фитопланктонных сообществ в условиях воздействия объектов газопровода показывают также индексы Бергера-Паркера и Шелдона. Сравнение выровненности сообществ по индексам Пиелоу, Шелдона не показало заметных различий структурного разнообразия.

Таблица 4. **Распределение значений индексов разнообразия водорослей для исследованных водотоков и озер**

Индексы	Реки								Озера							
	р. Кара (фон. участок)	р. Кара (импакт. участок)	р. Б. Лядгей (фон. участок)	р. Б. Лядгей (импакт. участок)	р. Нярма (фон. участок)	р. Нярма (импакт. участок)	р. Силова-Яха	р. Хальмерью	оз. Б. Манясейто	оз. Коматы	оз. Хальмерты	оз. Тройное	оз. № 3	оз. Круглое	оз. № 4	оз. №1
Шеннона-Уивера, H	1,39	1,05	0,78	1,07	0,95	0,74	1,76	1,11	1,71	1,40	1,35	1,69	0,65	1,54	1,35	1,52
Выровненность, E	0,92	0,89	0,92	0,91	0,88	0,87	0,96	0,91	0,94	0,93	0,93	0,95	0,93	0,95	0,92	0,94
Бергера-Паркера d	0,08	0,18	0,21	0,15	0,24	0,42	0,04	0,16	0,05	0,09	0,09	0,05	0,31	0,08	0,11	0,08

Наблюдается изменение структуры водорослевых сообществ исследованных водоемов, которое проявляется в показателях видового разнообразия (при небольшом уровне загрязнения происходит увеличение числа видов водорослей, при большей степени антропогенного воздействия – уменьшение видового разнообразия), перераспределении представленности по числу видов ведущих отделов водорослей (выпадение из альгоценозов одних, и появление новых таксонов), трансформации экологической структуры альгоценозов (увеличение доли индикаторов сапробности вод, изменение соотношения индикаторных групп водорослей), увеличение доли r-стратегов (рисунок 4).

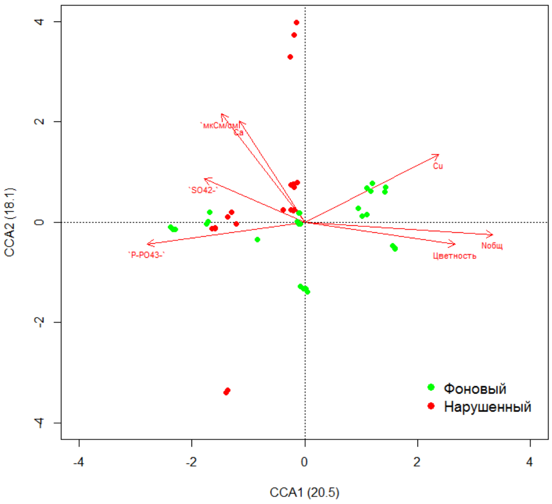
Увеличение уровня загрязнения от объектов магистрального газопровода

Обследованные водные объекты	Изменения видового разнообразия, структуры альгоценозов и химических показателей воды и донных отложений
	Начальная (небольшая) степень загрязнения
р. Б. Лядгей	➢ видовое разнообразие ↑, в основном за счет зеленых водорослей (фоновый участок – 6, импактный – 15 видов): привнос биогенных элементов (в составе загрязняющих веществ) для низкоминерализованных вод отказывает стимулирующее воздействие на водоросли; ➢ Изменение структуры: ↑ число β-мезосапробов, появляются экологически пластичные виды – o–β, (β–o)-мезосапробы (по сравнению с фоновым участком этой реки); ➢ преобладание по числу видов представителей отделов Cyanoprokaryota, Streptophyta и Chlorophyta, что соответствует природной норме данного района; ➢ На загрязненном участке – ↑ доли r-стратегов, стимуляция размножения *Scenedesmus communis* с образованием его мелких форм (эффект от токсического загрязнения объектами газопровода); ➢ Химические показатели: формирование зон техногенных геохимических аномалий по содержанию Zn в д/о импактной зоны реки; ➢ высокий уровень хронического загрязнения НП (ниже моста).
	Средняя степень загрязнения
р. Кара	➢ видовое разнообразие ↓ (фон – 32, импакт – 15 видов); ➢ Изменение структуры: ↓ доля Cyanoprokaryota и Chlorophyta; ↓ доля (χ–o, o–χ, χ–β)-сапробов, при этом исчезают o–β, (β–o)-мезосапробы ➢ Химические показатели: свежее поступление Hg; высокий уровень хронического загрязнения НП в импактной зоне реки;
р. Нярма	➢ видовое разнообразие ↓ (фон – 12, импакт – 7 видов); ➢ Изменение структуры: исчезают Streptophyta, вдвое ↓ число видов Chlorophyta; из спектра исчезают o–α-мезосапробы, β–α-, (α–β)-мезосапробы ➢ признаки антропогенного подщелачивания водного объекта (алкалифил *Audouinella chalybaea* выступает в роли доминанта в импактной зоне р. Нярма); ➢ Химические показатели: формирование зон техногенных геохимических аномалий по содержанию Cu, Zn в д/о импактной зоны реки; ➢ высокий уровень хронического загрязнения НП (ниже моста)
	Сильное загрязнение
оз. Коматы	➢ видовое разнообразие ↓ (по сравнению с фон. горн. озером) ➢ Изменение структуры: значительное участие представителей Chlorophyta, на втором месте – Cyanoprokaryota, при этом значительно ↓ число видов из отдела Streptophyta, который широко представлен в фоновых водоёмах данного района; отмечено развитие в водорослевых сообществах видов из отдела Euglenophyta (не характерен для фоновых водоёмов района исследований) ➢ с высокой встречаемостью отмечены ацидофилы *Aphanocapsa grevillei* и *Closterium tumidulum* ➢ Химические показатели: ↑ интегральных показателей содержания органических веществ (цветности, $N_{общ.}$, $C_{общ.}$); ↑ НП; ↑ Fe в воде; свежее поступление Hg, НП
термокарстовое оз. № 1	➢ Изменение структуры: значительное участие представителей Cyanoprokaryota, и Chlorophyta, сильно ↓ число видов из отдела Streptophyta. ➢ ↑ доли r-стратегов, стимуляция размножения *Scenedesmus communis* с образованием его мелких форм ➢ Химические показатели: ↑ интегральных показателей содержания органических веществ (цветности, $N_{общ.}$, $C_{общ.}$); ↑ НП; ↑ Fe в воде; свежее поступление НП

Примечание: ↑ - увеличение; ↓ - уменьшение; д/о – донные отложения; НП - нефтепродукты

Рисунок 4. Трансформация водных экосистем в зоне влияния газопровода. Степень загрязнения дана по: Методические указания…, 2014.

Изменения таксономической структуры альгоценозов в условиях строительства и эксплуатации объектов газопровода. Изменения состава и структуры альгоценозов отражают происходящие трансформации водных объектов в зоне влияния газопровода, а также степень антропогенного воздействия (рисунок 4).



Показатель	Хи-квадрат	F	P
$N_{общ}$	0,5003	5,698	<0,00
Ca	0,4047	4,609	<0,00
Электро-проводность	0,3976	4,529	<0,00
Фосфат-ионы	0,3946	4,496	<0,00
Сульфат-ионы	0,3766	4,289	<0,00
Цветность	0,3656	4,164	<0,00
Cu	0,273	3,109	<0,00

Рисунок 5. Ординация сообществ водорослей в ограничивающих факторах (предикторы - химические показатели вод исследованных водоемов) на основе канонического анализа соответствий (CCA).

Примечание: доля объяснённой дисперсии первой и второй осями ординации приведена на рисунке. Зеленые точки – сообщества водорослей фоновых водоемов, красные – загрязненных. Справа представлены результаты дисперсионного анализа построенной CCA модели по отдельным предикторам (предикторы отсортированы по уменьшению F критерия, то есть по уменьшению их значимости в результирующей модели).

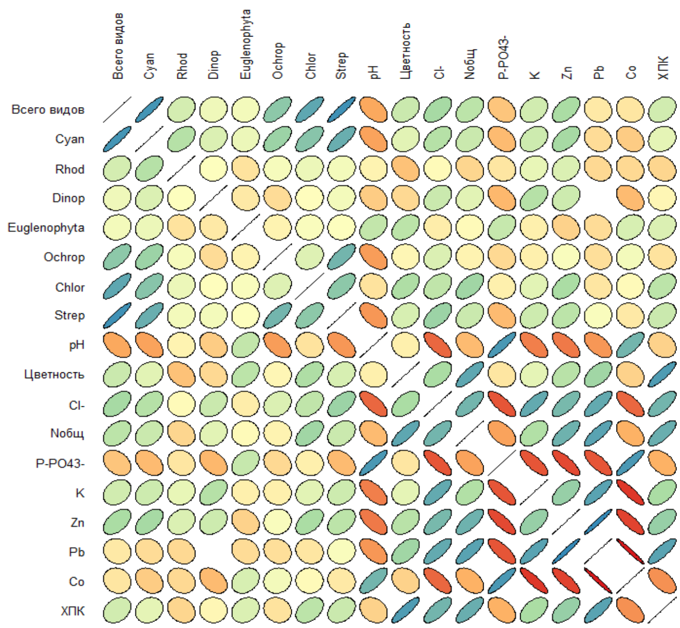


Рисунок 6. Графическое представление коэффициента корреляции Пирсона для таксономического разнообразия водорослей и гидрохимических показателей исследованных водоёмов.

Условные обозначения: в столбцах исследованные гидрохимические параметры и отделы водорослей. Синие оттенки отображают положительную корреляцию, красные и оранжевые – отрицательную. Размер эллипса показывает степень взаимного влияния показателей друг на друга: чем уже диск, тем сильнее корреляция.

С помощью CCA ординации показано, что видовой состав водорослей проявляет статистически подтвержденные различия для фоновых и загрязненных водоемов (рисунок 5).

Изменение параметров водной среды в результате антропогенного воздействия оказывает значимое влияние на таксономическую структуру альгоценозов (рисунок 6).

Значительная степень корреляции по коэффициенту Пирсона (K_{Pr}) отмечена для pH – в отношении большинства групп водорослей она отрицательная (K_{Pr} от -0,48 до -0,55, p<0,05), за исключением Euglenozoa, которые положительно реагируют на антропогенное подщелачивание вод (K_{Pr} = 0,36, p<0,1). С показателем цветности наблюдается умеренная отрицательная корреляция для представителей Rhodophyta (K_{Pr} = -0,35, p<0,1), которые наиболее требовательны к прозрачности вод и обитают в основном в чистых быстро текущих реках. Многие виды из отдела Chlorophyta являются индикаторами загрязненных вод, что отражает умеренная положительная корреляция (K_{Pr} = 0,50, p<0,05) с показателем цветности. Для остальных групп водорослей отмечена слабая положительная связь с цветностью воды (рисунок 6).

Парный корреляционный анализ числа видов различных групп с химическими показателями также выявил: значительную положительную корреляцию K_{Pr}=0.51 (p<0.05) общего количества видов в водоемах и водотоках с $N_{общ}$; тесную положительную связь K_{Pr}=0.72 (p<0.02) числа видов Euglenozoa в водоемах и водотоках с содержанием Mn; значительную положительную корреляцию K_{Pr}=0.57 (p<0.03) числа видов Streptophyta в водоемах и водотоках с содержанием Cl. С содержанием Zn выявлена положительная корреляция для подавляющего большинства водорослей, значительная связь отмечена для Cyanoprokaryota и Chlorophyta (K_{Pr}=0,54 и 0,50, p<0,05), слабая отрицательная – у представителей Euglenozoa (K_{Pr} = -0,2). Mn, Cl и Zn являются неорганическими биогенными элементами, играют важную роль в метаболизме водорослей. Существенное изменение их концентрации в водной среде может приводить к трансформации видового разнообразия – выпадению отдельных видов водорослей либо угнетению их развития.

Для отдела Euglenozoa отмечена также положительная связь с показателями цветности, ХПК, содержанием фосфат-ионов, данные условия соответствуют загрязненному оз. Коматы. Эти факторы влияют на повышение уровня сапробности водоёмов, могут вызывать антропогенное эвтрофирование и цветение воды. В отношении тяжелых металлов Pb и Co большинство таксономических групп водорослей демонстрируют отрицательные значения K_{Pr} (рисунок 6).

Учитывая, что были выявлены корреляционные связи видового состава водорослей с изученными гидрохимическими параметрами среды уже при относительно невысоких уровнях загрязнения вод (таблица 1), с применением метода экологического моделирования можно прогнозировать значимые изменения структуры альгоценозов и в целом перестройку водных экосистем. Множественный линейный регрессионный анализ выявил определенную связь для Cyanoprokaryota и Chlorophyta с химическими показателями воды, которую можно описать следующими моделями:

$N_{Cyano}=47{,}78 + 4{,}25 \times N_{общ} - 4{,}12 \times Na - 4{,}50 \times pH + 57{,}89 \times Fe - 63{,}59 \times P_{общ}$,

где N_{Cyano} – число видов Cyanoprokaryota;

$N_{Chlor}=3{,}04 + 9{,}69 \times N_{общ} + 84{,}2 \times Fe$, где N_{Chlor} – число видов Chlorophyta.

В модели все коэффициенты при химических показателях и свободный член уравнения в каждой из них статистически значимы. На видовое разнообразие отдела Cyanoprokaryota наиболее сильное положительное влияние оказывает концентрация в воде Fe и отрицательное – содержание $P_{общ}$. На число видов Chlorophyta сильное положительное влияние оказывает также содержание в воде Fe и в меньшей степени – $N_{общ}$.

Из исследованных групп водорослей сходное отношение к экологическим факторам проявляют Cyanoprokaryota, Chlorophyta и Streptophyta (рисунок 6), которые формируют основу альгофлоры района Большеземельской тундры и Полярного Урала, такое соотношение условий среды для них является оптимальным.

Оценка экологического состояния водоемов с использованием индикаторных групп водорослей. По результатам исследования влияния объектов магистрального газопровода на водные экосистемы, кроме трансформации структуры водорослевых сообществ в зоне загрязнения, выявлен ряд диагностических признаков состояния альгоценозов, свидетельствующих о наличии антропогенного стресса. В частности, установлено, что развитие как доминанта и субдоминанта *Scenedesmus communis* (син. *Scenedesmus quadricauda*) с образованием его мелких форм (с размерами клеток 5 – 15 мкм) является эффектом от токсического загрязнения объектами газопровода (отмечено в импактной зоне р. Б. Лядгей и оз. № 1). В целом в составе доминантных комплексов во многих водных объектах увеличивается доля мелких форм водорослей (r-стратегов). Диагностическим признаком антропогенного эвтрофирования являются доминирование мелкоклеточных видов *Microcystis flos-aquae* и *Snowella lacustris* (наблюдали в фоновом оз. Тройное, загрязненном в результате оленеводства).

Выявлены виды-индикаторы: с высокой встречаемостью отмечены алкалифилы *Audouinella chalybaea* и *Chantransia sp*. (доминируют в импактной зоне рек). Эти водоросли при массовом развитии могут свидетельствовать об антропогенном подщелачивании водных объектов относительно ненарушенных природных аналогов. Среди ацидофилов отмечены *Aphanocapsa grevillei* в оз. Коматы, испытывающем значительное антропогенное загрязнение от компрессорной станции газопровода, и *Closterium tumidulum*, который не достигает массового развития, но является видом с высокой встречаемостью в загрязненных водных объектах. Индикатором значительного и постоянного воздействия объектов инфраструктуры (бытовые стоки компрессорных станций) является развитие в водорослевых сообществах оз. Коматы 3 видов из отдела Euglenozoa, не характерных для чистых водоёмов Большеземельской тундры и Полярного Урала. В импактной зоне объектов газопровода также часто встречаются *Cosmarium botrytis*, *C. formosulum*, *Euastrum bidentatum*, *Closterium ehrenbergii* – типичные представители реофильного комплекса, обитающие в затронутых деятельностью человека водоёмах. Напротив, показателем чистоты вод является массовое развитие олигосапроба *Staurastrum muticum* и олигогалоба-галофоба *Cosmarium reniforme* (отмечено в оз. Манясейто).

В импактной зоне рек отмечено изменение соотношения индикаторов уровня сапробности (рисунок 7), на загрязнённых участках при сохранении ведущей роли β-мезосапробов увеличивается участие o-α-мезосапробов, уменьшается – (χ-o, o-χ, χ-β)-сапробов и o-β, (β-o)-мезосапробов.

Для фонового района (бас. р. Силова-Яха), где отсутствует влияние газопровода, отмечены находки редких видов, занесенных в Красные книги Республики Коми и Ненецкого автономного округа: *Nostoc pruniforme*, *Batrachospermum gelatinosum, Lemanea borealis, Tolypella canadensis,* а также золотистая водоросль *Hydrurus foetidus*, которая занесена во многие региональные Красные книги, что свидетельствует о ценности данной территории, по результатам настоящего исследования она рекомендована для организации комплексного заказника регионального значения.

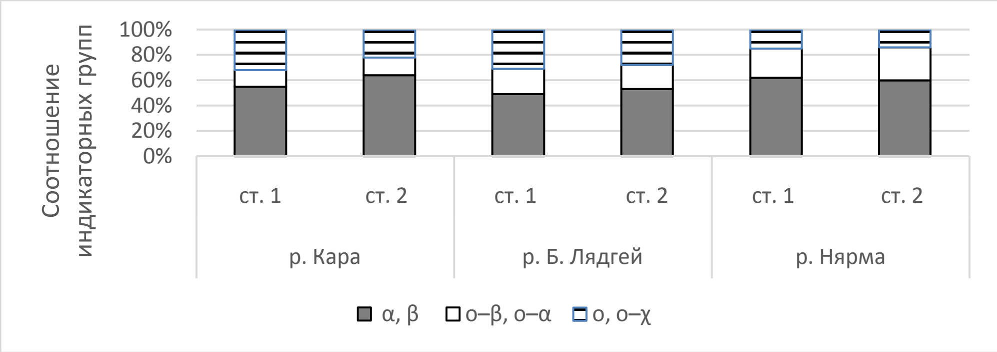


Рисунок 7. Соотношение индикаторных групп водорослей на фоновых и импактных участках рек

Условные обозначения: α – альфамезосапробы, α-β – альфа-бетамезосапробы, β – бетамезосапробы, о – олигосапробы, о-α – олиго-альфамезосапробы, о-β – олиго-бетамезасапробы, о-χ– олиго-ксеносапробы. Ст. 1 – фоновые, ст. 2 – загрязненные участки.

Адаптационные механизмы, прогноз изменений альгоценозов в зоне влияния магистрального газопровода и подходы к организации экологического мониторинга. При возрастании антропогенного загрязнения возможны следующие признаки проявления критических нагрузок: обеднение видового состава альгоценоза; выпадение из состава альгофлоры обитателей чистых вод (реофилов и катаробионтов) и других экологически специализированных видов при массовом развитии небольшого числа толерантных или эврибионтных видов; увеличение доли r-стратегов; при сильном антропогенном эвтрофировании наиболее вероятно формирование маловидовых водорослевых ассоциаций с господством нитчатых синезеленых – представителей родов *Anabaena*, *Aphanizomenon* и *Dolichospermum* «цветение» воды, вызванное их массовым развитием; увеличение доли видов из отдела Euglenozoa, не характерных для чистых водоемов Большеземельской тундры и Полярного Урала.

На основе полученных результатов альгоиндикации и химического анализа вод и донных отложений нами предложена программа экологического мониторинга состояния водных объектов в зоне влияния магистрального газопровода, которая определяет объекты наблюдений, контролируемые показатели и рекомендуемую периодичность исследований. А также предложенная программа учитывает возможные экологические риски, установленные на основании выявленных диагностических признаков состояния водных экосистем, приобретаемые факторы среды, их значимость для экосистемы в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в диссертационной работе материал обобщает исследования автора по составу и структуре водорослевых сообществ пресноводных экосистем Приполярного Урала и Большеземельской тундры в условиях воздействия нового для региона промышленного объекта – магистрального газопровода и его инфраструктурных компонентов. Проведена комплексная оценка воздействия строительства и эксплуатации магистрального газопровода на изменение состава водорослей, химических показателей вод и донных отложений типичных водных объектов в бассейне р. Кара. Статистически достоверно подтверждены корреляции между изменением химических показателей водной среды и видовым составом альгоценозов. Проведенные исследования показали, что водорослевые сообщества низкоминерализованных тундровых водных объектов реагируют увеличением видового разнообразия при начальном и среднем уровне загрязнения в зоне влияния газопровода. Снижение числа видов проявляется в сильнозагрязненных водных объектах (непроточные озера в непосредственной близости от дороги и компрессорной станции, загрязняемые осаждением пыли на водное зеркало и водосбор, а также сточными водами, сбрасываемыми в водный объект). Даже при относительно малом уровне воздействия газопровода видовой состав водорослей реагирует на изменение водной среды, что проявляется в трансформации таксономической и экологической структуры альгоценоза относительно характерных признаков водорослевых сообществ района исследования вне зоны влияния газопровода. Проведенный анализ доминантных комплексов видов каждого из исследованных озер и участков рек позволил отметить направления происходящих изменений для целей экологического мониторинга. Была реализована идея выявления диагностических признаков воздействия на водные экосистемы от нового вида загрязнения – промышленными объектами магистрального газопровода. На основе полученных данных об изменении видового состава водорослей, химических показателей воды и донных отложений разработана система экологического мониторинга для данного вида воздействия, в которой сформулированы диагностические признаки разных уровней загрязнения и предложены наблюдаемые показатели.

ВЫВОДЫ

1. Исследованные водные объекты в основном сохраняют типичный для района исследований химический состав вод (относятся к низкоминерализованным с гидрокарбонатно-кальциевым типом). Сравнительный анализ проб воды и донных отложений показывает разные уровни воздействия объектов газопровода – от «свежего» поступления загрязняющего вещества до интенсивного с хроническим уровнем загрязнения, в ряде случаев можно наблюдать формирование техногенных геохимических аномалий по химическому составу донных отложений. В зоне влияния газопровода проявляется техногенное загрязнение вод и донных отложений нефтепродуктами, ртутью, цинком, медью и другими тяжелыми металлами. Повышается концентрация соединений азота ($N_{общ}$, NH_4^+, NO_3^-), серы (SO_4^{2-}), фосфора (PO_4^{3-}) и растворенного $C_{орг}$. в воде. Наиболее загрязненными из обследованных водных объектов являются термокарстовые озёра Коматы и № 1.

2. В обследованных водных объектах в бассейне реки Кара вдоль магистрального газопровода «Бованенково-Ухта» выявлено 206 видов с внутривидовыми таксонами из 87 родов, 46 семейств, 7 отделов. Основу альгофлоры (без учета диатомовых) водных объектов исследованного района составляют представители отделов Cyanoprokaryota, Streptophyta, Chlorophyta. В водорослевых сообществах по числу видов преобладают представители родов *Cosmarium*, *Scenedesmus*, *Staurastrum*, *Closterium*. В комплексе доминантов кроме типичных для фоновых водоемов видов из родов *Dolichospermum, Anabaena, Nostoc, Dinobryon, Ulothrix, Tetraspora, Spirogyra* в зоне влияния газопровода входят также представители родов *Trachelomonas* и *Scenedesmus.*

3. Видовой состав водорослей и его изменение отображает наличие воздействия на водную среду объектов газопровода, что проявляется в изменении структуры альгоценозов относительно типичной для данного района исследований. В результате воздействия объектов магистрального газопровода наблюдается увеличение видового разнообразия при вносе дополнительных питательных элементов с последующим снижением числа видов в зоне интенсивного загрязнения, которое подтверждается химическим анализом проб воды и донных отложений. В водоемах, расположенных в зоне влияния газопровода, отмечено формирование сообществ с участием в качестве субдоминанта *Scenedesmus communis* с образованием его мелких форм, что является эффектом от токсического загрязнения объектами газопровода, а также доминирование мелкоклеточных водорослей (*Microcystis flosaquae*, *Snowella lacustris*) в зоне интенсивного оленеводства (косвенное воздействие от изъятия земель под промышленные объекты газопровода).

4. По изменению видового состава водорослей можно заключить, что при влиянии магистрального газопровода происходит постепенное повышение трофического статуса водоемов, формирование условий, приводящих к эвтрофированию за счет привноса биогенных элементов и органики с загрязненного водосбора и непосредственно при сбросе сточных вод и пылевом загрязнении зеркала водного объекта, в зоне интенсивного влияния наблюдаются признаки токсического воздействия на водные экосистемы и угнетения альгоценозов, что проявляется в снижении числа видов и упрощении структуры, участие в числе субдоминантов r-стратегов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Тикушева Л.Н.** Комплексы цианопрокариот и водорослей в зоне влияния магистрального газопровода (бассейн реки Кара) // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 1. – С. 32–37.

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК

2. Патова Е. Н. Оценка качества вод бассейна реки Силова-Яха (Большеземельская тундра) на основе анализа гидрохимических и альгологических данных / Е.Н. Патова, **Л.Н. Тикушева**, А.С. Стенина // Вода: химия и экология. – 2015. – № 4. – С. 14–20.

3. **Тикушева Л.Н.** Изменение водных экосистем под влиянием строительства и эксплуатации газопровода «Бованенково-Ухта» (бассейн реки Кара, Полярный Урал и Большеземельская тундра) / **Л.Н. Тикушева**, А.С. Стенина, Е.Н. Патова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2015. – № 2(22). – С. 25–30.

4. Изменение природных комплексов Большеземельской тундры и Полярного Урала в результате воздействия линейных сооружений газопровода «Бованенково-Ухта» / Е. Н. Патова, Е. Е. Кулюгина, А.С. Стенина, О.А. Лоскутова, **Л. . Тикушева**, В.В. Елсаков // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2016. – № 3(27). – С. 54–60.

Монографии

5. Природная среда тундры в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / Бончук А.Н., Гецен М.В., Горбачевский А.Г., Денева С.В., Дорохова М.Ф., Елсаков В.В., **Истомина Л.Н**. (**Тикушева Л.Н.**), Какунов И.Б., Кулюгина Е.Е., Макаров С.Г., Плюснин С.Н., Патова Е.Н., Рубцов А.И., Стенина А.С., Сивков М.Д., Шипунов А.П. Ред. М.В. Гецен. – Сыктывкар, 2005. – 246 с.

6. Особо охраняемые природные территории Республики Коми: итоги анализа пробелов и перспективы развития / С.В. Дегтева, Е.Ю. Изъюров, Т.Н. Пыстина, А.Н. Королев, С.К. Кочанов, И.И. Полетаева, **Л.Н. Тикушева**; ред. В.И. Пономарев. – Сыктывкар: Север, 2011. – 255 с.

7. Флоры, лихено- и микобиоты особо охраняемых ландшафтов бассейнов рек Косью и Большая Сыня (Приполярный Урал, национальный парк «Югыд ва») / С.В. Дегтева, Р. Бришкайте, Н.Н. Гончарова, Ю.А. Дубровский, А.А. Дымов, В.В. Елсаков, Е.В. Жангуров, Г.В. Железнова, В.А. Канев, Д.В. Кириллов, И.А. Кириллова, Е.Е. Кулюгина, В.А. Мартыненко, И.В. Новаковская, Л.Я. Огродовая, М.А. Паламарчук, Е.Н. Патова, И.И. Полетаева, Т.Н. Пыстина, Н.А. Семенова, А.С. Стенина, И.Н. Стерлягова, Л.В. Тетерюк, **Л.Н. Тикушева**, Я. Херманссон, Ю.Н. Шабалина, Т.П. Шубина; ред. С.В. Дегтева. – Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 483 с.

Статьи и материалы конференций в российских изданиях, индексируемые в РИНЦ

8. Комплексная оценка водных экосистем бассейна реки Кары, трансформированных в результате транспортировки углеводородов / Е.Н. Патова, А.С. Стенина, **Л.Н. Тикушева**, О. А. Лоскутова, М.Д. Сивков // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29. – № 2. – С. 30–50.

9. Гидробионты горно-долинного озера Манясейто (Полярный Урал) / О.А. Лоскутова, **Л.Н. Тикушева**, Е.Н. Патова, А.С. Стенина, О.Н. Кононова, М. . Батурина // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – № 4(206). – С. 17–25.

10. **Тикушева Л.Н.** Первые сведения о водорослях водных объектов бассейна реки Силова-яха (Большеземельская тундра) / **Л.Н. Тикушева**, Е.Н. Патова // Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: Доклады II Всероссийской конференции (3-7 июня 2013 г., г. Сыктывкар). – Сыктывкар: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2013. – С. 228–236.

11. Влияние строительства газопровода «Бованенково-Ухта» на прилегающие экосистемы Большеземельской тундры и Полярного Урала / Е.Н. Патова, Е.Е. Кулюгина, В.В. Елсаков, А.С. Стенина, О.В. Лоскутова, М.Д. Сивков, **Л.Н. Тикушева** // Освоение Севера и проблемы природовосстановления: доклады IX Всероссийской научной конференции (27-29 мая 2014 г., г. Сыктывкар). – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2014. – С. 68–75.

12. **Тикушева Л.Н.** Использование водорослей для оценки качества водной среды проектируемой особо охраняемой природной территории в районе Большеземельской тундры / **Л.Н. Тикушева**, Е.Н. Патова // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: материалы III международной научной конференции и школы для молодых ученых (25-29 августа 2014 г., п. Борок, Ярославская обл.). – Ярославль, 2014. – С. 238–239.

13. **Тикушева Л.Н.** Оценка состояния водных объектов Большеземельской тундры в районе создания особо охраняемой природной территории Республики Коми (бассейн реки Силова-Яха) / **Л.Н. Тикушева**, Е.Н. Патова // Современное состояние и перспективы развития сети особо охраняемых природных территорий Европейского Севера и Урала: тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции (23-27 ноября 2015 г., г. Сыктывкар) [Электронный ресурс]. – Сыктывкар, 2015. – С. 141–144.

14. **Тикушева Л.Н**. Оценка состояния водных объектов Большеземельской тундры в районе создания особо охраняемой природной территории Республики Коми (бассейн реки Силова-Яха) / **Л. Н. Тикушева**, Е. Н. Патова // Современное состояние и перспективы развития сети особо охраняемых природных территорий европейского Севера и Урала: материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции (23-27 ноября 2015 г., г. Сыктывкар). – Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2015. – С. 89–95.

15. **Тикушева Л.Н**. Содержание ртути в воде и донных отложениях водоемов Полярного Урала и Прилегающей части Большеземельской тундры в условиях воздействия магистрального газопровода / **Л.Н. Тикушева**, Е.Н. Патова // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Сборник трудов второго международного симпозиума (21-25 сентября 2015 г., г. Новосибирск). – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2015. – С. 336–340.

16. Комплексные исследования озер Полярного Урала / О.А. Лоскутова, В.И. Пономарев, Е.Н. Патова, А.С. Стенина, О.Н. Кононова, **Л.Н. Тикушева** // Озерные системы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды:

материалы V Международной научной конференции (12-17 сентября 2016 г., г. Минск-Нарочь). – Минск: Издательский центр БГУ, 2016. – С. 231–233.

17. Влияние строительства газопровода на состояние водных экосистем Полярного Урала / О.А. Лоскутова, Е Н. Патова, А.С. Стенина, **Л.Н. Тикушева** // Горные экосистемы и их компоненты: материалы VI Всероссийская конференция с международным участием, посвященной Году экологии в России и 100-летию заповедного дела в России (11-16 сентября 2017 г., Нальчик). – Махачкала: АЛЕФ, 2017. – С. 202–204.

18. Комплексная оценка водных экосистем бассейна реки Кары, трансформированных в результате транспортировки углеводородов / Е.Н. Патова, А.С. Стенина, **Л.Н. Тикушева**, О.А. Лоскутова, М.Д. Сивков // Тезисы Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития»: 20-22 марта 2017 г., Москва. [Электронный ресурс]. – Москва: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2017. – С. 379–380.

19. **Тикушева, Л.Н.** Изменение альгоценозов в зоне влияния магистрального газопровода (Большеземельская тундра, Полярный Урал) / **Л.Н. Тикушева**, Е.Н. Патова // Цианопрокариоты/цианобактерии: систематика, экология, распространение: материалы докладов II Международной научной школы-конференции (16-21 сентября 2019 г., Сыктывкар, Россия). – Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. – С. 268–272.