



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра прикладной и системной экологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему «Динамика показателей обилия цианобактерий в прибрежной зоне
Ладожского озера в районе Валаамского архипелага»

Исполнитель Аниканов Никита Максимович
Руководитель канд. геогр. наук,
Зуева Надежда Викторовна
Консультант канд. биол. наук
Воякина Екатерина Юрьевна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. геогр. наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Алексеев Денис Константинович
(фамилия, имя, отчество)

«1 » 06 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Литературный обзор.....	8
1.1 Биологические особенности цианобактерий.....	8
1.2 Систематика цианобактерий	11
1.3 Экологические особенности цианобактерий.....	12
1.4 Цианотоксины.....	13
1.4.1 Микроцистины	14
1.4.2 Анатоксины.....	15
1.4.3 Сакситоксины	16
1.5 Способы очистки воды от цианотоксинов	16
1.6 Способы оценки возможного токсического воздействия метаболитов цианобактерий	17
2. Характеристика района исследований	19
2.1 Физико-географическая характеристика	19
2.2 Характеристика сообществ фитопланктона	21
3. Материалы и методы исследования	23
4. Динамика гидрохимических и гидрофизических параметров.....	29
4.1 Температура воды.....	30
4.2 Содержание растворенных газов.....	36
4.3 Содержание общего органического вещества, определяемого методом перманганатной окисляемости	38
4.4 Прозрачность, цветность и мутность воды	38
4.5 Активная реакция среды (рН).....	39
4.6 Содержание биогенных элементов	39
4.7 Общие закономерности гидрохимического режима	40
5. Динамика концентрации хлорофилла «а»	42
5.1 Содержание хлорофилла «а» в поверхностном слое воды.....	42
5.2 Содержание хлорофилла «а» в интегральных пробах	45

5.3 Содержание хлорофилла «а» в Монастырской бухте	48
6. Оценка трофического статуса	50
7.Оценка концентрации хлорофилла «а» по данным спутникового зондирования..	51
8. Динамика показателей обилия цианобактерий	60
8.1 Общая характеристика таксономического состава	60
8.2 Межгодовая и пространственная динамика показателей обилия цианобактерий	61
8.3 Связь показателей обилия цианобактерий с исследуемыми параметрами...	68
9. Оценка возможного токсического воздействия метаболитов цианобактерий на исследуемой акватории.....	74
9.1 Расчётные суммарные концентрации различных структурных вариантов микроцистинов	74
9.2 Моделирование биомассы потенциально токсичных видов	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	82

ВВЕДЕНИЕ

Массовое развитие цианобактерий признано ООН одной из актуальных проблем современного мира. Активная вегетация цианобактерий сопровождается выделением токсичных метаболитов, представляющих опасность для животных и людей [1].

Цианобактериальные «цветения» наблюдаются во многих водоёмах северо-запада России, в том числе и Ладожском озере – геостратегическом водном объекте, определяющим жизнедеятельность северо-западных регионов Российской Федерации [2].

Актуальность работы. Валаамский архипелаг входит в состав ООПТ регионального значения Республики Карелия, что обуславливает его высокое природоохранное значение: 1) это зона массового залегания Ладожской нерпы, занесенной в Красную книгу Российской Федерации [3]; 2) место гнездования многих видов водных и околоводных птиц [3]; 3) участок нагула промысловых видов рыб [2]; 4) зона распространения реликтовых представителей зообентоса [2]; 4) участок Ладожского озера, отличающийся большим видовым разнообразием водной растительности [2]. Цианобактериальные «цветения», сопровождающиеся выделением токсинов, могут привести к коренным перестройкам уникальных экосистем прибрежной зоны Валаамского архипелага, что определяет особый интерес к изучению данного явления.

С развитием хозяйственной и туристской деятельности на Валаамском архипелаге всё больше возрастает запрос на безопасное водопользование. Цианобактериальные токсины представляют угрозу для здоровья человека и требуют значительных затрат на очистку воды [4], что обуславливает необходимость проведения исследования динамики показателей обилия цианобактерий и оценки опасности возможного токсического воздействия их метаболитов, таким образом, определяя высокое локальное значение данной работы.

Ввиду удалённости от крупных промышленных зон, отсутствия влияния поверхностного и речного стока материковой Карелии, большая часть акватории Ладожского озера в районе Валаамского архипелага имеет режим функционирования, близкий к фоновому [2]. Исследование распространения потенциально токсичных видов цианобактерий на данной акватории предстаёт особенно актуальным в контексте поиска альтернативного источника водоснабжения г. Санкт-Петербурга и других населенных пунктов Приладожья [2], что определяет высокое региональное значение данной работы.

Цель работы: оценить динамику показателей обилия цианобактерий в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага в 2022-2024 гг.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

Задачи:

1. Описать пространственную динамику основных гидрохимических и гидрофизических параметров;
2. Оценить динамику концентрации хлорофилла «а» по результатам натурных наблюдений и данным дистанционного зондирования;
3. Привести общую характеристику таксономического состава цианобактерий, обнаруженных в период проведения исследования;
4. Оценить динамику показателей обилия цианобактерий;
5. Проанализировать связь показателей обилия цианобактерий с основными гидрохимическими и гидрофизическими параметрами;
6. Определить возможную опасность токсического воздействия метаболитов цианобактерий на исследуемой акватории;
7. Провести моделирование биомассы потенциально токсичных видов цианобактерий.

Объектом данного исследования являются сообщества цианобактерий в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага. Предмет исследования: показатели обилия цианобактерий в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага.

Научная новизна работы связана с тем, что ранее не проводился анализ распространения потенциально токсичных видов цианобактерий в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага за период 2022-2024 гг. Также в ранее опубликованных работах не проводилась оценка развития цианобактериальных «цветений» с применением спутникового зондирования. Кроме того, в существующих исследованиях не предпринимались попытки моделирования показателей обилия цианобактерий на данной акватории. Использование статистических методов позволит выполнять прогнозы, результаты которых могут быть использованы для совершенствования текущей системы водопользования и дальнейшего устойчивого развития Валаамского архипелага.

Научная значимость. Глобальное потепление климата существенно влияет на распространение цианобактерий. С повышением температуры возрастает частота встречаемости различных видов цианобактерий, также увеличивается и скорость их роста [4]. Таким образом, исследование динамики показателей обилия цианобактерий и влияния факторов внешней среды на их сообщества предстаёт особенно актуальным в контексте глобального изменения климата, что определяет теоретическое значение данной работы.

Практическая значимость. Результаты работы могут быть использованы при оценке и прогнозировании состояния экосистем прибрежной зоны Ладожского озера в районе Валаамского архипелага, разработке рекомендаций для устойчивого развития природного парка «Валаамский архипелаг».

Апробация результатов. Основные положения работы были представлены на Ежегодной Международной научно-практической конференции LXXVII Герценовские чтения «География: развитие науки и образования» (Санкт-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 2024 г.); XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвящённой 300-летию Российской академии наук, 170-летию со дня рождения Н.А. Морозова и 130-летию со дня рождения И.Д. Папанина «Биология внутренних вод. Перспективы и проблемы современной гидробиологии» (Борок, ИБВВ РАН, 2024 г.); VI (XIV)

Международной ботанической конференции молодых учёных в Санкт-Петербурге (Санкт-Петербург, Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в сборе полевого материала, камеральной и статистической обработке полученных результатов.

Структура работы. Работа изложена на 86 страницах, состоит из введения, 9 разделов, заключения и списка литературы из 43 источника, содержит 22 таблицы и 35 рисунков.

Благодарности. Выражаю глубокую благодарность работникам и волонтёрам Учебно-научной станции «Валаам» за помошь в проведении полевых работ и в особенности научному консультанту данной работы – Воякиной Е.Ю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы удалось установить, что для исследуемой акватории характерна пространственная изменчивость ряда лимнологических параметров.

По ряду исследуемых параметров в акватории прибрежной зоны Ладожского озера в районе Валаамского архипелага выделяются бухты, в пределах которых осуществляется антропогенная деятельность – Малая Никоновская и Монастырская бухта, а также «закрытые» заливы в восточной и южной части Валаамского архипелага.

Для станций в восточной и южной части исследуемой акватории характерны наибольшие значения температур поверхностного слоя, наибольшее содержание органического вещества, определяемого методом перманганатной окисляемости, наибольшие значения цветности воды в поверхностном слое. Подобные особенности гидрохимического режима могут быть связаны с развитием высшей водной растительности, более интенсивным прогревом воды и менее выраженным волнением в данной части акватории.

В Малой Никоновской бухте отмечены наибольшие концентрации фосфатов и общего фосфора, что может быть связано с влиянием форелевого хозяйства, расположенного в бухте.

В Монастырской бухте отмечены наименьшие значения прозрачности, pH, процента насыщения воды кислородом и наибольшие значения мутности воды и концентрации углекислого газа, что обусловлено многолетним антропогенным воздействием и сбросом неочищенных коммунально-бытовых сточных вод в 2001-2006 гг.

Наибольшие концентрации хлорофилла «а» отмечены в Монастырской бухте. Учитывая особенности гидрохимического режима бухты, описанные в разделе 4, при проведении экологического мониторинга акватории Ладожского озера в районе Валаамского архипелага, акваторию Монастырской бухты рекомендуется рассматривать отдельно.

Трофический статус исследуемой акватории в целом можно охарактеризовать как слабо-мезотрофный.

По данным спутникового зондирования установлено, что в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага формируются обширные зоны «цветения» с относительно высокими концентрациями хлорофилла «а». Пятна «цветений», обнаруженные в прибрежной зоне Валаамского архипелага, имеют длину до 2,2 км и занимают площадь до 37,7 га.

В период проведения исследования в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага было обнаружено 16 таксонов цианобактерий рангом ниже рода из 7 семейств и 6 порядков. В состав видов-доминант входили потенциально токсичные *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault 1886 и виды рода *Dolichospermum* (Klebhan) Wacklin, L.Hoffmann & Komárek 2009.

Показатели обилия цианобактерий имели широкий диапазон изменчивости. Значения общей численности варьировали в диапазоне от 0,3 млн. кл./л до 10,4 млн. кл./л. Значения общей биомассы варьировали в диапазоне от 0,002 мг/л до 0,280 мг/л.

Наибольшие среднегодовые значения общей численности и биомассы цианобактерий отмечены в Дивной бухте и Тростяном заливе.

В результате расчета коэффициентов корреляции Спирмена, было установлено, что значимые коэффициенты корреляции при $p<0,05$ были обнаружены для биомассы и 5 параметров среды. С ростом температуры поверхностного слоя воды, увеличивалась биомасса цианобактерий. С ростом биомассы увеличивалась концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое и активная реакция среды (pH), снижалась прозрачность воды и содержание общего фосфора.

Расчетные суммарные концентрации различных структурных вариантов микроцистинов варьировали в диапазоне от 0,0 мкг/л до 0,7 мкг/л, в среднем составляя 0,1 мкг/л. Таким образом, полученные результаты не превышают

норматив в 1 мкг/л по микроцистину-LR, предложенный Всемирной организацией здравоохранения [5], и установленный СанПиН 1.2.3685-21.

На основе полученных данных было выполнено моделирование биомассы потенциально токсичных видов цианобактерий. Полученная модель множественной линейной регрессии отражает взаимосвязь биомассы потенциально токсичных видов, температуры поверхностного слоя и прозрачности воды. Данная модель удовлетворяет основным критериям качества и может быть использована для прогнозирования.

Согласно рекомендациям ВОЗ [5], для текущего источника водоснабжения о. Валаам (Монастырской бухты), рекомендовано проводить идентификацию видового состава цианобактерий и определять их показатели обилия для отслеживания опасных уровней вегетации в период максимального прогрева воды.