

ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА ЩУЧЬЕГО ЗАЛИВА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ ПРИОЗЕРСКОГО ЦБК

Митрукова Г. Г., Капустина Л. Л., Курашов Е. А.

DYNAMICS OF THE BACTERIOPLANKTON STATE IN THE SHCHUCHIY BAY OF LAKE LADOGA AFTER THE CLOSURE OF THE PRIOZERSKY PULP AND PAPER MILL

Mitrukova G. G., Kapustina L. L., Kurashov E. A.

Аннотация

Введение. Щучий залив расположен в западной части шхерного района Ладожского озера вблизи г. Приозерска. Залив почти 20 лет испытывал антропогенное воздействие от попадания в него неочищенных сточных вод Приозерского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК). Систематические микробиологические исследования экосистемы Щучьего залива начаты с середины 70-х годов прошлого столетия Институтом озероведения РАН и продолжились после закрытия ЦБК в 1986 г. по настоящее время. **Материалы и методы.** Подробно экосистема залива изучалась на протяжении вегетационного сезона 2013–2014 гг., периодические исследования проводились в 2015–2018 гг. Также для анализа были привлечены ретроспективные данные. Пробы воды отбирали на четырех станциях с поверхностного горизонта. Определялись следующие микробиологические показатели: общая численность бактериопланктона и процентные соотношения различных морфологических типов бактериальных клеток. **Результаты и их обсуждение.** Сравнение количественного уровня развития бактериального сообщества залива в различные временные периоды показало постепенное снижение общей численности бактериопланктона (ОЧБ) по мере ослабления антропогенного воздействия после закрытия Приозерского ЦБК с 12,40 млн кл. мл⁻¹ в 1987 г. до среднего значения 2,62±1,03 млн кл. мл⁻¹ в 2013–2018 гг. Обнаружена положительная корреляция между концентрацией бактерий и температурой воды. Процентное содержание палочковидных форм микроорганизмов в воде залива также снизилось по мере уменьшения антропогенного пресса с 73,4 % в 1987 г. до 53,1±7,6 % в 2013–2018 гг., что свидетельствовало об улучшении качества вод. **Заключение.** Стабильное снижение общего количества бактерий с уровня, характерного для сильнозагрязненных и эвтрофных водоемов, до уровня, свойственного мезотрофным и мезотрофно-эвтрофным водоемам, является надежным критерием восстановления экосистемы Щучьего залива до состояния, характерного для подобных заливов Ладожского озера.

Ключевые слова: Ладожское озеро, Щучий залив, общая численность бактериопланктона, морфотипы бактерий, трофический статус.

Abstract

Introduction. The Shchuchiy Bay is located in the western part of the skerry area of Lake Ladoga near the town of Priozersk. For almost 20 years, the bay has experienced an anthropogenic impact from the ingress of untreated wastewater from the Priozersk Pulp and Paper Mill (PPM). Systematic microbiological studies of the Shchuchiy Bay ecosystem were started in the middle of the 1970s by the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences and continued after the PPM closure in 1986. **Materials and methods.** The ecosystem of the bay was studied in detail during the growing season of 2013–2014; periodic studies were carried out in 2015–2018. Retrospective data were also used for the analysis. Water samples were taken at four stations from the surface horizon. The following microbiological indicators were determined: the abundance of bacterioplankton and the percentages of various morphological types of bacterial cells. **Results and discussion.** A comparison of the quantitative level of development of the bacterial community in the bay in different periods showed a gradual decrease in the abundance of bacterioplankton as the anthropogenic impact weakened after the closure of the Priozersky PPM from 12.40 million cells ml⁻¹ in 1987 to an average value of 2.62±1.03 million cells ml⁻¹ in 2013–2018. A positive correlation was found between the concentration of bacteria and water temperature. The percentage of rod-shaped microorganisms in the water of the bay also decreased as the anthropogenic impact weakened from 73.4 % in 1987 to 53.1±7.6 % in 2013–2018, which indicated an improvement in water quality. **Conclusion.** A stable decrease in the abundance of bacteria from the level characteristic of highly polluted and eutrophic water bodies to the level characteristic of mesotrophic and mesotrophic-eutrophic water bodies is a reliable criterion for the restoration of the ecosystem of the Shchuchiy Bay to the state characteristic of similar bays of Lake Ladoga.

Keywords: Lake Ladoga, Shchuchiy Bay, bacterioplankton abundance, morphotypes of bacteria, trophic status.

Введение

Щучий залив расположен в западной части шхерного района Ладожского озера вблизи г. Приозерска, его длина около 1 км при максимальной ширине 0,4 км, средняя глубина 2,0 м, максимальная глубина 3,6 м. Залив около 20 лет испытывал антропогенное воздействие от попадания в него сточных вод Приозерского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК). В 1968–1969 гг. неочищаемые стоки Приозерского целлюлозно-бумажного комбината, ранее попадавшие в р. Вуоксу, были направлены в водоем-отстойник (озеро Дроздово), из которого поступали в Щучий залив. Экосистема залива была практически полностью уничтожена большим количеством растворенных и взвешенных токсичных веществ, поступающих со стоками, и превратилась в «мертвую зону» [2, 17, 29]. Осенью 1986 г. ЦБК был перепрофилирован в мебельный комбинат, а позже — в завод по выпуску древесноволокнистых плит [17].

При оценке экологического состояния водных масс первостепенную роль играют организмы, активно участвующие в процессах естественного самоочищения вод, в частности, бактерии, за счет деструкционной деятельности которых происходит трансформация большей части энергии, поступающей в водные экосистемы с автохтонным и аллохтонным органическим веществом [10, 11, 28, 32]. Поэтому общая численность бактериопланктона в воде является одним из показателей чистоты вод и трофического статуса водоемов [3, 8, 19].

Первые микробиологические исследования западного побережья Ладожского озера, недалеко от Щучьего залива (около г. Приозерска), начались еще в 50-х гг. XX века. В 1957 г. общее количество бактерий в воде р. Вуоксы в районе впадения сточных вод ЦБК составляло 4,63 млн кл. мл⁻¹. Влияние стоков прослеживалось в Ладоге на значительных расстояниях от места их выхода в озеро; в 1,5 км от залива концентрация микроорганизмов была 3,87 млн кл. мл⁻¹ [13], при том что Ладожское озеро в это время было типично олиготрофным водоемом [18]. В конце 1970-х – начале 1980-х гг. величина общей численности бактериопланктона на выходе из залива (станция 8, рис. 1) варьировала в интервале 4,3–14,9 млн кл. мл⁻¹, что свидетельство-

вало о его высокоэвтрофном статусе. В это время в фоновом районе озера (станция 82, рис. 1) аналогичная величина составляла лишь 0,40–0,51 млн кл. мл⁻¹ [1; Капустина, неопубликованные данные].

После закрытия Приозерского ЦБК и его перепрофилирования в 1986 г. на фоне уменьшения антропогенного пресса наблюдалось восстановление некоторых биологических сообществ (высшей водной растительности, перифитона, фитопланктона, зоопланктона, бентоса) экосистемы залива [17], а также прослеживалось постепенное снижение общей численности бактериопланктона.

Цель настоящей работы: оценить изменения, произошедшие в бактериопланктоне Щучьего залива за 30 лет после закрытия ЦБК, и охарактеризовать его современное состояние.

Материалы и методы

Пробы воды в Щучьем заливе отбирали на четырех станциях: ст. 1 у дамбы, ст. 2 в центре залива, ст. 3 на выходе из залива, ст. 4 у берега рядом с дамбой (рис. 1), глубины станций в заливе составляли 0,8–1,8 м; 1,5–2,7 м; 2,0–3,0 м и 0,3–1,3 м соответственно в зависимости от уровня Ладожского озера. В 2013–2014 гг. была подробно изучена сезонная динамика общей численности бактерий, пробы отбирали два раза в месяц. В 2015 г. пробы отбирались только в начале июня, в 2016 г. — с июля по октябрь (раз в месяц), в 2017 г. — в середине февраля, начале июня и середине октября. В 2018 г. отбор проб производился весной и осенью (конец мая и сентября). Пробы отбирали с поверхностного горизонта воды и фиксировали 40 %-ным формалином до конечной концентрации 2 % [12, 21].

Для анализа также были привлечены ретроспективные данные. Определялись следующие микробиологические показатели: общая численность бактериопланктона и процентные соотношения различных морфологических типов бактериальных клеток, величины которых косвенно свидетельствуют о качестве вод [6, 7]. Общее количество бактерий подсчитывали под люминесцентным микроскопом МИКМЕД-2.16 с использованием флюорохрома акридина оранжевого [25] на темных трековых мембранах с диаметром пор 0,20 мкм. Температура воды и концентрация хлорофилла «а» (мкг/л) в воде измерялись с по-

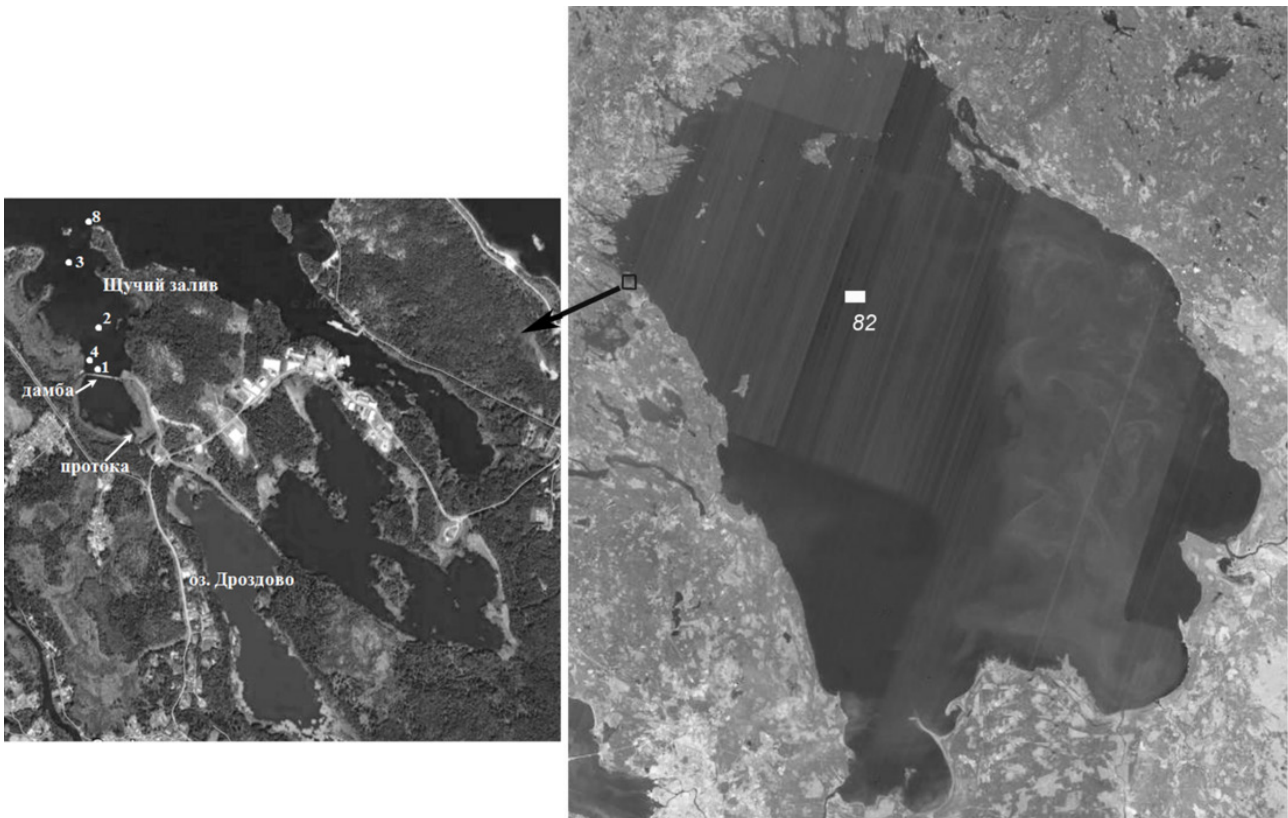


Рис. 1. Схема расположения станций в Щучьем заливе и Ладожском озере (с использованием картографических материалов <https://www.google.ru/maps/> и <https://yandex.ru/maps/>)

мощью автоматического многопараметрического зонда YSI 6600 V2-4.

Полученные результаты обрабатывали методами математической статистики с использованием программы STATISTICA 10.

Результаты и обсуждение

После закрытия Приозерского ЦБК в 1986 г. количество бактерий постепенно снижалось с 12,40 млн кл. мл⁻¹ в 1987 г. до 2,90 млн кл. мл⁻¹ (ср. по четырем станциям) в 1997 г., а в 2013–2018 гг. среднее значение ОЧБ по четырем станциям было $2,62 \pm 1,03$ млн кл. мл⁻¹ (рис. 2). В центральной части Ладожского озера (ст. 82, рис. 1) среднее значение ОЧБ в 2013, 2016–2018 гг. было незначительно ниже и составляло $2,10 \pm 1,00$ млн кл. мл⁻¹. Процентное содержание палочковидных форм микроорганизмов в воде залива также уменьшилось с 72,3 и 73,4 % в 1983 и 1987 г. соответственно [5] до $53,1 \pm 7,6$ % в 2013–2018 гг. (средние значения по четырем станциям), что является косвенным показателем снижения антропогенного воздействия на водоем

[6, 7]. Для сравнения — аналогичная величина для центральной глубоководной части Ладожского озера (ст. 82, рис. 1) для периода 2016–2018 гг. составляла $39,9 \pm 10,8$ %.

Данные по Щучьему заливу согласуются с результатами многолетних исследований в районе деятельности Байкальского ЦБК и в районе, не подверженном антропогенному воздействию, где степень бактериологического загрязнения была в 10–12 раз меньше, чем в местах сброса сточных вод ЦБК [22, 30]. В аналогичных исследованиях на Онежском озере также отмечалась тенденция уменьшения численности бактериопланктона при снижении антропогенного пресса в период спада производства на Кондопожском ЦБК в начале 1990-х гг., тогда как при последующем наращивании производственных мощностей комбината в начале 2000-х гг. вновь отмечалось повышение концентрации микроорганизмов в воде [31].

Количественный уровень бактериопланктона обычно коррелирует с различными физико-хи-

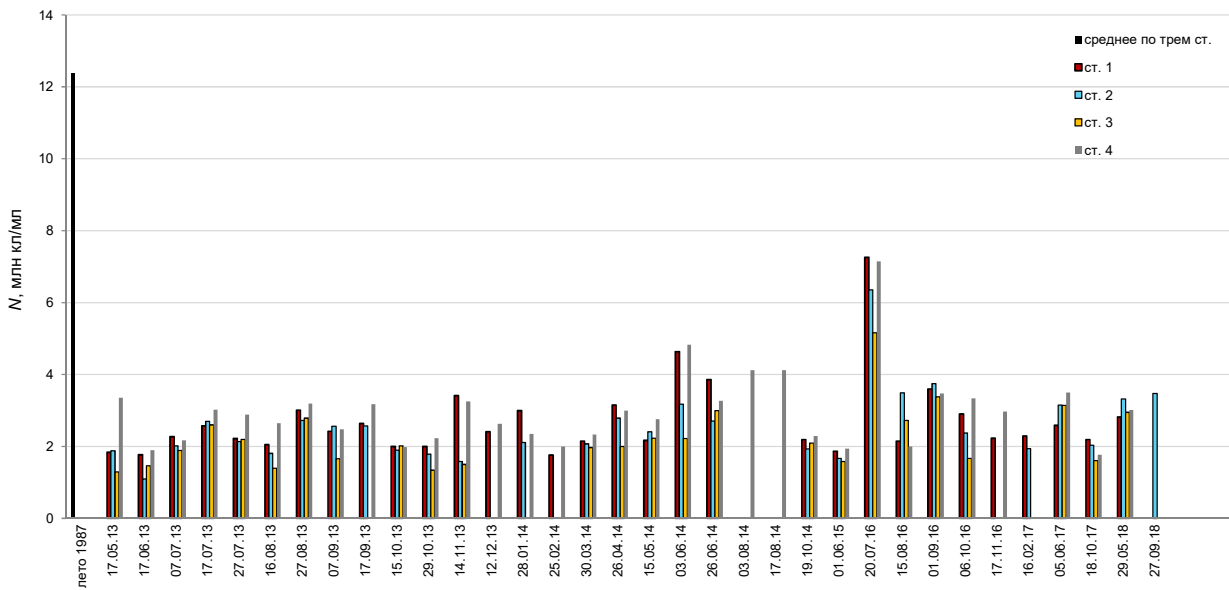


Рис. 2. Общая численность бактериопланктона (N) в Щучьем заливе Ладожского озера в 1987 г. и в 2013–2018 гг.

мическими параметрами водоема и в том числе зависит от концентрации фосфора в воде [23]. Эта зависимость четко проявлялась и в Щучьем заливе. С 1987 г. по 1997 г. концентрация общего фосфора в центре залива снизилась с 0,43–0,68 мг Р л⁻¹ до 0,017–0,071 мг Р л⁻¹ [17]. В 2006 г. эта величина варьировала в пределах 0,076–0,19 мг Р л⁻¹ [4], а к 2013 г. снизилась уже до 0,023–0,026 мг Р л⁻¹ [Игнатъева Н. В. (ИНОЗ РАН), неопубликованные данные]. Параллельно происходило постепенное снижение численности микроорганизмов. Интенсивность развития бактериального сообщества в водоемах обычно зависит от множества факторов, основными из которых являются температура воды и концентрация лабильного органического вещества [11]. Корреляционный анализ данных за весь период исследований выявил наличие положительной связи между температурой воды и общей численностью бактерий ($r = 0,4$, $n = 90$, $p < 0,05$). Можно было бы ожидать более тесной связи между этими параметрами в силу общей биологической закономерности, однако полученный низкий коэффициент корреляции, возможно, объясняется совокупным действием на бактериопланктон различных факторов озерной среды, которые, очевидно, существенным образом могут искажать данную зависимость. В частности, одним из наиболее важных факторов может являться

содержание лабильного органического углерода в воде, влияющее на конечный уровень развития бактериопланктона и «маскирующее» связь между температурой и ОЧБ. К сожалению, данные по содержанию лабильного органического углерода, который представляет собой легкодоступную для водных микроорганизмов фракцию общего органического углерода и оказывает значительное влияние на численность бактерий, у нас отсутствуют.

В 2013–2018 гг. на акватории Щучьего залива количество микроорганизмов варьировало от 1,09 млн кл. мл⁻¹ в июне 2013 г. до 7,26 млн кл. мл⁻¹ в июле 2016 (см. рис. 2). ОЧБ в 2013 г. составляла 1,09 млн кл. мл⁻¹ (июнь, центральная часть) — 3,41 млн кл. мл⁻¹ (ноябрь, у дамбы). Минимальное количество бактериопланктона в 2014 г. отмечалось в конце февраля у дамбы (1,76 млн кл. мл⁻¹), максимальное — в начале июня близ берега (4,83 млн кл. мл⁻¹). В 2015 г. (начало июня) концентрация микроорганизмов варьировала от 1,58 млн кл. мл⁻¹ на выходе из залива до 1,94 млн кл. мл⁻¹ у берега (ст. 4). В 2016 г. эта величина изменялась в интервале от 1,67 млн кл. мл⁻¹ (октябрь, на выходе из залива) до 7,26 млн кл. мл⁻¹ (июль, у дамбы). В 2017 г. ОЧБ колебалась от 1,61 млн кл. мл⁻¹ (октябрь, ст. 3) до 3,50 млн кл. мл⁻¹ в начале июня (ст. 4), а в 2018 г. варьировала от 2,82 млн кл. мл⁻¹

(май, ст. 1) до 3,47 млн кл. мл⁻¹ в конце сентября в центре залива (см. рис. 2).

Рассмотрим более подробно сезонную динамику общей численности бактерий. Анализируя результаты весенних исследований 2013, 2014 и 2018 гг. (май), необходимо отметить, что средние по четырем станциям величины численности бактериопланктона в разные годы были сопоставимы или различались незначительно (в 1,3–1,4 раза) и составляли 2,09±0,89 млн кл. мл⁻¹; 2,39±0,27 млн кл. мл⁻¹ и 3,03±0,21 млн кл. мл⁻¹, соответственно.

Наиболее интенсивный уровень развития бактериального сообщества в Щучьем заливе наблюдался в середине лета, что связано с прогревом воды (14,0–18,0 °С) и активным развитием фитопланктона. Пики общей численности бактериопланктона наблюдались сразу после максимумов биомассы фитопланктона. За период исследований максимальное количество бактерий в Щучьем заливе на всех станциях зафиксировано 20 июля 2016 г. (см. рис. 2). В это время на всех станциях содержание хлорофилла «а» варьировало от 6,4 до 9,0 мкг/л (среднее значение 7,4±1,1 мкг/л), что значительно выше, чем на этих же станциях в июле 2013 г. (3,0–4,8 мкг/л (среднее значение 4,2±0,8 мкг/л)) (отбор проб в конце июля производился только в 2013 и 2016 г.). Биомасса фитопланктона в заливе летом 2016 г. достигала величины, характерной для эвтрофных водоемов, и была значительно выше, чем в 2013 г. Основным доминантом в 2016 г. был вид *Pandorina morum* (Müll.) Vogt, характерный для эвтрофных водоемов [16]. Различия в температурах воды в июле 2013 и 2016 гг. были незначительны (средняя температура по четырем станциям (16,7±1,3) °С и (17,3±0,9) °С соответственно). Возможно, высокие концентрации микроорганизмов в 2016 г. могли быть связаны не только с обилием фитопланктона, но и с интенсивным развитием в это время макрофитов как источника легкоокисляемого органического вещества [9]. Летом 2016 г. наблюдалось зарастание рдестом *Potamogeton perfoliatus* L. всей акватории залива из-за низкого уровня воды в заливе (средняя глубина по четырем станциям 1,3±0,5 м). Уровень воды в заливе в конце июля 2013 г. был выше, чем в 2016 г. (средняя глубина по четырем станциям 1,5±0,8 м), и сильной зарастае-

мости залива макрофитами не наблюдалось. При этом ОЧБ в конце июля 2013 г. колебалась в пределах 2,14–2,89 млн кл. мл⁻¹, тогда как в 2016 г. — от 5,16 млн кл. мл⁻¹ до 7,26 млн кл. мл⁻¹.

Интересно отметить, что минимальные за период наблюдений значения ОЧБ на всех станциях отмечались в июне 2013 и 2015 гг. (средние значения по четырем станциям — 1,56±0,28 млн кл. мл⁻¹ и 1,76 млн кл. мл⁻¹ соответственно), что ниже осенне-зимних величин (см. рис. 2). В июне в относительно мелководных районах (прибрежных районах) Ладожского озера часто наблюдается снижение концентрации микроорганизмов после паводкового (майского) пика численности, так называемая раннелетняя депрессия [5]. Однако ее сроки в отдельные годы зависят от положения термического бара в озере [14]. Так, например, во время наблюдений в июне 2014 и 2017 г. депрессии не наблюдалось (см. рис. 2). Подобное превышение ОЧБ в осенне-зимний период по сравнению с началом лета было выявлено также в оз. Белом (Косинское трехозерье, г. Москва) [26].

В осенне-зимний сезон происходит некоторое снижение величин общей численности бактерий по сравнению с августом. В середине октября 2013, 2014 и 2017 гг. концентрации микроорганизмов в заливе были сопоставимы (средние значения по 4 станциям 1,98±0,05; 2,13±0,15 и 1,9±0,25 млн кл. мл⁻¹ соответственно). При сравнении зимних данных 2013–2014 и 2017 гг. также видно, что средние значения общей численности бактерий за эти годы практически не отличаются: 2,32±0,41 млн кл. мл⁻¹ (средние значения по двум станциям) и 2,11±0,25 млн кл. мл⁻¹ (ср. по двум станциям) соответственно. А в августе 2013 и 2016 гг. среднее значение ОЧБ составляло 2,45±0,63 и 2,59±0,68 млн кл. мл⁻¹ соответственно. Осенью и зимой 2013 г. на ст. 1 (пробы отбирались только на этой станции) наблюдались относительно низкие ОЧБ (см. рис. 2), несмотря на аномально высокие концентрации хлорофилла «а», наблюдаемые в ноябре, перед ледоставом, и в декабре 2013 г. уже подо льдом (26,6 и 9,9 мкг/л соответственно). В данном случае рост микроорганизмов, по всей видимости, лимитировался низкими температурами воды (3,5 и 0,1 °С соответственно), несмотря на наличие большого

количества питательных веществ и биогенных элементов [24].

Судя по общей численности микроорганизмов (среднесезонные значения ОЧБ варьировали от $1,77 \pm 0,17$ млн кл. мл⁻¹ в 2015 г. до $3,67 \pm 1,7$ млн кл. мл⁻¹ в 2016 г.), Щучий залив является мезотрофно-эвтрофным водоемом [8].

За период исследований в бактериопланктоне преобладали одиночные клетки. Большая часть бактерий была представлена палочковидными и кокковидными формами, иногда встречались нитевидные формы и спириллы. Спириллы часто встречаются в водоемах с высоким содержанием органического вещества в воде [27]. Среднее значение палочковидных форм микроорганизмов в исследуемый период варьировало от $(51,8 \pm 8,7)$ % в центре залива (ст. 2) до $(55,1 \pm 8,2)$ % на станции близ берега (ст. 4), что незначительно (в 1,3–1,4 раза) выше, чем в центральной глубоководной части Ладожского озера (ст. 82) для периода 2016–2018 гг. ($(39,9 \pm 10,8)$ %).

Наши данные по бактериопланктону согласуются с результатами многолетних исследований уровня развития фитопланктона в заливе. В конце 1980-х годов в Щучьем заливе отмечалось преобладание процессов деструкции органического вещества, тогда как в последующие годы интенсивность фотосинтеза значительно превышала деструкцию [15].

Заключение.

На основе многолетних микробиологических исследований Щучьего залива Ладожского озера выявлена тенденция улучшения экологического состояния водоема в условиях ослабления антропогенного воздействия, сопровождавшегося снижением концентрации общего фосфора. Показано, что стабильное уменьшение общего количества бактерий с уровня, характерного для сильнозагрязненных и эвтрофных водоемов, до уровня, характерного для мезотрофно-эвтрофных водоёмов [20], является надежным критерием восстановления экосистемы Щучьего залива до состояния, характерного для подобных заливов Ладожского озера [5]. Следует отметить, что восстановление экосистемы залива отмечалось и по другим сообществам гидробионтов (высшей водной растительности, перифитону, фитопланктону, зоопланктону, бентосу) [17]. На фоне общего многолетнего снижения численности

бактериопланктона в заливе, связанного с уменьшением антропогенного воздействия, тем не менее, удалось выявить наличие положительной зависимости количественного уровня развития бактериопланктона от температуры воды. Восстановление экосистемы Щучьего залива, по видимому, почти полностью завершилось, о чем свидетельствует стабильное состояние бактериального сообщества в последнее десятилетие.

Полученные результаты по восстановлению экосистемы Щучьего залива на примере изменения численности бактериопланктона показывают, что даже полностью разрушенные биотопы в Ладожском озере могут возвращаться в состояние, близкое к естественному, после прекращения или снижения поступления загрязняющих стоков. Однако характер и динамика подобного восстановления биотопов, очевидно, сильно зависят от сопутствующих гидрологических условий.

Работа выполнена по результатам, полученным в ходе проведения работ по государственному заданию ИНОЗ РАН-ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0001.

Благодарности: Игнатъевой Н. В. (ИНОЗ РАН) за предоставление данных по концентрации общего фосфора в 2013 г.

Литература

1. Александрова, Д. Н. и Капустина, Л. Л. (1982). Бактериальные сообщества в озере. В: Петрова, Н. А. (ред.). Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, сс. 156–163.
2. Андроникова, И. Н. и Распопов, И. М. (2007). Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера. Биология внутренних вод, № 2, сс. 3–10.
3. Дзюбан, А. Н., Косолапов, Д. Б., Корнева, Л. Г. и Столбунова, В. Н. (2007). Комплексная оценка экологического состояния мелководий Рыбинского и Горьковского водохранилищ. Биология внутренних вод, № 4, сс. 3–8.
4. Игнатъева, Н. В. и Сусарева, О. М. (2011). Особенности гидрохимического режима прибрежной зоны озера. В: Курашов, Е. А. (ред.). Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, сс. 45–51.
5. Капустина, Л. Л. (2011). Бактериопланктон литоральной зоны Ладожского озера. В: Курашов, Е. А. (ред.). Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, сс. 139–155.
6. Киреева, И. Ю. (2007). Морфобиологические и структурные показатели бактериопланктона как биоиндикаторы. В: Румянцев, В. А. и Трифонова, И. С. (ред.). Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: сборник материалов международной конференции (Санкт-Петербург, 23–27 октября 2006 г.). СПб.: ЛЕМА, сс. 191–193.

7. Кожова, О. М. и Дутова, Н. В. (1989). Морфологическое разнообразие планктонных бактерий как показатель качества вод. Гидробиологический журнал, Т. 25, № 1, сс. 42–48.
8. Копылов, А. И. и Косолапов, Д. Б. (2007). Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоемов. В: Румянцев, В. А. и Трифонова, И. С. (ред.). Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: сборник материалов международной конференции (Санкт-Петербург, 23–27 октября 2006 г.). СПб.: ЛЕМА, сс. 176–181.
9. Копылов, А. И. и Косолапов, Д. Б. (2008). Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги. М.: Изд-во СГУ, 377 с.
10. Копылов, А. И. и Косолапов, Д. Б. (2011). Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем. Ижевск: КнигоГранд, 332 с.
11. Кузнецов, С. И. (1970). Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 440 с.
12. Кузнецов, С. И. и Дубинина, Г. А. (1989). Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 288 с.
13. Мосевич, М. В. (1962). Влияние сточных вод Сясьского и Приозерского ЦБК на микрофлору Ладожского озера. Научно-технический бюллетень ГосНИОРХ, вып. 16, сс. 46–51.
14. Науменко, М. А. (2015). Общая характеристика озера. В: Румянцев, В. А. (ред.). Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб.: Нестор-История, сс. 15–20.
15. Протопопова, Е. В. (2011). Фитопланктон литоральной зоны Ладожского озера. В: Курашов, Е. А. (ред.). Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, сс. 102–127.
16. Протопопова, Е. В. (2017). Оценка качества воды по фитопланктону залива Щучий (Ладожское озеро). В: Румянцев, В. А. и Трифонова, И. С. (ред.). Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем III: материалы международной конференции (Санкт-Петербург, 23–27 октября 2017 г.). СПб.: Своё издательство, сс. 262–266.
17. Распопов, И. М., Андроникова, И. Н., Слепухина, Т. Д., Расплетина, Г. Ф., Рычкова, М. А., Барбашова, М. А., Доценко, О. Н. и Протопопова, Е. В. (1998). Прибрежно-водные экотоны больших озер. СПб.: РТП ИК «Синтез», 54 с.
18. Родина, А. Г. и Кузьмицкая, Н. К. (1963). Численность и распределение бактериопланктона в Ладожском озере. Микробиология, Т. XXXII, вып. 2, сс. 288–295.
19. Романенко, В. И. (1979). Микробиологические показатели качества воды и методы их определения. Водные ресурсы, Т. 6, № 6, сс. 139–153.
20. Романенко, В. И. (1985). Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 295 с.
21. Романенко, В. И. и Кузнецов, С. И. (1974). Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 194 с.
22. Худяков, В. И., Садчиков, А. П., Плеханов, С. Е. и Мятлев, В. Д. (2013). Анализ площади воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината по состоянию бактериопланктона. Прикладная токсикология, Т. 4, № 2 (10), сс. 47–52.
23. Currie, D. J. (1990). Large-scale variability and interactions among phytoplankton, bacterioplankton, and phosphorus. *Limnology and Oceanography*, Vol. 35, Issue 7, pp. 1437–1455. DOI: 10.4319/lo.1990.35.7.1437.
24. Felip, M., Pace, M. L. and Cole, J. J. (1996). Regulation of planktonic bacterial growth rates: The effects of temperature and resources. *Microbial Ecology*, Vol. 31, Issue 1, pp.15–28. DOI: 10.1007/BF00175072.
25. Hobbie, J. E., Daley, R. J. and Jasper S. (1977). Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 33, No. 5, pp. 1225–1228. DOI: 10.1128/AEM.33.5.1225-1228.1977.
26. Il'inskiy, V. V., Mosharova, I. V., Akulova, A. Yu. and Mosharov, S. A. (2013). Current state of heterotrophic bacterioplankton in the Kosinskies Lakes. *Water Resources*, Vol. 40, Issue 5, pp. 518–527. DOI: S0097807813050035.
27. Krieg, N. R. (1976). Biology of the Chemoheterotrophic Spirilla. *Bacteriological Reviews*, Vol. 40, No. 1, pp. 55–115.
28. Pomeroy, L. R. (1974). The ocean's food web, a changing paradigm. *Bioscience*, Vol. 24, No. 9, pp. 499–504. DOI: 10.2307/1296885.
29. Raspopov, I. M., Andronikova, I. N., Dotsenko, O. N., Kurashov, E. A., Letanskaya, G. I., Panov, V. E., Rychkova, M. A., Telesh, I. V. Tchernykh, O. A. and Vorontsov, F. F. (1996). Littoral zone of Lake Ladoga: ecological state evaluation. *Hydrobiologia*, Vol. 322, Issues 1–3, pp. 39–47. DOI: 10.1007/BF00031803.
30. Shchetinina, E. V., Maksimov, V. V., Kraikivskaya, O. V. and Maksimova, E. A. (2013). Assessing the state of water masses of the Southern Baikal in the zone of influence of Baikal PPM by many-year microbiological characteristics. *Water Resources*, Vol. 40, Issue 6, pp. 649–656. DOI: 10.1134/S0097807813060109.
31. Timakova, T. M., Kulikova, T. P., Litvinova, I. A., Polyakova, T. N., Syarki, M. T., Tekanova, E. V. and Chekryzheva, T. A. (2014). Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill. *Water Resources*, Vol. 41, Issue 1, pp. 78–86. DOI: 10.1134/S0097807814010126.
32. Wetzel, R. G. (1983). *Limnology*. 2nd edition. Philadelphia: Saunders College Publishing, 858 p.

References

1. Aleksandrova, D. N. and Kapustina, L. L. (1982). Bacterial communities in the lake. In: Petrova, N. A. (ed.) *Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga*. Leningrad: Nauka, pp. 156–163.
2. Andronikova, I. N. and Raspopov, I. M. (2007). Zones of ecological risk in the near-shore regions of Lake Ladoga. *Inland Water Biology*, No. 2, pp. 3–10.
3. Dzyuban, A. N., Kosolapov, D. B., Korneva, L. G. and Stolbunova V. N. (2007). Complex assessment of an ecological status of the littoral zones in the Rybinsk and Gorkiy reservoirs. *Inland Water Biology*, No. 4, pp. 3–8.
4. Ignatyeva, N. V. and Susareva, O. M. (2011). Characteristics of the hydrochemical regime in the lake's coastal zone. In: Kurashov, Ye. A. (ed.) *Littoral zone of Lake Ladoga*. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, pp. 45–51.
5. Kapustina, L. L. (2011). Bacterioplankton of the littoral zone of Lake Ladoga. In: Kurashov, Ye. A. (ed.) *Littoral zone of Lake Ladoga*. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, pp. 139–155.
6. Kireeva, I. Yu., (2007). Use of structural and parameters of plankton bacteria in bioindication. In: Rummyantsev, V. A. and Trifonova, I. S. (eds.) *International Conference "Bioindication in Monitoring of Freshwater Ecosystems"* (Saint Petersburg, October 23–27, 2006). Saint Petersburg: LEMA, pp. 191–193.
7. Kozhova, O. M. and Dutova, N. V. (1989). Morphological diversity of planktonic bacteria as an indicator of water quality. *Gidrobiologicheskij Zhurnal*, Vol. 25, No. 1, pp. 42–48.

8. Kopylov, A. I. and Kosolapov, D. B. (2007). Microbial indicators of eutrophication of freshwater ecosystems. In: Romyantsev, V. A. and Trifonova, I. S. (eds.) *International Conference "Bioindication in Monitoring of Freshwater Ecosystems" (Saint Petersburg, October 23–27, 2006)*. Saint Petersburg: LEMA, pp. 176–181.
9. Kopylov, A. I. and Kosolapov, D. B. (2008). *Bacterioplankton of reservoirs of the Upper and Middle Volga*. Moscow: Publishing House of Modern University for the Humanities, 377 p.
10. Kopylov, A. I. and Kosolapov, D. B. (2011). Microbial "loop" in planktonic communities of marine and freshwater ecosystems. Izhevsk: KnigoGrand, 332 p.
11. Kuznetsov, S. I. (1970). *Microflora of lakes and its geochemical activity*. Leningrad: Nauka, 440 p.
12. Kuznetsov, S. I. and Dubinina, G. A. (1989). *Methods for the study of aquatic microorganisms*. Moscow: Nauka, 288 p.
13. Mosevich, M. V. (1962). Influence of wastewater from Syasky and Priozersky pulp and paper mills on the microflora of Lake Ladoga. *Research and Engineering Bulletin of the National Research Institute of Lake and River Fisheries*, No. 16, pp. 46–51.
14. Naumenko, M. A. (2015). General characteristics of the lake. In: Romyantsev, V. A. (ed.) *Lake Ladoga and the sights of its coast. Atlas*. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, pp. 15–20.
15. Protopopova, E. V. (2011). Phytoplankton of the littoral zone of Lake Ladoga. In: Kurashov, Ye. A. (ed.) *Littoral zone of Lake Ladoga*. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, pp. 102–127.
16. Protopopova, E. V. (2017). The estimation of water quality by phytoplankton of the Shuchiy Bay (Lake Ladoga). In: Romyantsev, V. A. and Trifonova, I. S. (eds.) *Bioindication in Monitoring of Freshwater Ecosystems III: Proceedings of III International Conference (Saint Petersburg, October 23–27, 2017)*. Saint Petersburg: Svoyo Izdatelstvo, pp. 262–266.
17. Raspopov, I. M., Andronikova, I. N., Slepukhina, T. D., Raspletina, G. F., Rychkova, M. A., Barbashova, M. A., Dotsenko, O. N. and Protopopova, E. V. (1998). *Coastal-aquatic ecotones of large lakes*. Saint Petersburg: RTP IK "Sintez", 54 p.
18. Rodina, A. G. and Kuzmitskaya, N. K. (1963). Abundance and distribution of bacterioplankton in Lake Ladoga. *Microbiology*, Vol. XXXII, No. 2, pp. 288–295.
19. Romanenko, V. I. (1979). Microbiological indicators of water quality and methods for their determination. *Water Resources*, Vol. 6, No. 6, pp. 139–153.
20. Romanenko, V. I. (1985). *Microbiological processes of production and destruction of organic matter in inland water reservoirs*. Leningrad: Nauka, 295 p.
21. Romanenko, V. I. and Kuznetsov, S. I. (1974). *Ecology of microorganisms in fresh water reservoirs*. Leningrad: Nauka, 194 p.
22. Khudyakov, V. I., Sadchikov, A. P., Plekhanov, S. Ye. and Myatlev, V. D. (2013). The analysis of Baikal pulp-and-paper plant aqueous wastes area of impact by the state of bacterial plankton. *Applied Toxicology*, Vol. 4, No. 2 (10), pp. 47–52.
23. Currie, D. J. (1990). Large-scale variability and interactions among phytoplankton, bacterioplankton, and phosphorus. *Limnology and Oceanography*, Vol. 35, Issue 7, pp. 1437–1455. DOI: 10.4319/lo.1990.35.7.1437.
24. Felip, M., Pace, M. L. and Cole, J. J. (1996). Regulation of planktonic bacterial growth rates: The effects of temperature and resources. *Microbial Ecology*, Vol. 31, Issue 1, pp.15–28. DOI: 10.1007/BF00175072.
25. Hobbie, J. E., Daley, R. J. and Jasper S. (1977). Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 33, No. 5, pp. 1225–1228. DOI: 10.1128/AEM.33.5.1225-1228.1977.
26. Il'nskii, V. V., Mosharova, I. V., Akulova, A. Yu. and Mosharov, S. A. (2013). Current state of heterotrophic bacterioplankton in the Kosinskie Lakes. *Water Resources*, Vol. 40, Issue 5, pp. 518–527. DOI: S0097807813050035.
27. Krieg, N. R. (1976). Biology of the Chemoheterotrophic Spirilla. *Bacteriological Reviews*, Vol. 40, No. 1, pp. 55–115.
28. Pomeroy, L. R. (1974). The ocean's food web, a changing paradigm. *Bioscience*, Vol. 24, No. 9, pp. 499–504. DOI: 10.2307/1296885.
29. Raspopov, I. M., Andronikova, I. N., Dotsenko, O. N., Kurashov, E. A., Letanskaya, G. I., Panov, V. E., Rychkova, M. A., Telesh, I. V. Tchernykh, O. A. and Vorontsov, F. F. (1996). Littoral zone of Lake Ladoga: ecological state evaluation. *Hydrobiologia*, Vol. 322, Issues 1–3, pp. 39–47. DOI: 10.1007/BF00031803.
30. Shchetinina, E. V., Maksimov, V. V., Kraikivskaya, O. V. and Maksimova, E. A. (2013). Assessing the state of water masses of the Southern Baikal in the zone of influence of Baikal PPM by many-year microbiological characteristics. *Water Resources*, Vol. 40, Issue 6, pp. 649–656. DOI: 10.1134/S0097807813060109.
31. Timakova, T. M., Kulikova, T. P., Litvinova, I. A., Polyakova, T. N., Syarki, M. T., Tekanova, E. V. and Chekryzheva, T. A. (2014). Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill. *Water Resources*, Vol. 41, Issue 1, pp. 78–86. DOI: 10.1134/S0097807814010126.
32. Wetzel, R. G. (1983). *Limnology*. 2nd edition. Philadelphia: Saunders College Publishing, 858 p.

Авторы

Митрукова Галина Геннадьевна, канд. биол. наук
ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия
Институт озероведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: galya-21@mail.ru

Капустина Лариса Леонидовна, канд. биол. наук.
ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия
Институт озероведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: larisa.kapustina@mail.ru

Курашов Евгений Александрович, д-р. биол. наук., профессор,
ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия
Институт озероведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

Authors

Galina Gennadyevna Mitrukova, PhD in Biology
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
E-mail: galya-21@mail.ru

Larisa Leonidovna Kapustina, PhD in Biology
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences (SPC RAS),
Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russia
E-mail: larisa.kapustina@mail.ru

Evgeny Aleksandrovich Kurashov, DSc in Biology,
Professor
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences (SPC RAS),
Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russia
E-mail: evgeny_kurashov@mail.ru