

СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

УДК 574.524+556.551(282.247.211)

СОВРЕМЕННОЕ ТРОФИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И КАЧЕСТВО ВОДЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

© 2023 г. Е. В. Теканова^а, *, Н. М. Калинкина^а, Е. М. Макарова^а, В. С. Смирнова^а

^аФедеральный исследовательский центр “Карельский научный центр Российской академии наук”,
Институт водных проблем Севера, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

*e-mail: etekanova@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Оценено трофическое состояние и качество воды Онежского озера при потеплении климата и изменении антропогенной нагрузки в последние 30 лет. По концентрации хлорофилла *a* в период летней стратификации водоем сохраняет природное олиготрофное состояние. Небольшое количество легкоминерализуемого органического вещества в воде определяет низкий уровень развития сапрофитных бактерий, соответствующий ксеносапробным и β-олигосапробным водам. Более высоким уровнем трофии (мезотрофный) и сапробности воды (β-мезосапробный) характеризуется лишь Кондопожская губа Онежского озера вследствие загрязнения сточными водами целлюлозно-бумажного комбината и отходами форелевых хозяйств. Летом 2022 г. на фоне аномального прогресса эпиплимниона впервые за 50-летнюю историю исследований наблюдали локальные пятна “цветения” цианобактерий в открытом плесе озера. Возрастание концентрации гумусовых веществ в воде заливов в результате потепления климата на данном этапе не привело к изменению уровня сапрофитных бактерий.

Ключевые слова: Онежское озеро, хлорофилл *a*, сапрофитные бактерии, “цветение” воды, климатические изменения, эвтрофирование

DOI: 10.31857/S0320965223060335, **EDN:** LWNFIR

ВВЕДЕНИЕ

Явные признаки потепления в Северном полушарии наблюдаются в последние 30 лет (North et al., 2013; O’Reilly et al., 2015 и др.). В условиях антропогенной нагрузки, которую в той или иной мере испытывает большинство пресных водоемов, потепление климата, как правило, ускоряет трансформацию водных экосистем – нарушаются трофические связи, изменяется фенология биоты, развивается эвтрофирование и ухудшается качество воды (Niinemets et al., 2017 и др.). Следует отметить, что реакция экосистем больших глубоких озер на изменение климата изучена значительно меньше, чем малых (Jenny et al., 2020). В связи с этим, необходим тщательный контроль за состоянием таких водоемов, имеющих важное экономическое значение. К ним относится Онежское озеро, второе по величине в Европе, – глубоководный, лимнически сложный, холодноводный и природно олиготрофный водоем (Экосистема..., 1990).

Онежское озеро уже >90 лет испытывает нагрузку сточных вод Кондопожского ЦБК. Кроме того, в последние 20 лет на акватории активно развивается товарное производство форели. К настоящему времени доказано, что в результате увеличения температуры воздуха за последние 55 лет возросла продолжительность безледоставного периода и “биологического” лета, увеличилась средняя температура поверхности воды Онежского озера (Диагноз..., 2020). Показано, что на аномально высокий весенний прогрев воды планктон Онежского озера реагирует смещением сезонных фаз на более ранний период (Сярки, Фомина, 2019; Калинкина и др., 2021). Другим следствием потепления климата стало увеличение речного стока аллохтонных веществ гумусового происхождения в Онежское озеро за последние 30 лет, что привело к возрастанию цветности воды, концентрации общего железа и углекислого газа в заливах (Калинкина и др., 2019; Kalinkina et al., 2020).

Цель работы – выявить возможные изменения трофического состояния (по содержанию Хл *a*) и качества воды (по количеству сапрофитных бактерий) в Онежском озере в летний период 2016–

Сокращения: Хл *a* – хлорофилл *a*; ЦБК – целлюлозно-бумажный комбинат.

2022 г. по сравнению с 1992–2010 г. в связи с усилением воздействия на экосистему внешних факторов (отходов форелевых хозяйств, потепления климата).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ трофического состояния и качества воды Онежского озера за периоды 1992–2010 г. и 2016–2022 г. проводили по величинам Хл *a* и количеству сапрофитных бактерий в июле и августе. Эти месяцы характеризуются наибольшей стабильностью водной среды и максимальным прогревом эпилимниона (Экосистема..., 1990). В работе использовали сведения из зарегистрированных баз данных КарНЦ РАН за 1992–2010 г.^{1, 2} и собственные данные за 2016–2022 г.

Концентрацию Хл *a* и количество сапрофитных бактерий в течение всего периода исследований измеряли в поверхностном слое воды на 49 постоянных станциях наблюдений в разных районах озера: Петрозаводская губа (2), Кондопожская губа (6), Уницкая губа (6), Лижемская губа (7), залив Большое Онего (1), Повенецкий залив (5), Заонежский залив (3), Малое Онего (5), Центральное Онего (5), Южное Онего (5), Кижские шхеры (4). В июле 2022 г. отобраны пробы воды на трех дополнительных станциях в пятнах “цветения” воды в открытом плесе Онежского озера для оценки состояния фитопланктона и концентрации Хл *a*.

Кроме того, в июле 2022 г. были измерены концентрации растворенного органического углерода в поверхностном слое воды на 20 станциях в разных районах Онежского озера: Петрозаводская губа (3), Кондопожская губа (7), Уницкая губа (1), Лижемская губа (1), залив Большое Онего (1), Повенецкий залив (1), Центральное Онего (4), Южное Онего (2).

Концентрацию Хл *a* измеряли стандартным спектрофотометрическим методом (SCOR-UNESCO..., 1966). Для изучения фитопланктона в пятнах “цветения” пробы воды объемом 0.5 л фикси-

ровали 10 мл 40%-ного формалина. Пробы концентрировали на мембранных фильтрах ($D_{пор} = 0.8$ мкм) до объема 5 мл (Федоров, 1979). Видовой состав, численность и структуру фитопланктона изучали с помощью микроскопа Микмед-6 при увеличении $\times 400$. Таксономическую идентификацию проводили по определителям (Tikkanen, 1986; Водоросли..., 2006). Биомассу фитопланктона вычисляли на основе индивидуальных объемов клеток. Сапрофитных бактерий выращивали на среде РПА в течение пяти суток при 22°C (Кузнецов, Дубинина, 1989). Растворенный органический углерод³ определяли в Центре коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр РАН” на анализаторе Shimadzu TOC-Lcspn способом высокотемпературного разложения до CO₂ с ИК-детектированием.

Картосхемы пространственного распределения содержания Хл *a* и количества сапрофитных бактерий на акватории Онежского озера в июле 2022 г. созданы в лицензированном ПО ГИС MapInfo v. 12.5 с использованием метода IDW интерполяции (метод взвешенных обратных расстояний Inverse Distance Weighting).

При статистическом анализе данных вычисляли медианные значения Хл *a* и количества сапрофитных бактерий за 1992–2010 г. и 2016–2022 г. Достоверность различий показателей в эти периоды оценивали по критерию Манна–Уитни в лицензированном пакете Statistica Adv. v.10 for Windows Ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Хлорофилл *a*. Содержание Хл *a* за последние 7 лет почти на всей акватории Онежского озера не превышает верхнего предела олиготрофии 3 мкг/л (Китаев, 1984), его медианные концентрации находятся в пределах 1.8–3 мкг/л (рис. 1а, табл. 1). Исключение – район Кижских шхер и Кондопожская губа, которые традиционно отличаются повышенным уровнем трофии (слабо мезотрофный) по сравнению с остальной акваторией (рис. 1а, табл. 1).

В Кижских шхерах это связано с мелководностью (4–11 м) и слабой динамикой водных масс, что определяет лучший прогрев воды. В то же время, массовому развитию фитопланктона препятствует обилие высшей водной растительности, которая способствует связыванию фосфора, поступающего с водосборной территории (Søndergaard, Moss, 1997 и др.). Так, содержание общего фосфора (7–13 мкг/л) здесь не отличается от та-

¹ Сярки М.Т., Теканова Е.В., Чекрыжева Т.А. 2015. Планктон пелагиали Онежского озера. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620274. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU). Дата государственной регистрации в реестре баз данных 13.02.2015 г.

² Сабьлина А.В., Теканова Е.В., Калинин Н.М. 2018. Хлорофилл “*a*” в воде Онежского озера. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621068. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр Российской академии наук” (RU). Дата государственной регистрации в реестре баз данных 13.06.2018 г.

³ ГОСТ 31958-2012. 2013. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического кислорода (ISO 8245:1999, NEQ). Москва. Стандартинформ. Дата введения в действие 01.01.2014.

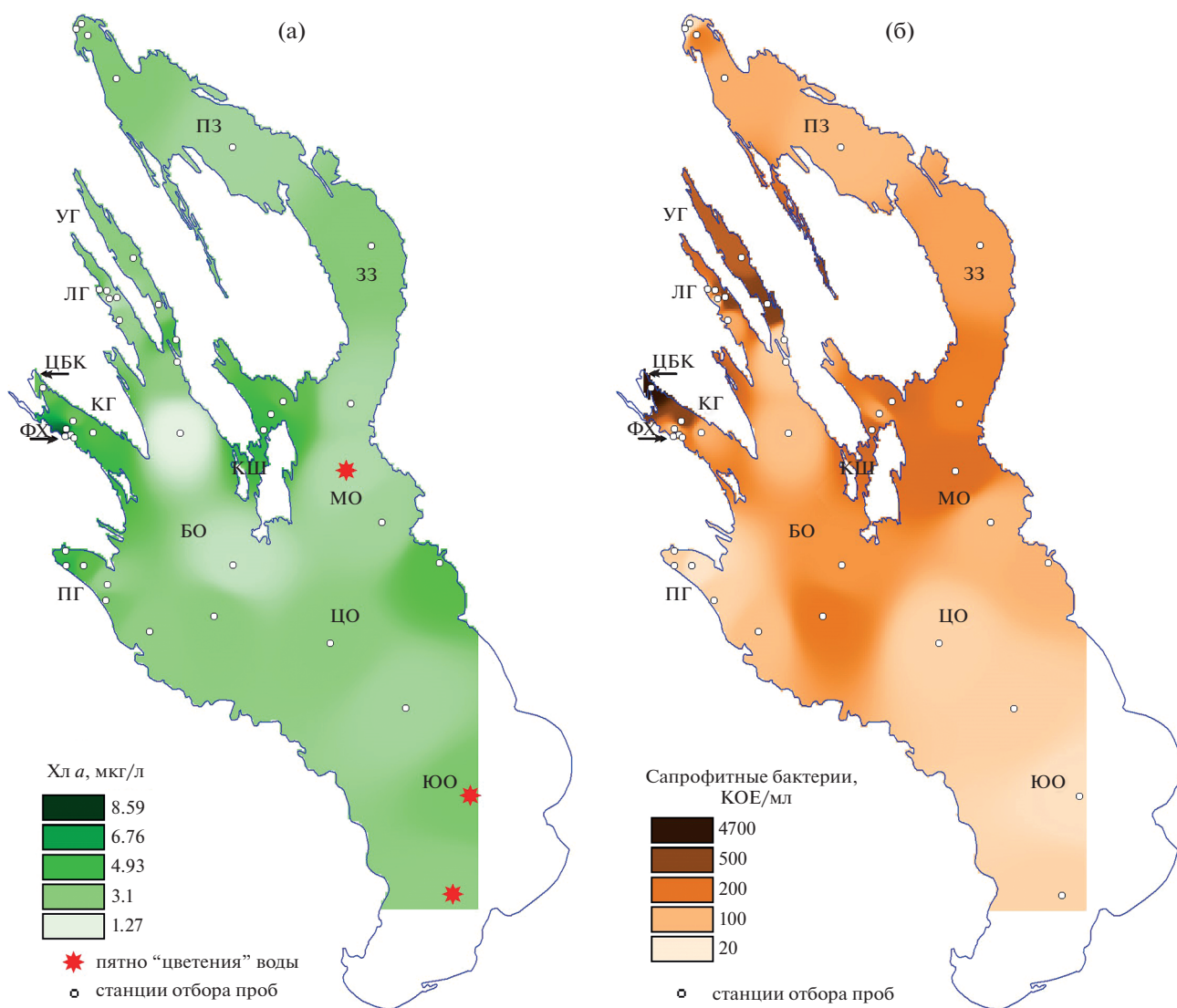


Рис. 1. Распределение концентраций Хл *a* (а) и количества сапрофитных бактерий (б) на акватории Онежского озера 22–30 июля 2022 г. ПГ – Петрозаводская губа, КГ – Кондопожская губа, ЛГ – Лижемская губа, УГ – Уницкая губа, ПЗ – Повенецкий залив, ЗЗ – Заонежский залив, КШ – Кижские шхеры, МО – Малое Онего, БО – Большое Онего, ЦО – Центральное Онего, ЮО – Южное Онего, ФХ – форелевые хозяйства, ЦБК – целлюлозно-бумажный комбинат. Стрелками обозначены места расположения ЦБК и ФХ. В легенде цифрами обозначены средние значения величин для каждой градации показателей.

кового в центральном плесе озера (Zobkov et al., 2022).

Повышенные концентрации Хл *a* в вершинной и центральной частях Кондопожской губы – результат влияния биогенной нагрузки со сточными водами ЦБК. Кроме того, в последние 20 лет в прибрежье центральной части залива появился новый участок повышенной трофии в результате размещения здесь форелевых ферм, где выращивают ~2000 т товарной форели в год. Именно на этом прибрежном участке отмечен наиболее высокий в Онежском озере уровень Хл *a* (табл. 1, рис. 1а), свойственный β-мезотрофным экосистемам (Китаев, 1984), а максимальные концен-

трации фосфора в верхнем слое воды летом достигают 20–109 мкг/л (Zobkov et al., 2022).

Сравнение концентраций Хл *a* в разных районах Онежского озера за 1992–2010 гг. и 2016–2022 гг. показало отсутствие значимых различий по критерию Манна–Уитни, за исключением Петрозаводской губы. Здесь в последние годы произошло снижение концентрации Хл *a*. В настоящее время эти изменения приобрели значимый характер ($p = 0.01$). Тем не менее, на фоне в целом невысоких концентраций Хл *a* в Петрозаводской губе (табл. 1), снижение медианного значения на 25% вряд ли можно считать существенным. В оба периода трофическое состояние Петрозаводской

Таблица 1. Концентрация Хл *a* и количество сапрофитных бактерий в поверхностном слое воды Онежского озера

Район озера	Хл <i>a</i> , мкг/л			Сапрофитные бактерии, КОЕ/мл		
	1992–2010 гг.	2016–2022 гг.	<i>p</i>	1992–2010 гг.	2016–2022 гг.	<i>p</i>
ЦО	$2.5 \pm 0.6(17)$ 1.3–5.7	$2.7 \pm 0.2(31)$ 0.5–6.0	0.76	$128 \pm 36(21)$ 12–1065	$89 \pm 26(23)$ 48–770	0.75
ЮО	$3.6(4)$ 2.0–4.3	$2.3 \pm 0.3(14)$ 1.7–3.9	0.15	$132 \pm 82(13)$ 18–1040	$58 \pm 88(13)$ 16–830	0.41
БО	$3.0 \pm 0.8(7)$ 0.8–4.4	$2.6 \pm 0.5(7)$ 1.2–3.1	0.31	$157 \pm 50(10)$ 54–306	$142 \pm 87(8)$ 30–478	0.89
МО	–	$2.3 \pm 0.4(5)$ 1.2–3.9	–	$52(3)$ 16–93	$209(4)$ 96–257	–
ПЗ	–	$3.0 \pm 0.2(9)$ 2.4–3.9	–	$92 \pm 46(11)$ 10–732	$94 \pm 45(9)$ 15–483	0.62
ЗЗ	–	$1.8(4)$ 1.0–3.1	–	$204(3)$ 95–294	$130(1)$	–
УГ	$2.8 \pm 0.3(8)$ 1.2–4.1	$3.0(4)$ 2.9–4.5	0.44	$301 \pm 108(9)$ 18–1092	$204(4)$ 49–865	0.94
ЛГ	$2.2(4)$ 1.0–4.6	$2.6 \pm 0.6(6)$ 1.7–4.0	0.75	$179 \pm 25(7)$ 120–360	$121 \pm 116(6)$ 48–820	0.43
КШ	$3.4 \pm 0.3(14)$ 2.2–8.3	$4.6 \pm 0.7(8)$ 2.5–5.7	0.29	$254 \pm 48(13)$ 114–2316	$281 \pm 95(7)$ 117–600	0.75
ПГ	$3.8 \pm 0.4(14)$ 0.9–6.5	$2.8 \pm 0.2(20)$ 1.7–4.7	0.01*	$155 \pm 49(26)$ 9–1000	$73 \pm 23(15)$ 12–765	0.26
КГВ	$5.3 \pm 1.5(10)$ 1.6–8.7	$4.1 \pm 0.6(8)$ 2.8–9.8	0.76	$2725 \pm 747(12)$ 428–5480	$2264 \pm 442(8)$ 713–22500	0.91
КГЦ	$4.2 \pm 0.6(6)$ 2.5–6.4	$4.7 \pm 0.7(8)$ 1.9–9.6	0.65	$162 \pm 148(13)$ 38–1817	$186 \pm 58(8)$ 55–1020	0.79
КГФХ	–	$8.6 \pm 0.9(21)$ 4.8–15.4	–	–	$300 \pm 88(27)$ 81–1680	–

Примечание. ЦО – Центральное Онего; ЮО – Южное Онего; БО – Большое Онего; МО – Малое Онего; ПЗ – Повенецкий залив; ЗЗ – Заонежский залив; УГ – Уницкая губа; ЛГ – Лижемская губа; КШ – Кижские шхеры; ПГ – Петрозаводская губа; КГВ – Кондопожская губа вершина; КГЦ – Кондопожская губа центр; КГФХ – Кондопожская губа форелевые хозяйства. Над чертой – медиана и ее ошибка, в скобках – объем выборки; под чертой – диапазон измеренных значений; “–” – данные отсутствуют, *p* – уровень значимости; “*” – различия достоверны (*p* < 0.05).

губы находилось в пределах олиго-мезотрофии. Причины наблюдаемого изменения требуют дополнительного исследования, поскольку концентрации общего фосфора в эпилимнионе летом не претерпели значительных изменений с 1990-х по 2020-е годы (Калинкина и др., 2019; Zobkov et al., 2022).

Летом 2022 г. в районах Южного Онего и Малого Онего на фоне низких концентраций Хл *a* (табл. 1) были обнаружены пятна “цветения” воды (рис. 1а). Если для Кондопожской губы такое

явление не редкость из-за антропогенной нагрузки в этом районе, то “цветение” воды в открытом плесе обнаружено впервые за 50-летнюю историю исследования планктона Онежского озера. Биомасса цианобактерий в этих пятнах достигала 6.8–36.4 мг/л, численность – 24–130 млн кл./л, хотя по многолетним данным летом в открытом плесе озера показатели фитопланктона в целом не превышают 2.02 мг/л и 2.9 млн кл./мл соответственно. Даже в прибрежных эвтрофируемых участках Кондопожской губы максимальная биомасса фито-

планктона за 30-летний период исследований достигала лишь 17.7 мг/л, численность — 9 млн кл./м.¹ Биомасса цианобактериального сообщества в пятнах “цветения” на 60–90% была представлена цианобактерией *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, потенциально способной к выработке цианотоксинов. Выявленные пятна “цветения” могут свидетельствовать о кратковременных реакциях фитопланктона Онежского озера на потепление климата, имеющих на данном этапе обратимый характер. Открытый плес озера характеризуется высокой гидродинамической активностью, наличием постоянных ветровых течений (Экосистема..., 1990), которые могли вынести скопления фитопланктона из прибрежных вод. Например, для озер Байкал (Пислегина и др., 2011) и Шира (Толмеев и др., 2022) уже доказана возможность горизонтального переноса планктона на большие расстояния за счет ветровых течений.

Пятна “цветения” были обнаружены в условиях значительного прогрева воды в открытом плесе озера, температура которого достигала 19–20°C. Эти показатели на 4–5°C превышали среднемесячные значения температуры поверхности воды Онежского озера для июля в 1970–1980-х гг. (Экосистема..., 1990). К настоящему времени по эмпирическим данным доказано увеличение температуры поверхности воды в прибрежной части Онежского озера на 2.2°C за 1959–2014 гг. (Диагноз..., 2020), по спутниковым данным в глубоководной части температура воды возросла на 1.6°C за период 1991–2011 гг. (Woolway, Merchant, 2018).

В настоящее время значимый тренд повышения температуры поверхности воды выявлен во многих больших глубоких озерах Северного полушария, в частности, в Ладожском, Байкал, Вашингтон, Тахо, Боденском, Женевском, Гарда, Великих Американских озерах (Winder, Schindler, 2004; Shimoda et al., 2011; Izmet'eva et al., 2016; Диагноз..., 2020). В этих озерах наблюдается смещение фенологических фаз развития биоты на более ранний период (Winder, Schindler, 2004; Shimoda et al., 2011). В оз. Байкал выявлены изменения размерно-структурной организации весеннего фитопланктона с увеличением доли мелкоклеточной диатомеи *Synedra acus* subsp. *radians* (Kütz.) Skabitsch. (Bondarenko et al., 2019), а также вертикальной структуры планктона в связи с сокращением мощности эпилимниона, что может повлиять на трофическую сеть озера (Hampton et al., 2014). Кроме того, в оз. Байкал отмечено возрастание концентрации летнего Хл *a* на 46% за период 1977–2003 гг. (Izmet'eva et al., 2016). Среди Великих Американских озер только в оз. Верхнем, которое не испытывает антропогенной нагрузки и влияния инвазивных видов, изменения в фитопланктоне связывают с потеплением климата. В этом озере отмечены тенденции к возрастанию

численности весеннего фитопланктона, а летом — увеличение видов *Cyclotella* spp., но не численности (Reavie et al., 2014). Напротив, в оз. Тахо зафиксировано увеличение численности *Cyclotella* spp. без увеличения видовой разнообразия (Winder et al., 2009). Таким образом, в силу инертности большого объема водных масс, в больших и глубоких водоемах Северного полушария в настоящее время наблюдаются первые признаки реакции биоты на потепление климата.

Сапрофитные бактерии. Сапрофитная микрофлора в верхнем слое воды в настоящее время характеризуется слабым развитием на всей акватории Онежского озера (табл. 1, рис. 16). По медианным значениям количества сапрофитных бактерий (≤ 300 КОЕ/мл) онежская вода относится к ксеносапробным и β -олигосапробным, т.е. к очень чистым водам (Оксиюк и др., 1993). Исключение — вершинный участок Кондопожской губы, куда поступают сточные воды Кондопожского ЦБК, и вода обогащается органическим веществом и аллохтонной микрофлорой. По уровню развития сапрофитных бактерий (медиана 2264 КОЕ/мл) этот участок губы соответствует β -мезосапробным водам.

Критерий Манна–Уитни, примененный для сравнения обилия сапрофитных бактерий в 1992–2010 гг. и 2016–2022 гг., не выявил значимых различий между двумя периодами ни в одном из изученных районов озера. За последние 30 лет их количество в Онежском озере остается стабильно низким, хотя медианные значения количества сапрофитных бактерий иногда в эти два периода различаются в 2–4 раза. Такое различие медиан определяется или малой выборкой (Малое Онего), или высокой вариабельностью количества сапрофитных бактерий (Южное Онего). Южное Онего характеризуется небольшой глубиной (средняя 13.6 м), поэтому здесь не всегда формируется устойчивая температурная стратификация, т.е. сохраняется возможность перемешивания воды до дна.

Низкий уровень развития сапрофитных бактерий почти на всей акватории озера определяется небольшим количеством легкоминерализуемого органического вещества в воде, определяемого по БПК₅ — 0.5–0.9 мг O₂/л (Zobkov et al., 2022). В Кондопожской губе, где отмечено повышенное количество сапрофитных бактерий, величина БПК₅ увеличивается до 1.3–2.6 мг O₂/л (Zobkov et al., 2022). Легкоминерализуемое органическое вещество в общем содержании углерода в воде Онежского озера не превышает 10% (Теканова, 2012). В целом вода характеризуется высоким содержанием общего органического углерода преимущественно гумусовой природы, летние концентрации которого на акватории озера варьируют в пределах 5.1–17.4 мг С/л (Zobkov et al., 2022). Ор-

ганический углерод в Онежском озере находится, главным образом, в растворенной форме. Так, по нашим данным, концентрации растворенного органического углерода летом 2022 г. были близки к содержанию общего органического углерода в 2019–2020 гг. (Zobkov et al., 2022). В открытом плесе озера (Центральное и Южное Онего, залив Большое Онего, Повенецкий залив) медианное значение растворенного органического углерода составляло 6.5 ± 0.1 (пределы 5.9–7.1) мг С/л, $n = 8$, в приустьевых участках озера – достигало 8.3 ± 0.1 (пределы 7.3–9.6) мг С/л, $n = 12$.

За период 1992–2018 гг. в Онежском озере произошло значимое увеличение содержания гумусовых веществ по индикаторным показателям – цветности воды (на 17 град), общему железу (в 3.5 раза) и углекислому газу (в 2.5 раза) в воде заливов в результате потепления климата (Калинкина и др., 2019; Kalinkina et al., 2020). Тем не менее, уровень развития сапрофитных бактерий не претерпел значимых изменений (табл. 1). Гумусовые органические вещества трудно поддаются бактериальному разрушению. Установлено, что водные бактерии могут потреблять лишь 15% гумусовых веществ (Tranvik, 1998).

Выводы. Исследования Онежского озера в 2016–2022 гг., проведенные в период летней температурной стратификации, показали, что по содержанию Хл *a* и количеству сапрофитных бактерий водоем на основной акватории сохраняет прежнее олиготрофное состояние и высокое качество воды (ксено- и β-олигосапробные воды). Повышенный трофический уровень и более низкое качество воды отмечены лишь в Кондопожской губе. Количество сапрофитных бактерий в вершинной части залива, принимающей сточные воды ЦБК, характеризует ее как β-мезосапробную удовлетворительной чистоты. В районе расположения форелевых садков концентрации Хл *a* достигают уровня β-мезотрофных экосистем. Реакция фитопланктона на аномально высокую температуру воды (19–20°C) в июле 2022 г. проявилась в виде пятен “цветения” цианобактерий с доминированием *Dolichospermum flos-aquae* в открытом плесе озера, которые были зафиксированы впервые за 50-летний период наблюдений. Механизм формирования этих пятен в олиготрофном водоеме требует дополнительных исследований. Возрастание в воде заливов гумусовых веществ в результате потепления климата не отразилось на микробиологических показателях сапробности воды. Гумусовые вещества трудно минерализуются и медленно поддаются бактериальному разложению. В целом, реакция экосистемы Онежского озера на антропогенные и климатические изменения на данном этапе ее функционирования носит локальный характер. До настоящего времени природное состояние основной акватории Онежского озера сохраняется, с одной

стороны, за счет холодноводности, препятствующей быстрому нарастанию биомассы планктона, с другой – за счет большого объема водных масс, определяющего большие потенциальные возможности самоочищения экосистемы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают глубокую благодарность А.В. Толстикovu и А.П. Георгиеву за помощь в организации работ и О.В. Дерусовой за помощь в оцифровке карт-схем (Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водоросли, вызывающие “цветение” водоемов Северо-Запада России. 2006. М.: Тов-во науч. изд. КМК.
- Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России. 2020. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН.
- Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Ефремова Т.В. и др. 2021. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Изв. РАН. Сер. геогр. Т. 85. № 6. С. 888. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
- Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сабылина А.В., Рыжиков А.В. 2019. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // Изв. РАН. Сер. геогр. № 1. С. 62. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019162-72>
- Китаев С.П. 1984. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука.
- Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. 1989. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука.
- Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. 1993. Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. Т. 29. № 4. С. 62.
- Пислегина Е.В., Шапов К.С., Измestьева Л.Р. 2011. Влияние ветров на обилие планктона в период прямой термической стратификации 2009 г. в Южном Байкале (р-н пос. Большие Коты) // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. Т. 4. № 1. С. 67.
- Сярки М.Т., Фомина Ю.Ю. 2019. Зоопланктон Онежского озера, его центрального плеса и залива Большое Онего в различные по температурному режиму годы // Тр. Карельск. науч. центра РАН. № 9. С. 104. <https://doi.org/10.17076/lim982>
- Теканова Е.В. 2012. Вклад первичной продукции в содержание органического углерода в Онежском озере // Биология внутр. вод. № 4. С. 38.

- Толмеев А.П., Дубовская О.П., Кравчук Е.С. и др. 2023. Горизонтальные неоднородности функционирования фито- и зоопланктона в озере с ветровыми течениями // Биология внутр. вод. № 2. С. 196. <https://doi.org/10.31857/S0320965223020249>
- Федоров В.Д. 1979. О методах изучения фитопланктона и его активности. М.: Наука.
- Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. 1990. Л.: Наука.
- Bondarenko N.A., Ozersky T., Obolkina L.A. et al. 2019. Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia // *Limnologia*. V. 75. P. 19. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.01.002>
- Hampton S.E., Gray D.K., Izmet'seva L.R. et al. 2014. The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of algae and grazers in Lake Baikal, Siberia // *PLoS ONE*. V. 9(2). e88920. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088920>
- Izmet'seva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. 2016. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // *J. Great Lakes Res.* V. 42. P. 6. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006>
- Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. 2020. Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes // *J. Great Lakes Res.* V. 46 P. 686. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.006>
- Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A. et al. 2020. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // *J. Great Lakes Res.* V. 46. Iss. 4. P. 850. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>
- Niinemets Ü., Kahru A., Mander Ü. et al. 2017. Interacting environmental and chemical stresses under global change in temperate aquatic ecosystems: stress responses, adaptation, and scalin // *Reg. Environ. Change*. V. 17. P. 2061. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1196-3>
- North R.P., Livingstone D.M., Hari R.E. et al. 2013. The physical impact of the late 1980s climate regime shift on Swiss rivers and lakes // *Inland Waters*. V. 3. P. 341. <https://doi.org/10.5268/IW-3.3.560>
- O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K. et al. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geoph. Res. Letters*. V. 42. P. 10773. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- Reavie E.D., Barbiero R.P., Allinger L.E., Warren G.J. 2014. Phytoplankton trends in the Great Lakes, 2001–2011 // *J. Great Lakes Res.* V. 40. P. 618. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.04.013>
- SCOR-UNESCO Working Group № 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water // *Monographs on oceanographic methodology*, 1. Paris: UNESCO.
- Shimoda Y., Azim M.E., Perhar G. et al. 2011. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: what have we really learned from the north temperate deep lakes? // *J. Great Lakes Res.* V. 37. P. 173. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2010.10.004>
- Søndergaard M., Moss B. 1997. Impact of submerged macrophytes on phytoplankton in shallow freshwater lakes // *The structuring role of submerged macrophytes in lakes*. V. 131. N.Y.: Springer. P. 115.
- Tikkanen T. Kasviplanktonopas. 1986. Helsinki: Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy.
- Tranvik L.J. 1998. Degradation of dissolved organic matter in humic waters by bacteria // *Aquatic humic substances. Ecology and Biogeochemistry*. Berlin: Springer. P. 259. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03736-2_11
- Winder M., Reuter J.E., Schladow S.G. 2009. Lake warming favours small-sized planktonic diatom species // *Proc. R. Soc. B*. V. 276. P. 427. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1200>
- Winder M., Schindler D. 2004. Climatic effects on the phenology of lake processes // *Global Change Biol.* Iss. 10. P. 1844. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00849.x>
- Woolway R.I., Merchant C.J. 2018. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: A study of large Northern Hemisphere lakes // *J. Geoph. Res.: Atmospheres*. V. 123. P. 3087. <https://doi.org/10.1002/2017JD027661>
- Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N. et al. 2022. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019–2021 // *Data in Brief*. Available online. Accepted 15 March 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079>

The Current Trophic State and Water Quality of Lake Onego

E. V. Tekanova¹*, N. M. Kalinkina¹, E. M. Makarova¹, and V. S. Smirnova¹

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

*e-mail: etekanova@mail.ru

The trophic state and water quality of Lake Onego were assessed under climate warming and changes in anthropogenic load over the past 30 years. The water body retains its natural oligotrophic state during the summer stratification according to the concentration of chlorophyll *a*. A small amount of readily mineralizable organic matter in water determines the low level of development of saprophytic bacteria, corresponding to xenosaprobic and β -oligosaprobic waters. Only the Kondopogskaya Bay of Lake Onego is characterized by a higher level of trophy (mesotrophic) and water saprobity (β -mesosaprobic) due to pollution by wastewater from the pulp and paper mill and waste from trout farms. Local “bloom” of cyanobacteria of in the open area of the lake was observed during the anomalous heating of the epilimnion in the summer of 2022 for the first time in the 50-year history of research. The increase in the concentration of humic substances in the water of the bays as a result of climate warming at this stage did not lead to a change in the level of saprophytic bacteria.

Keywords: Lake Onego, chlorophyll *a*, saprophytic bacteria, water “bloom”, climate change, eutrophication