

Научная статья
УДК 574.583:639.37:597.552.512(282.247.211)
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-15-24>
EDN HWHQQH

Функционирование фитопланктона в Кондопожской губе Онежского озера в условиях садкового выращивания форели

Елена Валентиновна Теканова[✉],
Наталья Михайловна Калинин, Валерия Сергеевна Смирнова

*Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук,
Петрозаводск, Россия, etekanova@mail.ru*[✉]

Аннотация. Кондопожская губа Онежского озера испытывает антропогенную нагрузку в связи с поступлением в залив сточных вод ЦБК (вершинная часть) и деятельностью форелевых хозяйств (центральная часть). Оценены первично-продукционные (фотосинтез, хлорофилл *a*, удельный фотосинтез, ассимиляционные числа) характеристики экосистемы залива в период «вспышки» численности и биомассы фитопланктона в августе 2021 г. Доказано, что скорость фотосинтеза в заливе в период исследований определялась небольшими диатомеями. Клетки диатомового планктона объемом менее 600 мкм составляли 80–90 % в численности Bacillariophyta, которые являлись доминантной группой сообщества. Величины фотосинтеза (150–330 мкг/л·сут) не выходили за пределы олиго-мезотрофных экосистем. Величины удельного фотосинтеза (0,4–1,2 сут⁻¹) и ассимиляционные числа (22–40 мкг С/мкг Chl) также были умеренными и не указывали на значительное биогенное загрязнение воды. Выявлено, что невысокое содержание хлорофилла *a* в биомассе фитопланктона (0,13–0,39 %) определялось главным образом численностью продуктивных зеленых водорослей. Доля этой группы фитопланктона в биомассе сообщества не превышала 5–26 %, в численности – 1–11 %. В то же время биомассы фитопланктона (2,1–5,7 мг/л) и концентрации хлорофилла *a* (5,1–9,8 мкг/л) достигали показателей, свойственных мезо-эвтрофным экосистемам. Сравнение результатов исследования с многолетними данными по фотосинтезу показало, что трофическое состояние центральной части залива, где расположены большие форелевые фермы, не изменилось. Многолетние данные о биомассе фитопланктона указывают на повышение трофического статуса центральной части губы в настоящее время. Несогласованность уровня трофии по количественным и функциональным показателям фитопланктона может свидетельствовать о начальном этапе эвтрофирования Кондопожской губы в районе расположения форелевых хозяйств и примыкающей к нему пелагической части залива.

Ключевые слова: Онежское озеро, форелевые хозяйства, фитопланктон, хлорофилл *a*, фотосинтез, эвтрофирование

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН».

Для цитирования: Теканова Е. В., Калинин Н. М., Смирнова В. С. Функционирование фитопланктона в Кондопожской губе Онежского озера в условиях садкового выращивания форели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 4. С. 15–24. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-15-24>. EDN HWHQQH.

Original article

Phytoplankton functioning in the Kondopogskaya Bay of Lake Onego under conditions of cage trout farming

Elena V. Tekanova[✉], *Nataliia M. Kalinkina, Valeria S. Smirnova*

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia, etekanova@mail.ru*[✉]

Abstract. The Kondopogskaya Bay of Lake Onego is under the influence of anthropogenic pressure due to the inflow of wastewater from a pulp and paper mill (the upper part) and trout farms (the central part). The primary production characteristics (photosynthesis, chlorophyll *a*, specific rate of photosynthesis, assimilation numbers) of the bay ecosystem during the “outbreak” of phytoplankton number and biomass in August 2021 are assessed. It is proved that the photosynthesis rate in the bay was determined by small diatoms during the research period. Diatom plankton cells

with a volume of less than 600 μm accounted for 80-90% of the number of Bacillariophyta, the dominant group of the community. The photosynthesis values (150-330 $\mu\text{g/l-day}$) did not exceed the limits of oligo-mesotrophic ecosystems. The specific rate of photosynthesis (0.4-1.2 day^{-1}) and daily assimilation numbers (22-40 $\mu\text{g C}/\mu\text{g Chl}$) were also temperate and did not indicate strong biogenic water pollution. It was revealed that the low content of chlorophyll *a* in phytoplankton biomass (0.13-0.39%) was mainly determined by a small number of productive green algae. The share of this phytoplankton group in the community biomass did not exceed 26%, in the number – 11%. At the same time, phytoplankton biomass (2.1-5.7 mg/l) and chlorophyll *a* concentrations (5.1-9.8 $\mu\text{g/l}$) reached values typical of meso-eutrophic ecosystems. Comparing the results of the study with long-term photosynthesis data showed that the trophic state of the central part of the bay, where large trout farms are located, has not changed. Long-term data on phytoplankton biomass indicate an increase in the trophic status of the central part of the bay at the present time. The inconsistency of the trophic level in terms of quantitative and functional indicators of phytoplankton may indicate the initial stage of eutrophication of the central part of the Kondopogskaya Bay as a result of the activities of trout farms.

Keywords: Lake Onego, trout farms, phytoplankton, chlorophyll *a*, photosynthesis, eutrophication

Acknowledgment: the work was performed within the framework of the state assignment of the Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences.

For citation: Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Smirnova V. S. Phytoplankton functioning in the Kondopogskaya Bay of Lake Onego under conditions of cage trout farming. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry*. 2024;4:15-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-15-24>. EDN HWHQQH.

Введение

Товарное производство форели является перспективной и быстро развивающейся отраслью сельского хозяйства в Республике Карелия. Основой успешного разведения садковой форели служат благоприятные климатические условия и большое количество глубоких озер с чистой водой [1]. Большая часть форелевых хозяйств сосредоточена на двух крупнейших озерах Европы – Онежском и Ладожском, где есть развитая инфраструктура, в том числе удобные пути доставки продукции в другие регионы. Учитывая стратегическую ценность водных и биологических ресурсов этих озер, необходим тщательный контроль состояния водной среды в условиях садкового выращивания форели. Как известно, такая деятельность в случае чрезмерной нагрузки на водоем биогенных и органических веществ приводит к эвтрофированию и ухудшению качества воды [2], что снижает ресурсную ценность водного объекта.

В Онежском озере, согласно сведениям из открытых источников [3], расположены 24 форелевых фермы, в том числе 11 – в Кондопожской губе. Кроме того, в залив поступают сточные воды Кондопожского ЦБК. В последнее десятилетие нагрузка сточных вод на залив в виде взвешенных, органических, биогенных веществ сократилась в 5–10 раз по сравнению с 1980–1990 гг. [4]. В связи с этим в настоящее время деятельность форелевых ферм общей мощностью около 4 тыс. т [3] стала важнейшим фактором загрязнения воды в Кондопожской губе. В последние годы были обнаружены признаки эвтрофирования в районе форелевых хозяйств и прилегающей пелагической части губы по химическим (насыщение воды кислородом, концентрации фосфора) и биологическим (деструкция органического вещества, фитопланктон) показателям [5–7].

Первым откликом водной экосистемы на увеличение фосфорной нагрузки является увеличение

количественных, затем – функциональных характеристик фитопланктона. Летом 2021 г. в Кондопожской губе в районе форелевых хозяйств и прилегающей пелагической части залива была зафиксирована «вспышка» численности и биомассы фитопланктона за счет резкого увеличения количества диатомовых и золотистых водорослей по сравнению с предшествующим многолетним периодом исследований [7].

Целью настоящей работы была оценка функциональных характеристик фитопланктона в Кондопожской губе Онежского озера в период «вспышки» его численности и биомассы летом 2021 г.

Материал и методы исследования

Кондопожская губа – большой глубоководный залив, расположенный в северо-западной части Онежского озера. Его средняя глубина 21 м, максимальная – 82 м, объем воды 4,3 km^3 , период условного водообмена 1,9 лет.

Пробы воды отбирали 4–5 августа 2021 г. на 6 станциях с борта научно-исследовательского судна «Эколог» из поверхностного слоя 0,5 м. Станция К_3 (глубина 14,0 м) расположена в вершинной части губы, которая находится под влиянием сточных вод ЦБК и небольшого форелевого хозяйства, ст. К50 (глубина 35,0 м) и К_6 (глубина 76,6 м) – в пелагиали центральной части губы. Станции KF1 (глубина 23,0 м), KF2 (глубина 28,5 м) и KF4 (глубина 6,8 м) расположены в прибрежье центральной части губы в районе расположения крупных форелевых ферм (рис. 1).

Фотосинтез измеряли скляночным кислородным методом [8]. Пересчет скорости фотосинтеза из единиц кислорода в углерод проводили с учетом ассимиляционного коэффициента 1,25 [9]. Первичная продукция в фотическом слое воды рассчитывалась по общепринятой формуле [10].

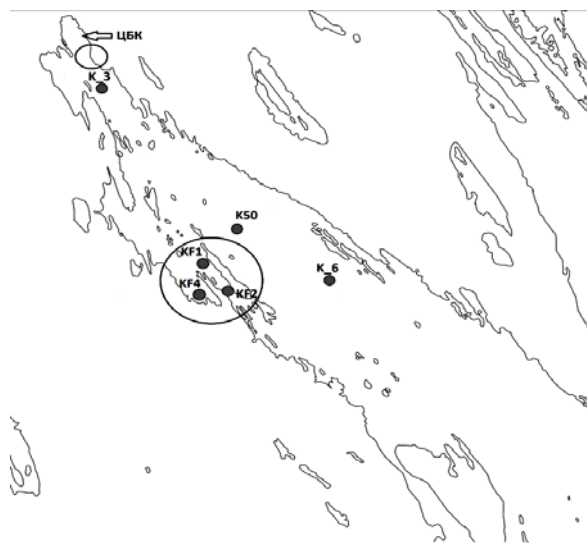


Рис. 1. Карта-схема Кондопожской губы Онежского озера. Кругами обозначены места расположения форелевых хозяйств, серыми точками – места отбора проб воды августе 2021 г.

Fig. 1. A map of Kondopogorskaya Bay of Lake Onego. The circles indicate the locations of trout farms, the gray dots indicate the locations of water sampling August 2021

Для изменения хлорофилла *a* фитопланктон концентрировали на мембранных фильтрах ($D_{пор} = 0,8$ мкм), которые сразу замораживались. Содержание хлорофилла *a* определяли спектрофотометрически при $\lambda = 663$ нм, $\lambda = 645$ нм, $\lambda = 630$ нм [11].

Пробы воды для изучения фитопланктона фиксировали 40 %-м формалином. Клетки осаждали на мембранные фильтры ($D_{пор} = 0,8$ мкм). Видовой состав и численность изучали при увеличении $\times 400$ [12, 13]. Идентификацию видов проводили по определителям [14, 15]. Биомассу определяли из индивидуальных объемов клеток, вычисленных по геометрическим фигурам.

По соотношению фотосинтеза и биомассы фитопланктона рассчитали суточные величины удельного фотосинтеза (P/B-коэффициенты), по соотношению фотосинтеза и хлорофилла *a* – суточные ассимиляционные числа (САЧ).

Результаты и обсуждение

Уровень развития фитопланктона в Кондопожской губе в августе 2021 г. характеризовался чрезвычайно высокими величинами, в несколько раз превышающими данные 30-летних исследований [7]. Биомасса и численность фитопланктона на изученных станциях изменялись примерно в 2 раза (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Количественные характеристики и особенности структуры фитопланктона в Кондопожской губе Онежского озера в августе 2021 г.

Quantitative characteristics and structural features of phytoplankton in the Kondopoga Bay of Lake Onego in August 2021

Показатель	Станция					
	К_3	К50	К_6	KF1	KF2	KF4
Численность, тыс. кл./л	5 681,2	6 062,5	4 990,0	5 637,5	9 150,0	8 212,5
Биомасса, мг/л	5,685	2,083	2,289	2,036	3,562	5,402
Содержание хлорофилла в биомассе фитопланктона, %	0,17	0,37	0,23	0,39	0,23	0,13
Доля Bacillariophyta в численности фитопланктона, %	75,7	62,9	55,6	65,8	75,1	74,7
Доля Bacillariophyta в биомассе фитопланктона, %	93,0	83,6	80,3	84,5	89,1	91,0
Доля мелких клеток в численности Bacillariophyta, %	23,7	84,9	85,6	87,2	92,0	78,0
Доля мелких клеток Bacillariophyta в численности фитопланктона, %	9,0	57,1	39,2	64,3	69,1	58,3
Доля Chlorophyta в численности фитопланктона, %	10,4	25,8	16,5	23,1	11,2	4,9
Доля Chlorophyta в биомассе фитопланктона, %	1,0	10,9	7,7	6,8	4,1	2,8

Наибольшие биомассы были зарегистрированы на мелководных ст. К_3 (вблизи выпуска сточных вод ЦБК) и KF4 (вблизи форелевых садков) – 5,7 и 5,4 мг/л соответственно. На глубоководных ст. K50, К_6, KF1 и KF2 биомасса фитопланктона

составляла 2,0–3,6 мг/л. По величине биомассы большинство изученных участков залива характеризовались как мезотрофные, а на ст. К_3 и KF4 достигали уровня слабозвтрофных экосистем (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

**Трофическое состояние Кондопожской губы Онежского озера
 по показателям развития фитопланктона в поверхностном слое воды в августе 2021 г.**
**Trophic state of the Kondopoga Bay of Lake Onego
 according to indicators of phytoplankton development in the surface water layer in August 2021**

Станция	Фотосинтез	Концентрация хлорофилла <i>a</i>	Биомасса фитопланктона
К_3	Олиготрофный	Мезотрофный	α -эвтрофный
К50			Мезотрофный
К_6			
KF1	Олиго-мезотрофный		
KF2	Мезотрофный		
KF4			α -эвтрофный

В то же время в 2000–2010 гг. величины летней биомассы фитопланктона в центральной глубоководной части залива (ст. К50 и К_6), сопредельной с районом расположения форелевых хозяйств, не выходили за пределы для олиго-мезотрофных,

а в вершинной части, где расположен выпуск сточных вод ЦБК, – мезотрофных экосистем [7, 16].

Содержание хлорофилла *a* в воде исследованных участков губы (табл. 3) находилось в пределах 5–10 мкг/л.

Таблица 3

Table 3

**Продукционные характеристики фитопланктона
 в Кондопожской губе Онежского озера в августе 2021 г.**

**Production characteristics of phytoplankton
 in the Kondopoga Bay of Lake Onego in August 2021**

Показатель	Станция					
	К_3	К50	К_6	KF1	KF2	KF4
Прозрачность воды, м	1,3	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5
Хлорофилл <i>a</i> в поверхностном слое воды, мкг/л	9,8	7,9	5,1	7,9	8,3	7,0
Фотосинтез в поверхностном слое воды, мкг С/л·сут	216,1	233,2	150,4	247,7	331,3	274,6
P/B-коэффициент, сут ⁻¹	0,38	1,12	0,66	1,22	0,93	0,50
САЧ, мкг С/мкг Chl	22	29	29	31	40	39
Первичная продукция (PP), мг С/м ² ·сут	244,4	527,6	340,2	538,7	720,6	597,4

Концентрации хлорофилла как косвенного показателя биомассы фитопланктона, так же, как и сами величины биомассы, отражали мезотрофное состояние экосистемы (см. табл. 2). Наибольшая концентрация, приближающаяся к верхней границе мезотрофии, отмечена на ст. К_3 (9,8 мкг/л) и KF2 (8,3 мкг/л), минимальная – на ст. К_6 (5,1 мкг/л). В целом концентрации хлорофилла *a* на ст. К_3 в вершинной части и ст. К50 в пелагиали центральной части Кондопожской губы в августе 2021 г. были значительно выше, чем в предшествующие 30 лет наблюдений [17].

Содержание хлорофилла *a* в биомассе фитоплан-

ктона было невелико и составляло 0,13–0,39 %, что связано с доминированием диатомей (см. табл. 1). Подобная доля хлорофилла *a* в биомассе диатомового планктона была установлена в Рыбинском водохранилище [18]. Тем не менее, связи между диатомовыми водорослями и содержанием хлорофилла в биомассе фитопланктона установить не удалось. Регрессионный анализ выявил достоверную зависимость содержания хлорофилла в биомассе только от доли зеленых водорослей в численности фитопланктона, коэффициент Спирмена составил 0,93 при $p < 0,05$, $n = 6$ (рис. 2).

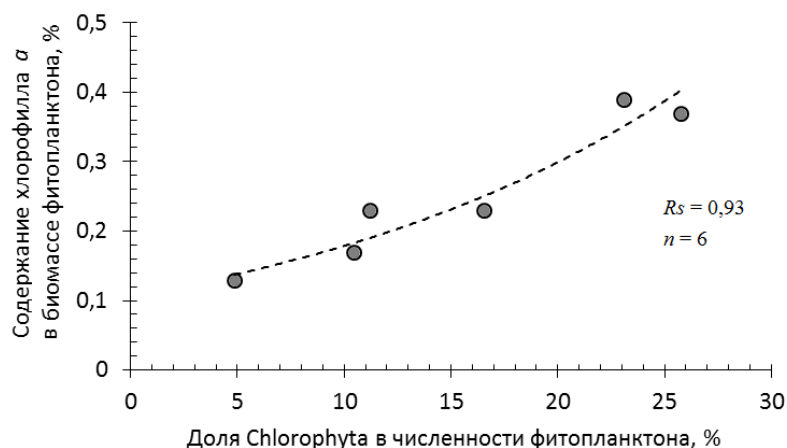


Рис. 2. Зависимость содержания хлорофилла *a* в биомассе фитопланктона от доли зеленых водорослей в альгоценозах Кондопожской губы Онежского озера в августе 2021 г.

Fig. 2. Dependence of chlorophyll *a* content in phytoplankton biomass on the proportion of green algae in algocenoses of the Kondopoga Bay of Lake Onego in August 2021

Такая связь закономерна, хотя принято считать, что содержание хлорофилла в биомассе планктона в большей степени зависит от биомассы зеленых водорослей, чем от их численности. Клетки этой группы фитопланктона в 4–5 раз богаче хлорофиллом, чем, например, диатомовые или цианобактерии [18]. Отсутствие связи с долей зеленых в биомассе, вероятно, связано с тем, что небольшие размеры клеток этой группы определяют значительно меньший вклад в биомассу, чем в численность. Так, от 30 до 80 % клеток зеленых водорослей имели размер менее 100 (в том числе и менее 20) мкм. При этом их вклад в численность фитопланктона составлял 2–20 %, а в его биомассу – лишь 0,2–2,6 % (см. табл. 1). Особенно это несоответствие проявляется на фоне в целом небольшого представительства зеленых водорослей в альгоценозах Кондопожской губы в период исследований.

Скорость фотосинтеза в поверхностном слое воды изученных участков Кондопожской губы не превышала 150–330 мкг С/л·сут и находилась преимущественно в границах олиготрофных экосистем (см. табл. 3). Лишь на двух станциях вблизи форелевых садков она достигала нижней границы мезотрофного состояния (см. рис. 1, табл. 3). Наименьшая величина была отмечена на ст. К_6, наиболее удаленной от форелевых хозяйств и выпуска сточных вод, наибольшая – на ст. KF2 в районе форелевых садков. В целом в период исследований центральная глубоководная часть Кондопожской губы (ст. K50 и К_6) по величинам фотосинтеза сохраняла олиготрофное состояние (см. табл. 2), как это было показано предыдущими исследованиями [19, 20]. Лишь в расчете на м² фотического слоя воды первичная продукция в пелагиали центрального района залива достигала мезотрофного уровня за счет в 2

раза более высокой прозрачности воды и, соответственно, более мощного фотического слоя по сравнению со ст. К_3 в вершинной части залива (см. табл. 2). На ст. К_3 даже интегральная первичная продукция характеризовала этот участок как олиготрофный, в то время как в 2000–2010 гг. величины фотосинтеза достигали мезотрофного уровня [19, 20]. Наиболее высокие величины интегральной первичной продукции, как и в верхнем слое воды, были в районе форелевых садков на ст. KF2 – 721 мг С/м²·сут (см. табл. 3). На этой же станции в зимний период 2022 г. был обнаружен дефицит кислорода в нижних слоях воды до 6 % насыщения, концентрации фосфатов достигали 787 мкг/л [5], что представляет непосредственную угрозу вторичного эвтрофирования. В районе расположения форелевых садков первично-продукционные исследования в 2000–2010 гг. не проводились, а в августе 2021 г. по величинам продукции фитопланктона этот участок залива был мезотрофным.

Величины Р/В-коэффициентов (см. табл. 3) находились в пределах, свойственных для пресных водоемов умеренных широт, не испытывающих значительного антропогенного прессинга [10, 21, 22]. Как и фотосинтез, САЧ и Р/В-коэффициенты на данном этапе функционирования экосистемы Кондопожской губы не отражали высокую продуктивность единицы хлорофилла или биомассы, хотя абсолютные значения этих показателей существенно возросли по сравнению с 2000–2010 гг. [7]. На явное биогенное загрязнение могут указывать Р/В-коэффициенты больше 2 сут⁻¹ [21].

Распределение скорости фотосинтеза на изученной акватории (см. табл. 3) в целом соответствовало распределению численности микроводорослей в поверхностном слое воды: максимальные

значения наблюдались на ст. KF2 и KF4, минимальное – на ст. К_6 (см. табл. 1). Это подтвердил регрессионный анализ, который показал значимую

зависимость величин фотосинтеза от численности фитопланктона (рис. 3).

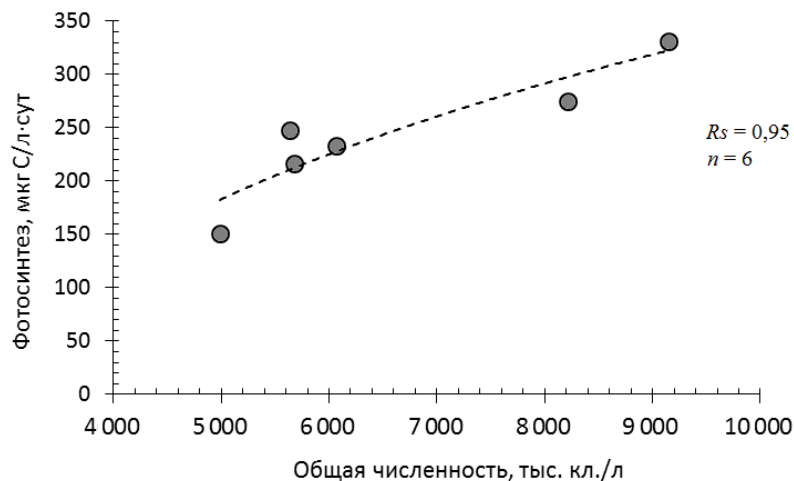
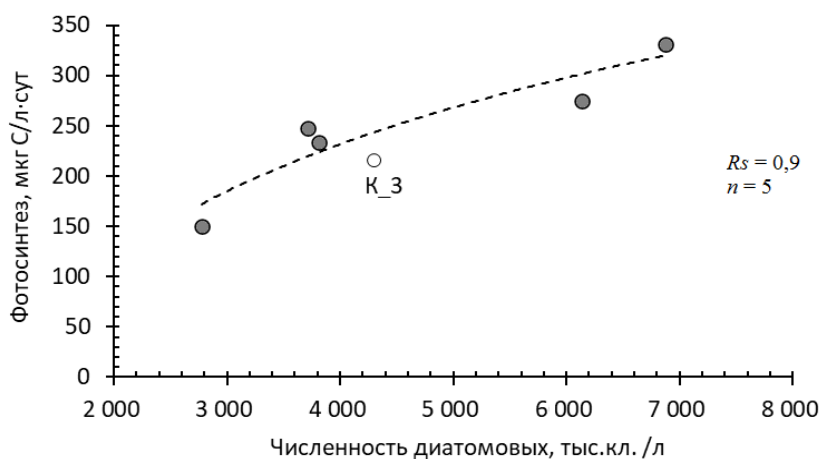


Рис. 3. Зависимость фотосинтеза от численности фитопланктона в Кондопожской губе Онежского озера в августе 2021 г.

Fig. 3. The dependence of photosynthesis on the number of phytoplankton in the Kondopoga Bay of Lake Onego in August 2021

Ранговый коэффициент корреляции Спирмена составил 0,95, $n = 6$, $p < 0,05$. В то же время связи фотосинтеза с биомассой фитопланктона и концентрацией хлорофилла *a*, который может считаться косвенным показателем биомассы, не было обнаружено. Основу альгоценозов в изученных участках Кондопожской губы составляют диатомовые,

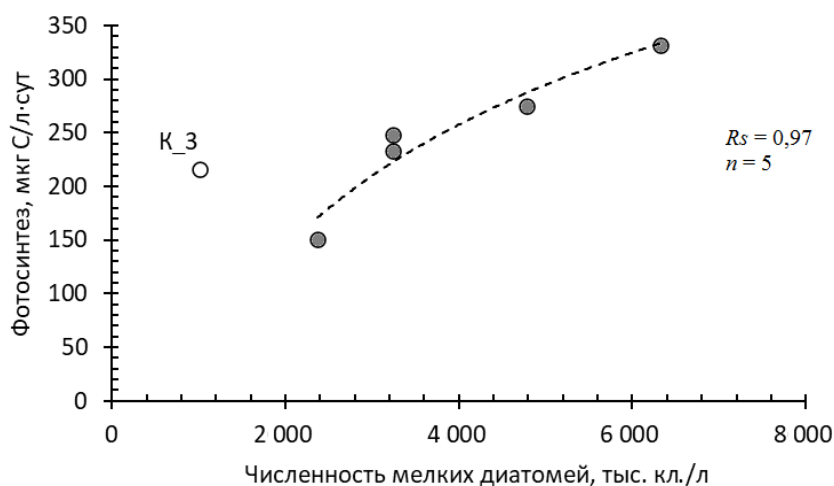
зеленые водоросли и цианобактерии. Количество золотистых водорослей не превышает 3,5 % в численности фитопланктона, остальных групп – менее 1 %. Статистический анализ выявил достоверную связь фотосинтеза только с численностью диатомовых водорослей для пяти станций, за исключением ст. К_3 (рис. 4, *a*).



a

Рис. 4. Зависимость фотосинтеза от общей численности диатомового планктона (*a*) в Кондопожской губе Онежского озера в августе 2021 г.

Fig. 4. The dependence of photosynthesis on the total number of diatom plankton (*a*) in the Kondopoga Bay of Lake Onego in August 2021



б

Рис. 4 (окончание). Зависимость фотосинтеза от численности мелкоклеточных диатомей (б) в Кондопожской губе Онежского озера в августе 2021 г.

Fig. 4 (ending). The dependence of photosynthesis on the number of small-cell diatoms (б) in the Kondopoga Bay of Lake Onego in August 2021

Коэффициент Спирмена составил 0,9 при $p < 0,05$, $n = 5$. Выявленную зависимость можно объяснить тем, что при доминировании диатомовых в альгоценозах на всех изученных станциях (56–76 % в численности и 80–93 % в биомассе) (см. табл. 1) на ст. К50, К_6, KF1, KF2 и KF4 в этой группе преобладают небольшие клетки ($V < 600$ мкм). Эта размерная фракция представлена видами *Asterionella formosa* Hass., *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Nawort., *A. italica* (Ehrenb.) Simonsen и *A. italica var. curvata*, которые составляли от 78 до 92 % численности всех диатомей (см. табл. 3). В целом вклад небольших диатомей в общую численность фитопланктона достигал 39–69 % (см. табл. 1). В то же время в биомассу бóльший вклад вносят крупные диатомовые. Как известно, с уменьшением размера клетки увеличивается скорость оборота биомассы [23]. Регрессионный анализ подтвердил, что интенсивность фотосинтеза на ст. К50, К_6, KF1, KF2 и KF4 определяется количеством мелких клеток диатомовых водорослей, коэффициент Спирмена составил 0,97 при $p < 0,05$, $n = 5$ (см. рис. 4, б).

Иная ситуация наблюдалась на ст. К_3, где доля клеток размером менее 600 мкм составляла около 24 % в численности диатомовых, а в общей численности фитопланктона – лишь 9 % (см. табл. 3). Учитывая, что доля наиболее продуктивных зеленых водорослей в общей численности фитопланктона ст. К_3, как и на других изученных станциях, тоже невелика (см. табл. 3), фотосинтез в этом участке губы определялся крупными представителями диа-

томей, которые вносят меньший вклад в численность, но большой – в биомассу фитопланктона. Так, на ст. К_3 диатомей размером больше 600 мкм составляли 75 % численности и 92 % биомассы диатомового комплекса и 57 и 86 % всего фитопланктонного сообщества соответственно. Из 17 видов крупных диатомей на ст. К_3 наибольший вклад и по численности, и по биомассе вносили *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simonsen ($V = 1\,038$ мкм) и большие формы *F. crotonensis* ($V = 2\,061$ мкм). Такая структура альгоценоза объясняет невысокую скорость фотосинтеза на ст. К_3, тогда как ранее этот район всегда был наиболее продуктивным участком Кондопожской губы вследствие непосредственного влияния на него сточных вод ЦБК.

Возможно, что причиной небольшой численности мелкоклеточных диатомей на ст. К_3 могло быть выедание. Как правило, вода в этом участке залива содержит больше органического вещества и взвеси, чем на остальной акватории, из-за влияния на ее химический состав сточных вод, кроме того, хорошо прогревается вследствие небольшой глубины. Такие условия благоприятны для развития коловраток, крупные формы которых, например р. *Asplanchna*, способны питаться даже относительно крупными диатомовыми и динофитовыми водорослями [24–26].

Заключение

Таким образом, исследования фотосинтетической активности фитопланктона в период его «вспышки» в Кондопожской губе Онежского озера в авгу-

сте 2021 г. выявили невысокие величины фотосинтеза, Р/В-коэффициентов и САЧ. Такое несоответствие свидетельствует о начальном этапе эвтрофирования центральной части Кондопожской губы, где расположены форелевые садки. При увеличении биогенной нагрузки в первую очередь происходят увеличение количественных показателей развития фитопланктона и структурная перестройка сообщества. Дефицит кислорода в зимний период обнаружен

только в одном ограниченном глубоководном участке в районе форелевых садков на ст. KF2 [4] и пока не может быть источником вторичного биогенного загрязнения в целом для залива. Улучшение экологической ситуации в Кондопожской губе в настоящее время вполне возможно при снижении мощности товарного производства форели, использования высококачественного рыбного корма, перемещения садков и тому подобных мероприятий.

Список источников

1. Озера Карелии: справ. Петрозаводск: Изд-во Карельск. науч. центра РАН, 2013. 464 с.
2. Киуру Т., Виелма Й. и др. Экологический справочник для рыбной промышленности Северо-Запада России. Хельсинки: Nykypaino, 2013. 112 с.
3. Карта рыбных хозяйств // Ассоциация форелеводо-в Карелии. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozajstv> (дата обращения: 28.02.2024).
4. Свидетельство о гос. регистрации баз данных № 2021620975. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища) / И. А. Литвинова, Н. М. Калинин, Е. В. Теканова, Е. М. Макарова, А. Н. Ефимова; 17.05.2021.
5. Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года // Тр. Карельск. науч. центра РАН. 2022. № 6. С. 76–87.
6. Теканова Е. В., Литвинова И. А. Деструкция органического вещества в Кондопожской губе Онежского озера при изменении антропогенной нагрузки // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 719–727.
7. Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинин Н. М. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях садкового выращивания форели // Трансформация экосистем. 2024. Т. 7. № 1. С. 177–195.
8. Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
9. Бульон В. В. Радиоуглеродный метод определения первичной продукции, его возможности и ограничения в сравнении с кислородным методом // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 14–20.
10. Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
11. SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water. Paris: UNESCO, 1966. 66 p.
12. Кузьмин Г. В. Фитопланктон // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. С. 73–84.
13. Федоров В. Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. М.: Наука, 1979. 166 с.
14. Tikkanen T. Kasviplanktonopas. Helsinki: Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy, 1986. 277 p.
15. Freshwater algae of North America. Ecology and Classification. San Diego: Elsevier Inc. Academic Press, 2015. 962 p.
16. Свидетельство о государственной регистрации баз данных № 2015620274. Планктон пелагиали Онежского озера / М. Т. Сярки, Е. В. Теканова, Т. А. Чекрыжева; 13.02.2015.
17. Теканова Е. В., Калинин Н. М., Макарова Е. М., Смирнова В. С. Современное трофическое состояние и качество воды Онежского озера // Биология внутренних вод. 2023. № 6. С. 740–746.
18. Елизарова В. А. Хлорофилл как показатель биомассы фитопланктона // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 126–131.
19. Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 74–82.
20. Теканова Е. В., Калинин Н. М., Смирнова В. С. Реконструкция величин фотосинтеза в Онежском озере по концентрации хлорофилла *a* // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2023. № 1. С. 45–54.
21. Михеева Т. М. О показателях удельной активности фитопланктона и некоторых причинах, их определяющих // Гидробиол. журн. 1977. Т. 13. № 3. С. 11–16.
22. Трифонова И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 184 с.
23. Гутельмахер Б. Л. Метаболизм планктона как единого целого. Л.: Наука, 1986. 155 с.
24. Монаков А. В. Питание пресноводных беспозвоночных. М.: Изд-во Россельхозакадемии, 1998. 320 с.
25. Лазарева В. И. Сезонный цикл развития и питание хищных коловраток рода *Asplanchna* в Рыбинском водохранилище // Биология внутренних вод. 2004. № 4. С. 59–68.
26. Стойко Т. Г., Сенкевич (Бурдова) В. А., Мазей Ю. А. Изменение численности и питание коловраток рода *Asplanchna* (Eurotatoria, Rotifera) в пруду (бассейн р. Сура) // Поволж. эколог. журн. 2016. № 3. С. 312–319.

References

1. *Ozera Karelii: spravochnik* [Lakes of Karelia. Guide]. Petrozavodsk, Izd-vo Karels. nauch. centa RAN, 2013. 464 p.
2. Kiuru T., Vielma J. I dr. *Ekologicheskij spravochnik dlya rybovodnoj promyshlennosti Severo-Zapada Rossii* [Ecological handbook for the fish farming industry of the North-West of Russia]. Hel'sinki, Nykypaino, 2013. 112 p.
3. Karta rybnyh hozyajstv [Map of fish farms]. *Associaciya forelevodov Karelii*. Available at: <http://kareliatrout.ru/karta->

rybnyh-hozyajstv (accessed: 28.02.2024).

4. Litvinova I. A., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Makarova E. M., Efimova A. N. *Antropogennaya nagruzka i bioindikaciya sostoyaniya Onezhskogo ozera (Verkhne-Svirskogo vodohranilishcha)* [Anthropogenic load and bioindication of the state of Lake Onega (Verkhne-Svirsky reservoir)]. Svidetel'stvo o gos. registracii baz dannyh № 2021620975; 17.05.2021.
5. Galahina N. E., Zobkov M. B. *Gidrohimicheskie issledovaniya v rajone raspolozheniya forelevykh hozyajstv v Kondopozhskoj gube Onezhskogo ozera v zimnij period 2022 goda* [Hydrochemical studies in the area of trout farms in the Kondopoga bay of Lake Onega in the winter of 2022]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*, 2022. no. 6, pp. 76-87.
6. Tekanova E. V., Litvinova I. A. *Destrukciya organicheskogo veshchestva v Kondopozhskoj gube Onezhskogo ozera pri izmenenii antropogennoj nagruzki* [Destruction of organic matter in the Kondopoga bay of Lake Onega with a change in anthropogenic load]. *Vodnye resursy*, 2022, vol. 49, no. 6, pp. 719-727.
7. Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. *Fitoplankton kak indikator sostoyaniya ekosistemy Kondopozhskoj guby Onezhskogo ozera v usloviyah sadkovogo vyrashchivaniya foreli* [Phytoplankton as an indicator of the state of the ecosystem of the Kondopoga Bay of Lake Onega in the conditions of trout hatchery]. *Transformaciya ekosistem*, 2024, vol. 7, no. 1, pp. 177-195.
8. Kuznecov S. I., Dubinina G. A. *Metody izucheniya vodnyh mikroorganizmov* [Methods of studying aquatic microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 288 p.
9. Bul'on V. V. *Radiouglerodnyj metod opredeleniya pervichnoj produkcii, ego vozmozhnosti i ogranicheniya v sravnenii s kislorodnym metodom* [Radiocarbon method for determining primary products, its capabilities and limitations in comparison with the oxygen method]. *Metodicheskie voprosy izucheniya pervichnoj produkcii planktona vnutrennih vodoemov*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993. Pp. 14-20.
10. Bul'on V. V. *Pervichnaya produkcija planktona vnutrennih vodoemov* [Primary production of plankton of inland reservoirs]. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 150 p.
11. *SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water*. Paris, UNESCO, 1966. 66 p.
12. Kuz'min G. V. *Fitoplankton* [Phytoplankton]. *Metodika izucheniya biogeocenzov vnutrennih vodoemov*. Moscow, Nauka Publ., 1975. Pp. 73-84.
13. Fedorov V. D. *O metodah izucheniya fitoplanktona i ego aktivnosti* [Methods of studying phytoplankton and its activity]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 166 p.
14. Tikkanen T. *Kasviplanktonopas*. Helsinki, Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy, 1986. 277 p.
15. *Freshwater algae of North America. Ecology and Classification*. San Diego, Elsevier Inc. Academic Press, 2015. 962 p.
16. Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. *Plankton pelagiali Onezhskogo ozera* [Plankton of the pelagic Lake Onega]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii baz dannyh № 2015620274; 13.02.2015.
17. Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Makarova E. M., Smirnova V. S. *Sovremennoe troficheskoe sostoyanie i kachestvo vody Onezhskogo ozera* [The current trophic state and water quality of Lake Onega]. *Biologiya vnutrennih vod*, 2023, no. 6, pp. 740-746.
18. Elizarova V. A. *Hlorofill kak pokazatel' biomassy fitoplanktona* [Chlorophyll as an indicator of phytoplankton biomass]. *Metodicheskie voprosy izucheniya pervichnoj produkcii planktona vnutrennih vodoemov*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993. Pp. 126-131.
19. Timakova T. M., Kulikova T. P., Litvinova I. A., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. *Izmenenie biocenozov Kondopozhskoj guby Onezhskogo ozera pod vliyaniem stochnyh vod cellyulozno-bumazhnogo kombinata* [Changes in biocenoses of the Kondopoga Bay of Lake Onega under the influence of wastewater from a pulp and paper mill]. *Vodnye resursy*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 74-82.
20. Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Smirnova V. S. *Rekonstrukciya velichin fotosinteza v Onezhskom ozere po koncentracii hlorofilla a* [Reconstruction of photosynthesis values in Lake Onega by chlorophyll a concentration]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo*, 2023, no. 1, pp. 45-54.
21. Miheeva T. M. *O pokazatelyah udel'noj aktivnosti fitoplanktona i nekotoryh prichinah, ih opredelyayushchih* [On the indicators of specific activity of phytoplankton and some of the reasons that determine them]. *Gidrobiologicheskij zhurnal*, 1977, vol. 13, no. 3, pp. 11-16.
22. Trifonova I. S. *Ekologiya i sukcesiya ozernogo fitoplanktona* [Ecology and succession of lake phytoplankton]. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 184 p.
23. Gutel'maher B. L. *Metabolizm planktona kak edinogo celogo* [Metabolism of plankton as a whole]. Leningrad, Nauka Publ., 1986. 155 p.
24. Monakov A. V. *Pitanie presnovodnykh bespozvonochnykh* [Nutrition of freshwater invertebrates]. Moscow, Izd-vo Rossel'hozokademii, 1998. 320 p.
25. Lazareva V. I. *Sezonnyj cikl razvitiya i pitanie hishchnykh kolovratok roda Asplanchna v Rybinskom vodohranilishche* [The seasonal cycle of development and nutrition of predatory rotifers of the genus Asplanchna in the Rybinsk reservoir]. *Biologiya vnutrennih vod*, 2004, no. 4, pp. 59-68.
26. Stojko T. G., Senkevich (Burdova) V. A., Mazej Yu. A. *Izmenenie chislennosti i pitanie kolovratok roda Asplanchna (Eurotatoria, Rotifera) v prudu (bassejn r. Sura)* [Changes in the number and nutrition of rotifers of the genus Asplanchna (Eurotatoria, Rotifera) in the pond (Sura river basin)]. *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal*, 2016, no. 3, pp. 312-319.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 27.11.2024
The article was submitted 27.03.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 27.11.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Валентиновна Теканова – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии; Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук; etekanova@mail.ru

Наталья Михайловна Калинин – доктор биологических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории гидробиологии; Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук; cerioda@mail.ru

Валерия Сергеевна Смирнова – младший научный сотрудник лаборатории гидробиологии; Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук; smirnovalera24@yandex.ru

Elena V. Tekanova – Candidate of Biological Sciences; Senior Researcher of the Laboratory of Hydrobiology; Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences; etekanova@mail.ru

Nataliia M. Kalinkina – Doctor of Biological Sciences; Leading Researcher of the Laboratory of Hydrobiology; Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences; cerioda@mail.ru

Valeria S. Smirnova – Junior Researcher of the Laboratory of Hydrobiology; Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences; smirnovalera24@yandex.ru

