

Научная статья  
УДК 556.55:581.132(282.247.211)  
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-45-54>  
EDN OBVMEX

## Реконструкция величин фотосинтеза в Онежском озере по концентрации хлорофилла *a*

*Елена Валентиновна Теканова*<sup>✉</sup>,  
*Наталья Михайловна Калинкина, Валерия Сергеевна Смирнова*

*Институт водных проблем Севера  
Карельского научного центра Российской академии наук,  
Петрозаводск, Россия, etekanova@mail.ru*<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Фотосинтез фитопланктона в Онежском озере измерялся в 1989–2006 гг. Для пополнения сведений о первичной продукции в последующие годы предпринята попытка расчета фотосинтеза по суточным ассимиляционным числам и концентрации хлорофилла *a*, измеренной в 2007–2021 гг. Суточные ассимиляционные числа рассчитывались по одновременно измеренным фотосинтезу и хлорофиллу в 1989–2006 гг. для разных районов и сезонов лимнически сложного водоема. Для оценки возможности использовать полученные ассимиляционные числа для восстановления величин фотосинтеза выполнен сравнительный статистический анализ размерно-структурных характеристик фитопланктона в 1989–2006 и 2007–2021 гг. Сравнение среднеценотического объема клетки и соотношения диатомовых и более мелких недиадомовых водорослей показало их сходство в оба периода на основной акватории озера. Лишь в центральном участке Кондопожской губы, который с 2000-х гг. находится под влиянием биогенной нагрузки от форелевых хозяйств, заметно уменьшился средний объем клетки и сократилась доля диатомового планктона. Для этого участка фотосинтез не рассчитывался. Рассчитанные ассимиляционные числа были сходными практически на всей акватории озера. Максимальные суточные значения наблюдались летом с медианами от 11,8 до 18,4 мкг С/мкг Chl в разных участках водоема. В Кондопожской губе, которая в течение обоих периодов исследования испытывает биогенную нагрузку сточных вод целлюлозно-бумажного комбината, их медианные значения летом достигали 40,3 и 29,6 мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> в вершинной и внешней частях соответственно. По хлорофиллу *a*, измеренному в 2007–2021 гг., и рассчитанным ассимиляционным числам удалось восстановить 197 значений фотосинтеза в поверхностном слое воды разных районов Онежского озера в разные сезоны.

**Ключевые слова:** Онежское озеро, восстановление значений, фотосинтез, хлорофилл *a*, суточные ассимиляционные числа, концентрация, фитопланктон

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

**Для цитирования:** Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Смирнова В. С. Реконструкция величин фотосинтеза в Онежском озере по концентрации хлорофилла *a* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2023. № 1. С. 45–54. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-45-54>. EDN OBVMEX.

Original article

## Reconstruction of photosynthesis values in Lake Onego by chlorophyll *a* concentration

*Elena V. Tekanova*<sup>✉</sup>, *Nataliia M. Kalinkina, Valeria S. Smirnova*

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences,  
Petrozavodsk, Russia, etekanova@mail.ru*<sup>✉</sup>

**Abstract.** Phytoplankton photosynthesis in Lake Onego was measured in 1989-2006. An attempt was made to calculate photosynthesis by daily assimilation numbers and chlorophyll *a* concentration measured in 2007-2021 to supplement data on the primary production. Daily assimilation numbers were calculated by simultaneously measured photosynthesis and chlorophyll in 1989-2006 for different areas and seasons of a limnically complex water body. A comparative statistical analysis of the size-structural characteristics of phytoplankton in 1989-2006 and 2007-2021 was performed to assess the possibility of using the obtained assimilation numbers to restore photosynthesis values. Comparison of the average cell volume for the phytocenosis and the ratio of diatoms and smaller non-diatoms showed their similarity in both periods in the main water area of the lake. Only in the central sector of Kondopoga Bay, which has

been influenced by biogenic loads from the trout farms since the 2000s, the average cell volume decreased significantly and the proportion of diatom plankton also decreased. Photosynthesis was not calculated for this sector. The calculated assimilation numbers were similar for almost the entire water area of the lake. The maximum daily values were observed in summer with medians from 11.8 to 18.4  $\mu\text{g C}/\mu\text{g Chl}$  in different parts of the water body. In Kondopoga Bay, which during both study periods was experiencing a biogenic load of wastewater from the pulp and paper mill, their median values in summer reached 40.3 and 29.6  $\mu\text{g C}/\mu\text{g Chl day}^{-1}$  in the top and open parts, respectively. It was possible to restore 197 values of photosynthesis by chlorophyll *a* measured in 2007–2021 and by the calculated assimilation numbers in the surface water layer of different areas in Lake Onego in different seasons.

**Keywords:** Lake Onego, values recovery, photosynthesis, chlorophyll *a*, daily assimilation numbers, concentration, phytoplankton

**Acknowledgment:** the study was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Water Problems of the North, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Smirnova V. S. Reconstruction of photosynthesis values in Lake Onego by chlorophyll *a* concentration. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2023;1:45-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-45-54>. EDN OBVMEX.

### Введение

Продукция фитопланктона определяет биопродуктивность, в том числе и рыбопродуктивность водоема. Существует прямая связь между первичной продукцией и рыбопродуктивностью. Принято считать, что продукция фитопланктона составляет около 1/3 рыбопродуктивности водоема, а возможный вылов рыбы без ущерба для сообщества не должен превышать 0,2 % от первичной продукции в озерах [1–3]. В Онежском озере первичная продукция определялась в 1989–2006 гг. Ориентировочные расчеты потенциальных уловов и рыбопродукции по первичной продукции, выполненные для этого периода, показали хорошую сопоставимость результатов, хотя потенциальные уловы и оказались несколько выше реальных [4]. Это вполне объяснимо, т. к. сведения о реальных уловах, полученные в контролирующих организациях, не учитывают непромышленные виды вылова.

В современных условиях динамики антропогенной нагрузки на Онежское озеро [5–7] и последствий потепления климата в северо-западном регионе России [8–11] необходимо понимание тенденций и скорости трансформации его экосистемы с точки зрения водохозяйственной ценности и биопродуктивности водоема. Этого можно достичь путем разностороннего анализа многолетних данных о биотической компоненте Онежского озера, в том числе и о первичной продукции.

Ставя конечной целью выявление возможных многолетних изменений биопродуктивности Онежского озера, задачей настоящей работы было пополнение данных о фотосинтезе фитопланктона за период 2007–2021 гг. по хлорофиллу *a*.

### Материал и методы

Для расчетов суточных ассимиляционных чисел (САЧ) по соотношению фотосинтеза и хлорофилла были использованы одновременно измеренные величины фотосинтеза (радиоуглеродный метод) и концентрации хлорофилла *a* (спектрофотометрический метод) в поверхностном слое воды Онежского озера в 1989–2006 гг. из зарегистрированных баз данных Карельского научного центра РАН [12, 13]. Концентрации хлорофилла *a* в 2007–2021 гг. для

расчета величин фотосинтеза измерялись самостоятельно спектрофотометрическим методом [14].

Учитывая лимническую неоднородность Онежского озера [15, 16], САЧ рассчитывалось для разных районов озера (рис. 1).

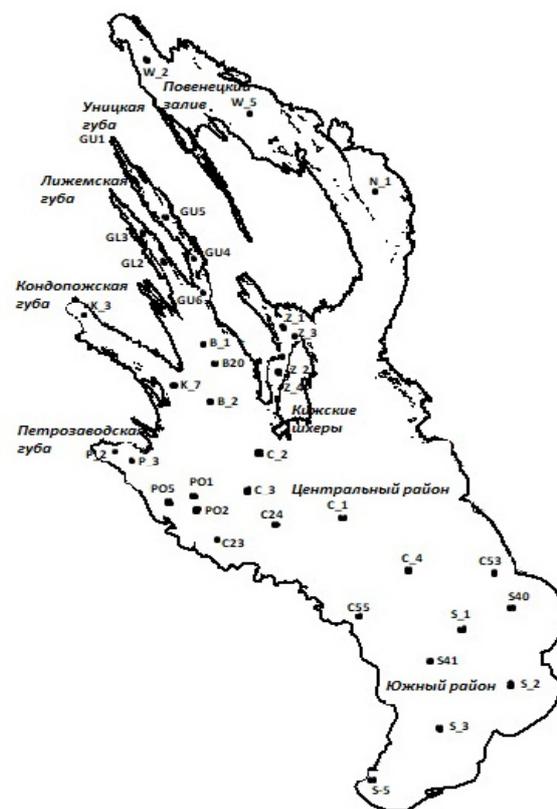


Рис. 1. Карта-схема Онежского озера со станциями отбора проб воды

Fig. 1. Map of Lake Onego with water sampling stations

Для учета сезонности в развитии планктона в каждом районе, по возможности, оценивались весенние, летние и осенние величины САЧ. В условиях длительного прохождения термобара в Онежском озере [17] сезонные фазы в развитии планктона

в прибрежных и центральных участках озера наступают в разное время, поэтому критерием для организации выборки данных для разных сезонов служила температура воды. Ранневесенний период был ограничен значениями температуры воды 4,5 °С. Поздневесенняя и летняя фазы были объединены в один летний период, который был ограничен температурой воды 10 °С (конец августа). Данные за сентябрь и октябрь были отнесены к осенним.

Показатели фитопланктона с 1989 по 2010 г. взяты из зарегистрированной базы данных Карельского научного центра РАН [12]. В последующие годы фитопланктон собирался и изучался самостоятельно под микроскопом при увеличении × 400 по общепринятой методике. Таксономическая идентификация проводилась по определителям [18, 19]. Биомасса определялась из индивидуальных объемов клеток.

### Результаты исследования

В основе расчетов лежит общеизвестная закономерная связь между хлорофиллом *a* и фотосинтезом фитопланктона, которая выражается в ассимиляционном числе – количестве ассимилированного органического углерода на 1 мкг хлорофилла. По концентрации хлорофилла *a* и САЧ можно рассчитать скорость фотосинтеза. Величина САЧ не зависит от обилия фитопланктона или хлорофилла, на нее могут оказывать влияние размерно-структурные харак-

теристики фитопланктона. Мелкие клетки водорослей отличаются большей удельной скоростью метаболизма, чем крупные [20]. Изменение структуры сообщества может происходить под влиянием внешних факторов (температура, биогенные вещества), поэтому, прежде чем использовать САЧ за 1989–2006 гг. для реконструкции величин фотосинтеза по хлорофиллу в 2007–2021 гг., был выполнен сравнительный анализ среднеценотического объема клетки и структуры сообщества фитопланктона в эти периоды. Были выбраны районы озера, для которых имеются наиболее репрезентативные наборы данных по состоянию фитопланктона – центральный район, Кондопожская и Петрозаводская губа.

**Сравнительный анализ размерно-структурных характеристик фитопланктона в 1989–2006 и 2007–2021 гг.** Основу сообщества фитопланктона Онежского озера составляют доминирующий крупноклеточный диатомовый комплекс, а также зеленые, золотистые водоросли и цианобактерии [21, 22], которые, как правило, характеризуются небольшими размерами.

В процессе сравнения среднего объема клетки фитопланктона в 1989–2006 и 2007–2021 гг. с использованием критерия Манна – Уитни в центральном районе (табл. 1) и Петрозаводской губе (табл. 2) не было обнаружено достоверных различий между выборками ни весной, ни летом.

Таблица 1

Table 1

**Среднеценотический объем клетки фитопланктона (мкм<sup>3</sup>) в центральном районе Онежского озера и значимость различий по критерию Манна – Уитни при  $p < 0,05$**

**Mean coenotic cell volume of phytoplankton (μm<sup>3</sup>) in the central region of Lake Onego and the significance of differences according to the Mann–Whitney test at  $p < 0.05$**

Сезон	Показатель*	1989–2006 гг.	2007–2021 гг.	<i>p</i>
Весна	<i>Me ± m</i>	5 269,1	2 482,9	0,99
	<i>Min–Max (n)</i>	1 688,8–10 592,1 (4)**	1 879,8–4 833,7 (3)	
	<i>CV, %</i>	–	–	
Лето	<i>Me ± m</i>	1 033,2 ± 313,3	1 024,4 ± 384,3	0,5
	<i>Min–Max (n)</i>	156,9–2 037,4 (5)	199,4–2 790,9 (10)	
	<i>CV, %</i>	8	18	

\**Me ± m* – медиана и ее ошибка; *n* – величина выборки; *Min–Max* – минимальное и максимальное значение показателя; *CV* – коэффициент вариации; *p* – уровень значимости различий; \*\* в скобках указана величина выборки.

Таблица 2

Table 2

**Среднеценотический объем клетки фитопланктона (мкм<sup>3</sup>) в Петрозаводской губе Онежского озера и значимость различий по критерию Манна – Уитни при  $p < 0,05$**

**Mean coenotic cell volume of phytoplankton (μm<sup>3</sup>) in Petrozavodsk Bay of Lake Onego and significance of differences according to the Mann–Whitney test at  $p < 0.05$**

Сезон	Показатель	1989–2006 гг.	2007–2021 гг.	<i>p</i>
Весна	<i>Me ± m</i>	2 732,1 ± 555,9	1 692,7	0,30
	<i>Min–Max (n)</i>	1 138,0–5 173,0 (7)	836,4–4 338,0 (4)	
	<i>CV, %</i>	16	–	
Лето	<i>Me ± m</i>	926,6 ± 304,0	667,4	0,47
	<i>Min–Max (n)</i>	305,8–2 692,9 (11)	390,5–1 133,7 (4)	
	<i>CV, %</i>	21	–	

Изменения доли диатомовых и более мелких недиадомовых (зеленых, золотистых и цианобактерий) водорослей в биомассе сообщества в цен-

тральном районе озера (табл. 3) и Петрозаводской губе (табл. 4) были менее 20 % и не приводили к изменению среднего объема клетки.

Таблица 3

Table 3

Доли диатомовых и недиадомовых водорослей в биомассе фитопланктона в центральном районе Онежского озера, %

Parts of diatoms and non-diatoms in phytoplankton biomass in the central region of Lake Onego, %

Сезон	Фитопланктон	1989–2006 гг.	2007–2021 гг.
Весна	Диатомовый	98,1 (4)	87,0 (5)
	Недиатомовый	1,7 (4)	6,4 (5)
Лето	Диатомовый	76,8 (5)	57,6 (7)
	Недиатомовый	19,3 (5)	37,2 (7)

Таблица 4

Table 4

Доли диатомовых и недиадомовых водорослей в биомассе фитопланктона в Петрозаводской губе Онежского озера, %

Parts of diatoms and non-diatoms in phytoplankton biomass in Petrozavodsk Bay of Lake Onego, %

Сезон	Фитопланктон	1989–2006 гг.	2007–2021 гг.
Весна	Диатомовый	76,6 (8)	88,6 (4)
	Недиатомовый	15,0 (8)	2,45 (4)
Лето	Диатомовый	81,6 (11)	66,3 (4)
	Недиатомовый	14,2 (11)	26,5 (4)

Это дало основание использовать САЧ, рассчитанное для периода 1989–2006 гг., для реконструкции фотосинтеза по хлорофиллу, измеренному в 2007–2021 гг.

Кондопожская губа Онежского озера около 40 лет находится под влиянием биогенной нагрузки сточ-

ных вод Кондопожского ЦБК, расположенного в ее вершинной части [6, 15]. В вершинном и внешнем участках залива не было выявлено различий между среднеценотическим объемом клетки в 1989–2006 и 2007–2021 гг. ни весной, ни летом (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

Среднеценотический объем клетки фитопланктона ( $\mu\text{м}^3$ ) в Кондопожской губе Онежского озера и значимость различий по критерию Манна – Уитни при  $p < 0,05$

Mean coenotic volume of phytoplankton cells ( $\mu\text{м}^3$ ) in Kondopoga Bay of Lake Onego and significance of differences according to the Mann–Whitney test at  $p < 0.05$

Сезон	Показатель	1989–2006 гг.	2007–2021 гг.	$p$
Вершинный участок				
Лето	$Me \pm m$	1 177,3 $\pm$ 214,6	1 202,3 $\pm$ 206,0	0,90
	$Min-Max (n)$	287,7–4 422,4 (19)	517,9–3 209,7 (11)	
	$CV, \%$	30	21	
Центральный участок				
Весна	$Me \pm m$	2 998,0 $\pm$ 597,9	1 436,1 $\pm$ 417,7	0,005*
	$Min-Max (n)$	2 051,0–4 458,6 (6)	432,6–1 945,6 (6)	
	$CV, \%$	12	12	
Лето	$Me \pm m$	540,4 $\pm$ 199,6	576,0 $\pm$ 134,0	0,55
	$Min-Max (n)$	281,2–2 128,1 (9)	141,8–1 189,0 (18)	
	$CV, \%$	15	27	
Внешний участок				
Весна	$Me \pm m$	3 592,4	2 938,2	0,82
	$Min-Max (n)$	1 645,8–4 456,3 (4)	2 299,8–3 576,6 (2)	
	$CV, \%$	–	–	
Лето	$Me \pm m$	827,1 $\pm$ 167,7	1 993,7	0,13
	$Min-Max (n)$	42,6–2 645,0 (8)	1 314,1–3 654,7 (3)	
	$CV, \%$	15	–	

\* Различия между среднеценотическим объемом клетки в 1989–2006 и 2007–2021 гг. достоверны.

Изменение соотношения диатомового и недиа-  
томового фитопланктона в этих участках весной

и летом не превышало 5 % (табл. 6).

Таблица 6

Table 6

**Доли диатомовых и недиадомовых водорослей в биомассе фитопланктона  
в Кондопожской губе Онежского озера, %**

**Parts of diatoms and non-diatoms in phytoplankton biomass  
in Kondopoga Bay of Lake Onego, %**

Сезон	Фитопланктон	1989–2006 гг.	2007–2021 гг.
Вершинная часть			
Лето	Диатомовый	88,8 (17)	85,1 (12)
	Недиатомовый	9,1 (17)	12,2 (12)
Центральная часть			
Весна	Диатомовый	97,8 (6)	96,2 (6)
	Недиатомовый	0,4 (6)	2,4 (6)
Лето	Диатомовый	77,4 (9)	35,8 (18)
	Недиатомовый	19,2 (9)	44,9 (18)
Внешняя часть			
Весна	Диатомовый	99,1 (4)	95 (2)
	Недиатомовый	0,3 (4)	2,4 (2)
Лето	Диатомовый	80,7 (7)	78 (3)
	Недиатомовый	14,0 (7)	19 (3)

Стабильное состояние фитопланктона в вершинной и внешних частях Кондопожской губы позволило использовать САЧ, рассчитанное в 1989–2006 гг., для реконструкции фотосинтеза по хлорофиллу, измеренному в 2007–2021 гг.

В наибольшей степени изменилась структура фитопланктона в центральной части Кондопожской губы. В весенний период 2007–2021 гг. среднеценотический объем клетки стал в 2 раза меньше, чем в 1989–2006 гг. (см. табл. 5). Достоверность этого снижения подтверждается критерием Манна – Уитни. Хотя летом достоверного снижения среднего объема клетки не было выявлено (см. табл. 5), в сообществе на 41 % снизилась доля диатомовых водорослей и на 26 % увеличилась доля недиадомового фитопланктона (см. табл. 6). Можно предположить, что в этой части залива происходят направленные преобразования фитопланктона, возможно, связанные с увеличением биогенной нагрузки в центральной части залива из-за деятельности садковых форелевых ферм в прибрежной зоне с 2000-х гг. [5, 7]. В связи с этим невозможно использование САЧ, рассчитанного для центрального участка Кондопожской губы в 1989–2006 гг., для реконструкции величин фотосинтеза в 2007–2021 гг.

**Реконструкция величин фотосинтеза в поверхностном слое воды центрального района Онежского озера за 2007–2021 гг. по хлорофиллу *a*.** Выборка одновременно измеренных концентраций

хлорофилла *a* и фотосинтеза в ранневесенний период 1989–2006 гг. составила 11 пар данных на ст. *B\_1, B\_2, C\_1, C\_2, C\_3, C55* (см. рис. 1). Коэффициент корреляции Спирмена между показателями составил 0,62 ( $p < 0,05$ ). Рассчитанные САЧ в ранневесенний период изменялись в пределах 3,0–32,3 мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> ( $CV = 21 \%$ ), медианное значение САЧ составило  $11,3 \pm 3,3$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>. Такие характеристики удельного фотосинтеза свидетельствовали о низкой ассимиляционной активности хлорофилла в термоинертной зоне открытого плеса Онежского озера. Медиана САЧ была использована для реконструкции 10 ранневесенних величин фотосинтеза на ст. *C\_1, C\_3, B\_1, PO2, PO5* в центральном плесе озера в 2007–2021 гг. (см. рис. 1).

В выборку данных для расчета САЧ в летний период 1989–2006 гг. вошли 10 пар величин фотосинтеза и хлорофилла на ст. *B\_1, B20, C\_1, C\_2, C\_3, C23* (см. рис. 1). Ранговый коэффициент корреляции Спирмена между двумя показателями составил 0,63 ( $p < 0,05$ ). Величины САЧ в весенне-летний период изменялись от 8,9 до 34,8 мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> ( $CV = 18 \%$ ). Медианное значение САЧ  $14,9 \pm 3,4$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> было использовано для реконструкции 47 значений фотосинтеза по концентрации хлорофилла в летний период 2007–2021 гг. в центральной части Онежского озера на ст. *C\_1, C\_2, C\_3, C\_4, C24, B\_1, B\_2, PO1, PO2* (см. рис. 1, 2).

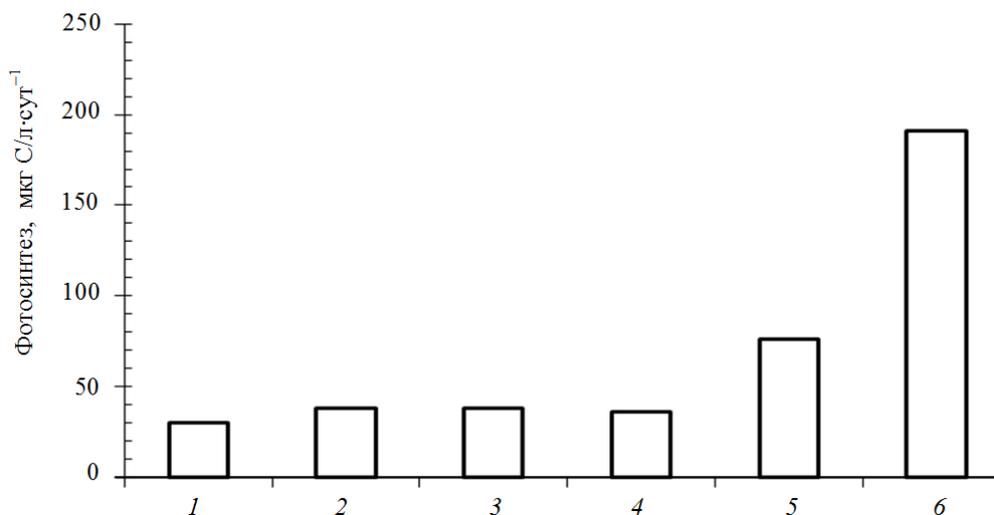


Рис. 2. Медианные значения реконструированных величин фотосинтеза в разных районах Онежского озера в летний период 2007–2021 гг.: 1 – Петрозаводская губа; 2 – Повенецкий залив, Уницкая губа, Кизи; 3 – Центральный район; 4 – Южный район; 5 – внешняя часть Кондопожской губы; 6 – вершинная часть Кондопожской губы

Fig. 2. Median values of the reconstructed values of photosynthesis in different areas of Lake Onego in the summer period of 2007–2021: 1 – Petrozavodsk Bay; 2 – Povenets Bay, Unitskaya Bay, Kizhi; 3 – Central region; 4 – Southern region; 5 – outer part of Kondopoga Bay; 6 – upper part of Kondopoga Bay

Для осеннего периода 1989–2006 гг. парных данных по концентрации хлорофилла и фотосинтезу не имелось. В этом случае для восстановления осенних величин фотосинтеза по хлорофиллу за 2007–2021 гг. использовали САЧ, полученное для ранневесеннего периода. Критерием правильности реконструкции служило сравнение расчетных величин фотосинтеза за 2007–2021 гг. с реально измеренными осенью 1989–2006 гг. [12]. Было реконструировано 16 осенних значений фотосинтеза за период 2007–2021 гг. в центральной части озера на ст. *C\_1*, *C\_2*, *C\_3*, *C\_4*, *C53*, *C55*, *B\_1*, *PO2* (см. рис. 1).

**Реконструкция величин фотосинтеза в поверхностном слое воды Кондопожской губы Онежского озера за 2007–2021 гг. по хлорофиллу *a*.** Кондопожская губа испытывает нагрузку сточных вод целлюлозно-бумажного комбината, находящегося в ее вершинной части, поэтому этот участок губы характеризуется более высоким трофическим статусом, чем остальные части залива [15, 23]. Реконструкция величин фотосинтеза за 2007–2021 гг. была выполнена для вершинного (ст. *K\_3*) и открытого (ст. *K\_7*) районов залива, где размерно-структурные характеристики фитопланктона не изменились (см. рис. 1).

**Вершинная часть Кондопожской губы (ст. *K\_3*).** Ранневесенние измерения фотосинтеза и хлорофилла отсутствуют, т. к. в неглубокой вершинной части губы весенний прогрев воды после схода льда происходит очень быстро. Коэффициент корреляции Спирмена между летними величинами фотосинтеза и хлорофилла при температуре воды более 10 °С достигал 0,83 ( $p < 0,05$ ,  $n = 6$ ). Антропогенная нагрузка

биогенными веществами определяла более высокие, чем в центральной части озера, САЧ, которые находились в пределах 26,9–54,8 мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$  ( $CV = 12\%$ ). С использованием медианного значения САЧ  $40,3 \pm 7,5$  мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$  на ст. *K\_3* было реконструировано 14 значений фотосинтеза за 2007–2021 гг. (см. рис. 2).

Для осеннего периода 1989–2006 гг. имелось лишь одно парное измерение хлорофилла и фотосинтеза на станции *K\_3*. Рассчитанный по этим данным САЧ составил 3,9 мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$ , что в 10 раз ниже медианы САЧ в летний период. С использованием осеннего САЧ были восстановлены три значения фотосинтеза на ст. *K\_3* за сентябрь и октябрь 2007–2021 гг.

**Внешняя часть Кондопожской губы (ст. *K\_7*).** Для ст. *K\_7* в 1989–2006 гг. было 4 парных измерения величин фотосинтеза и хлорофилла в летний период. Переделы изменчивости САЧ летом составили 18,7–48,8 мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$  ( $CV = 8\%$ ). Медианное значение САЧ было равно 29,6 мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$ , что на 40 % ниже, чем в вершинной части Кондопожской губы. С использованием этого САЧ было восстановлено 12 летних значений фотосинтеза за 2007–2021 гг. (см. рис. 2).

В ранневесенний и осенний периоды 1989–2006 гг. на ст. *K\_7* было выполнено лишь по одному парному измерению хлорофилла и фотосинтеза – в мае и октябре соответственно. Величина САЧ на ст. *K\_7* весной составила 9,3 мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$ , по ней была восстановлена одна величина весеннего фотосинтеза в 2021 г. Осеннее значение САЧ составило 3,5 мкг С/мкг  $\text{Chl} \cdot \text{сут}^{-1}$ , по нему были

рассчитаны три значения фотосинтеза в осенний период 2007–2021 гг.

**Реконструкция величин фотосинтеза в поверхностном слое воды Петрозаводской губы Онежского озера за 2007–2021 гг. по хлорофиллу *a*.** Параллельные исследования фотосинтеза и хлорофилла *a* в 1989–2006 гг. в Петрозаводской губе проводились на двух станциях, *P*<sub>2</sub> и *P*<sub>3</sub>. Однородность выборок оценивалась по критерию Манна – Уитни. Выборки на ст. *P*<sub>2</sub> и *P*<sub>3</sub> позволяли сравнить САЧ отдельно в поздневесенний (температура воды 4–10 °С) и летний периоды (температура воды более 10 °С). Статистический анализ САЧ показал, что поздней весной ( $n = 3$  для ст. *P*<sub>2</sub>,  $n = 4$  для ст. *P*<sub>3</sub>) и летом ( $n = 4$  для ст. *P*<sub>2</sub>,  $n = 4$  для ст. *P*<sub>3</sub>) выборки были однородны. Уровень значимости различий для весны составил 0,86, а для лета – 0,72, поэтому САЧ для поздневесеннего и летнего сезонов в Петрозаводской губе рассчитывались по объединенной выборке.

В Петрозаводской губе, в отличие от других районов озера, отсутствовала значимая корреляция между показателями фотосинтеза и хлорофилла *a*. Это может быть связано с высокой динамикой водных масс из-за большого стокового течения р. Шуи, множества разнонаправленных ветровых течений, перемешивания речных и озерных вод вследствие большой открытости залива и пр. [24, 25]. Тем не менее, расчет медианных значений САЧ выявил их относительно невысокую изменчивость, что проявилось в небольших величинах ошибки и коэффициента вариации. Поздней весной САЧ изменялось в диапазоне 7,0–30,5 мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> ( $CV = 16\%$ ), медианное значение составило  $21,5 \pm 6,1$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>. В летний период величины САЧ были достоверно ниже по критерию Манна – Уитни ( $p = 0,04$ ), чем весной. Летом САЧ находились в пределах 5,6–19,9 ( $CV = 15\%$ ) при медиане  $10,3 \pm 0,6$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>. По поздневесеннему значению САЧ на станциях *P*<sub>2</sub> и *P*<sub>3</sub> было реставрировано 17 величин фотосинтеза, по летнему – 17 величин за 2007–2021 гг. (см. рис. 2).

Поскольку в осенний период 1989–2006 гг. в Петрозаводской губе не было парных измерений фотосинтеза и хлорофилла для расчета САЧ, для реставрации осенних величин фотосинтеза в 2007–2021 гг. были использованы САЧ для летнего периода. Основанием для этого послужило сопоставление расчетных осенних величин фотосинтеза с реальными, полученными в осенний период 1989–2006 гг. Таким образом, для осеннего периода 2007–2021 гг. было восстановлено 8 значений фотосинтеза.

**Реконструкция величин фотосинтеза фитопланктона в поверхностном слое воды северных заливов Онежского озера и Кижских шхер за 2007–2021 гг. по хлорофиллу *a*.** Для Лижемской, Уницкой губ, Повенецкого залива, Кижских шхер имеются лишь единичные (до трех) парные измерения фотосинтеза и хлорофилла только в летний

период 1989–2006 гг. Рассчитанные летние САЧ для Уницкой губы (ст. *GU5*), Повенецкого залива (ст. *N*<sub>1</sub>, *W*<sub>2</sub>, *W*<sub>5</sub>), Кижских шхер (ст. *Z*<sub>2</sub>, *Z*<sub>3</sub>) (см. рис. 1) варьируют в небольших пределах – от 8,6 до 14,8 мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> ( $CV = 12\%$ ). Поэтому для этих трех районов было рассчитано единое медианное значение  $11,8 \pm 1,2$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>, которое использовали для реконструкции 28 летних значений фотосинтеза в Уницкой губе (ст. *GU1*, *GU2*, *GU4*, *GU6*), Повенецком заливе (ст. *N*<sub>1</sub>, *W*<sub>2</sub>, *W*<sub>5</sub>), Кижских шхерах (ст. *Z*<sub>1</sub>, *Z*<sub>2</sub>, *Z*<sub>3</sub>, *Z*<sub>4</sub>) в период 2007–2021 гг. (см. рис. 1, 2).

В Лижемской губе (ст. *GL2*, *GL3*) (см. рис. 1) средняя величина САЧ летом (по двум значениям) составила  $18,4$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>, что было выше верхнего предела, установленного для Уницкой губы, Повенецкого залива и Кижских шхер, поэтому восстановление величины фотосинтеза по единственному значению хлорофилла на ст. *GL3* (см. рис. 1) летом 2007 г. в Лижемской губе выполнили с использованием САЧ, рассчитанного отдельно для этого залива.

**Реконструкция величин фотосинтеза в поверхностном слое воды Южного Онега за 2007–2021 гг. по хлорофиллу *a*.** В Южном Онего в период 1989–2006 гг. было выполнено 6 одновременных измерений фотосинтеза и хлорофилла только в летний период на станциях *S*<sub>2</sub>, *S*<sub>3</sub>, *S40* и *S41* (см. рис. 1). Коэффициент корреляции Спирмена между этими параметрами составил 0,83 ( $n = 6$ ,  $p < 0,05$ ). Величины САЧ находились в пределах 12,3–27,3 мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> ( $CV = 8\%$ ). Медианное значение САЧ, которое использовали для реставрации летних величин фотосинтеза в 2007–2021 гг., составило  $15,7 \pm 1,6$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>. Всего было восстановлено 12 летних значений для станций *S*<sub>1</sub> и *S*<sub>2</sub> (см. рис. 1, 2).

Несколько ниже, чем в целом для Южного Онего, оказались величины САЧ летом 1989–2006 гг. в мелководном участке этого района у истока р. Свирь (ст. *S*<sub>5</sub>) (см. рис. 1). По трем парным измерениям фотосинтеза и хлорофилла средняя величина САЧ составила  $9,6$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup> и была использована для реставрации 3 величин фотосинтеза на ст. *S*<sub>5</sub> в летний период 2007–2021 гг.

Ранневесенние и осенние значения фотосинтеза в Южном Онего в 2007–2021 гг. были восстановлены с помощью САЧ, рассчитанного для этих сезонов в Центральном Онего, –  $11,3$  мкг С/мкг Chl·сут<sup>-1</sup>. При этом исходили из того, что открытый плес озера в целом представляет собой единую водную массу со сходным составом фитопланктона и уровнем его функционирования [21, 22, 26]. Было восстановлено 6 весенних и осенних значений фотосинтеза в Южном Онего для станций *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub> и *S*<sub>3</sub>.

## Заключение

Сравнительный анализ размерно-структурных характеристик фитопланктона в Онежском озере показал их сходство в 1989–2006 гг. и 2007–2021 гг. на основной акватории озера, за исключением участка Кондопожской губы, который с 2000-х гг. находится под влиянием дополнительной биогенной нагрузки от форелевых хозяйств. Для районов озера с не изменившимися размерно-структурными характеристиками фитопланктона рассчитаны величины САЧ в разные сезоны 1989–2006 гг. Летние САЧ были сходными практически на всей акватории озера, за исключением Кондопожской губы, где их увеличение определялось антропогенной фосфорной нагрузкой от сточных вод Кондопожского

целлюлозно-бумажного комбината. По концентрации хлорофилла *a* в Онежском озере и рассчитанным САЧ удалось восстановить 197 значений фотосинтеза в поверхностном слое воды разных районов водоема в разные сезоны в 2007–2021 гг. На основной акватории водоема в летний период выявлен сходный уровень фотосинтеза фитопланктона, за исключением эвтрофированной Кондопожской губы. В настоящее время многолетние данные о фотосинтезе Онежского озера охватывают период с 1989 по 2021 гг. Это позволит продолжить анализ многолетних тенденций развития экосистемы водоема, прогнозировать изменения биопродуктивности озера и его рыбопродуктивности в современных условиях изменения климата и антропогенной нагрузки.

## Список источников

1. Бульон В. В., Винберг Г. Г. Соотношение между первичной продукцией и рыбопродуктивностью водоемов // Основы изучения пресноводных экосистем. Л.: Наука, 1981. С. 5–10.
2. Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
3. Hakanson L., Boulion V. V. Regularities in Primary Production, Secchi Depth and Fish Yield and a New System to Define Trophic and Humic state Indices for Lake Ecosystems // Internat. Rev. Hydrobiol. 2001. V. 86, no. 1. P. 23–62.
4. Теканова Е. В. Первичная продукция – основа формирования кормовой базы // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 36–43.
5. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Вод. хоз-во России. 2017. № 1. С. 4–18.
6. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021620975. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища) / И. А. Литвинова, Н. М. Калинкина, Е. В. Теканова, Е. М. Макарова, А. Н. Ефимова; 17.05.2021.
7. 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.
8. Назарова Л. Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Изв. Рус. геогр. о-ва. 2017. Т. 149, вып. 5. С. 16–24.
9. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // Изв. РАН. Сер. географическая. 2019. Т. 83, № 1. С. 62–72.
10. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Изв. РАН. Сер. географическая. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899.
11. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // J. of Great Lakes Res. 2020. V. 46, iss. 4. P. 850–861.
12. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620274. Планктон пелагиали Онежского озера / М. Т. Сярки, Е. В. Теканова, Т. А. Чекрыжева; 13.02.2015.
13. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2018621068. Хлорофилл «а» в воде Онежского озера / А. В. Сабылина, Е. В. Теканова, Н. М. Калинкина; 13.06.2018.
14. SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water. Paris: UNESCO, 1966. 66 p.
15. Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. 293 с.
16. Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling. Chichester: Springer, 2010. 302 p.
17. Петров М. П. Термический режим // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 32–37.
18. Freshwater Algae of North America. Ecology and Classification. Can Diego: Elsevier, 2015. 962 p.
19. Tikkanen T. Kasviplanktonopas. Helsinki: Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy, 1986. 277 p.
20. Гутельмахер Б. Л. Метаболизм планктона как единого целого. Л.: Наука, 1986. 155 с.
21. Вислянская И. Г. Структура и динамика биомассы фитопланктона // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С. 46–158.
22. Чекрыжева Т. А. Таксономическая и экологическая характеристика фитопланктона Онежского озера // Тр. Карел. науч. центра РАН. 2012. № 1. С. 56–69.
23. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
24. Литинская К. Д. Гидрология Петрозаводской губы Онежского озера как источника водоснабжения г. Петрозаводска // Вопр. гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Карел. книж. изд-во, 1965. Вып. 23. С. 5–25.
25. Пирожкова Г. П. Гидрохимический режим Петрозаводской губы // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во Карел. фил. АН СССР, 1981. С. 92–123.

26. Tekanova Ye. V., Timakova T. M. Assessment of the current trophic state of Lake Onega by primary production

of phytoplankton // Hydrobiological Journal. 2007. V. 43, no. 5. P. 87–90.

## References

1. Bul'on V. V., Vinberg G. G. Sootnoshenie mezhdu pervichnoi produktsiei i ryboproduktivnost'iu vodoemov [Correlation between primary production and fish productivity of reservoirs]. *Osnovy izucheniia presnovodnykh ekosistem*. Leningrad: Nauka Publ., 1981. Pp. 5-10.
2. Kitaev S. P. *Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznykh prirodnykh zon* [Ecological bases of bioproduktivnosti of lakes in different natural zones]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 207 p.
3. Hakanson L., Boulion V. V. Regularities in Primary Production, Secci Depth and Fish Yield and a New System to Define Trophic and Humic state Indices for Lake Ecosystems. *Internat. Rev. Hydrobiol.*, 2001, vol. 86, no. 1, pp. 23-62.
4. Tekanova E. V. Pervichnaia produktsiia – osnova formirovaniia kormovoi bazy [Primary production as basis for developing forage base]. *Bioresursy Onezhskogo ozero*. Petrozavodsk Izd-vo KarNTs RAN, 2007. Pp. 36-43.
5. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Siarki M. T. Ekosistema Onezhskogo ozero: reaktsiia vodnykh soobshchestv na antropogennye faktory i klimaticheskie izmeneniia [Ecosystem of Lake Onega: response of aquatic communities to anthropogenic factors and climate change]. *Vodnoe khoziaistvo Rossii*, 2017, no. 1, pp. 4-18.
6. Litvinova I. A., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Makarova E. M., Efimova A. N. *Antropogennaia nagruzka i bioindikatsiia sostoiianiia Onezhskogo ozero (Verkhne-Svirskogo vodokhranilishcha)* [Anthropogenic load and bioindication of state of Lake Onega (Upper Svir Reservoir)]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh No. 2021620975; 17.05.2021.
7. Tekanova E. V., Litvinova I. A. Destruktsiia organicheskogo veshchestva v Kondopozhskoi gube Onezhskogo ozero pri izmenenii antropogennoi nagruzki [Destruction of organic matter in Kondopoga Bay of Lake Onega with change in anthropogenic load]. *Vodnye resursy*, 2022, vol. 49, no. 6, pp. 719-727.
8. Nazarova L. E. *Sovremennye klimaticheskie usloviia vodosbora Belogo moria* [Modern climatic conditions of White Sea catchment]. *Izvestiia Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2017, vol. 149, iss. 5, pp. 16-24.
9. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. *Izmeneniia gidrokhimicheskogo rezhima Onezhskogo ozero s nachala 1990-kh godov* [Changes in hydrochemical regime of Lake Onega since early 1990s]. *Izvestiia RAN. Seriiia geograficheskaiia*, 2019, vol. 83, no. 1, pp. 62-72.
10. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. *Reaktsiia ekosistemy Onezhskogo ozero v vesenne-letnii period na anomal'no vysokuiu temperaturu vozdukha zimy 2019/2020 godov* [Reaction ecosystems of Lake Onega in spring-summer period for abnormally high air temperature in winter of 2019/2020]. *Izvestiia RAN. Seriiia geograficheskaiia*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 888-899.
11. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *J. of Great Lakes Res.*, 2020, vol. 46, iss. 4, pp. 850-861.
12. Siarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. *Plankton pelagiali Onezhskogo ozero* [Plankton of pelagial of Lake Onega]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh No. 2015620274; 13.02.2015.
13. Sabylina A. V., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. *Khlorofill «a» v vode Onezhskogo ozero* [Chlorophyll *a* in water of Lake Onega]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh No. 2018621068; 13.06.2018.
14. SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water. Paris, UNESCO, 1966. 66 p.
15. Onezhskoe ozero. *Ekologicheskie problemy* [Lake Onega. Ecological problems]. Petrozavodsk, Izd-vo KarNTs RAN, 1999. 293 p.
16. Ladoga and Onego – great European Lakes. *Observations and Modeling*. Chichester, Springer, 2010. 302 p.
17. Petrov M. P. *Termicheskii rezhim* [Thermal regime]. *Ekosistema Onezhskogo ozero i tendentsii ee izmeneniia*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. Pp. 32-37.
18. Freshwater Algae of North America. *Ecology and Classification*. Can Diego, Elsvier, 2015. 962 p.
19. Tikkanen T. *Kasviplanktonopas*. Helsinki, Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy, 1986. 277 p.
20. Gutel'makher B. L. *Metabolizm planktona kak edinogo tselogo* [Metabolism of plankton as a whole]. Leningrad, Nauka Publ., 1986. 155 p.
21. Vislianskaia I. G. *Struktura i dinamika biomassy fitoplanktona* [Structure and dynamics of phytoplankton biomass]. *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy*. Petrozavodsk, Izd-vo KarNTs RAN, 1999. Pp. 46-158.
22. Chekryzheva T. A. *Taksonomicheskaiia i ekologicheskaiia kharakteristika fitoplanktona Onezhskogo ozero* [Taxonomic and ecological characteristics of phytoplankton in Lake Onega]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, no. 1, pp. 56-69.
23. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoiianie i izmeneniia ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviiakh* [Largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impacts]. Petrozavodsk, Izd-vo KarNTs RAN, 2015. 375 p.
24. Litinskaia K. D. *Gidrologiia Petrozavodskoi guby Onezhskogo ozero kak istochnika vodosnabzheniia g. Petrozavodsk* [Hydrology of Petrozavodsk Bay of Lake Onega as source of water supply for city of Petrozavodsk]. *Voprosy gidrologii, ozerovedeniia i vodnogo khoziaistva Karelii*. Petrozavodsk, Karel. knizh. izd-vo, 1965. Iss. 23. Pp. 5-25.
25. Pirozhkova G. P. *Gidrokhimicheskii rezhim Petrozavodskoi guby* [Hydrochemical regime of Petrozavodsk Bay]. *Petrozavodskaiia guba Onezhskogo ozero*. Petrozavodsk, Izd-vo Karel. filial AN SSSR, 1981. Pp. 92-123.
26. Tekanova Ye. V., Timakova T. M. Assessment of the current trophic state of Lake Onega by primary production of phytoplankton. *Hydrobiological Journal*, 2007, vol. 43, no. 5, pp. 87-90.

**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

**Elena V. Tekanova** – Candidate of Sciences in Biology; Senior Researcher of the Laboratory of Hydrobiology; Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences; 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

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

**Валерия Сергеевна Смирнова** – инженер-исследователь лаборатории гидробиологии; Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук; smirnovalera24@yandex.ru

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

