

УДК 591.524.12:556.555.4 (282.247.211) «2015/2017»

ЗООПЛАНКТОН ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА, ЕГО ЦЕНТРАЛЬНОГО ПЛЕСА И ЗАЛИВА БОЛЬШОЕ ОНЕГО В РАЗЛИЧНЫЕ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМУ ГОДЫ

М. Т. Сярки, Ю. Ю. Фомина

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия*

Пелагическая планктонная система Онежского озера, его Центрального плеса и залива Большое Онего обладает высокой структурной и динамической устойчивостью. В статье представлена оценка состояния зоопланктона Онежского озера и его сезонной динамики в условиях различных по температурному режиму лет по данным 2015–2017 гг. В этот период основные свойства зоопланктона, его состав, структура и характерные особенности годовой цикличности сохранились, но наблюдалась повышенная пространственно-временная изменчивость, связанная с особенностями термического режима этих лет. В июле 2016 г. отмечены сдвиги в развитии зоопланктона на более ранний период и экстремально высокие, нехарактерные для этого периода показатели (численность 6,2 тыс. экз./м³ и биомасса 0,21 г/м³). Первая декада августа 2015 г. выделялась низким обилием зоопланктона (численность 1,2 тыс. экз./м³ и биомасса 0,03 г/м³), тот же период в 2017 г. характеризовался повышенным его количеством (численность 7,5 тыс. экз./м³ и биомасса 0,17 г/м³). Численность и биомасса зоопланктона в июне и октябре соответствовали среднемноголетнему состоянию с учетом межгодовых колебаний. Появление экстремально отклоняющихся минимальных и максимальных показателей обилия зоопланктона может свидетельствовать о начальных этапах разбалансировки планктонной системы озера в условиях различных по температурному режиму лет.

Ключевые слова: Онежское озеро; температурный режим; пелагический зоопланктон; сезонная динамика; вертикальное распределение.

M. T. Syarki, Yu. Yu. Fomina. ZOOPLANKTON OF LAKE ONEGO IN ITS CENTRAL PART AND BOLSHOE ONEGO BAY IN YEARS WITH DIFFERENT TEMPERATURE COMDITIONS

The pelagic plankton system of Lake Onego, in its central part and Bolshoe Onego Bay, has a high structural and dynamic stability. The purpose of this study was to assess the state of zooplankton in Lake Onego and its seasonal variation in years with different temperature conditions based on data for 2015–2017. The main zooplankton parameters, its composition, structure, and features of the annual cycle have been preserved over this period, but an elevated spatial-temporal variation was observed, associated with the different thermal regimes in these years. In July 2016, zooplankton development shifted to earlier dates and reached extremely high parameters, atypical of this period (abundance of 6,200 ind./m³ and biomass of 0.21 g/m³). The first decade of August 2015 was noted for low amounts of zooplankton (abundance of 1,200 ind./m³ and bio-

mass of 0.03 g/m³), whereas the same period in 2017 was characterized by its elevated amounts (abundance of 7,500 ind./m³ and biomass of 0.17 g/m³). Zooplankton abundance and biomass in June and October corresponded to their long-term averages, taking into account interannual fluctuations. The detection of extremely deviating minimum and maximum zooplankton abundances may indicate that the lake's plankton system is beginning to lose balance in the conditions of temperature differences among years.

Key words: Lake Onego; temperature conditions; pelagic zooplankton; seasonal variation; vertical distribution.

Введение

Климатические колебания в последние десятилетия вызывают заметные изменения в пресноводных экосистемах во всем мире, включая увеличение температуры воды, продолжительности безледоставного периода, «биологического лета», изменения уровня воды, термической стратификации, прозрачности воды [Adrian et al., 2006; Филатов и др., 2012; Hampton et al., 2014]. В Онежском озере отмечена тенденция увеличения безледоставного периода, длительность которого возросла на 20–30 суток [Ефремова, Пальшин, 2017]. Даты перехода температуры поверхности воды через 10 °C сместились на более ранние сроки весной и на более поздние осенью, таким образом, увеличился период «биологического лета» [Филатов и др., 2014].

Зоопланктон, как часть пелагической планктонной системы, является хорошим индикатором ее состояния. Пойкилотермные планктонные организмы чувствительны к температуре воды [Гутельмахер, 1986; Rice et al., 2015], поэтому ее изменения и колебания важны для синхронизации жизненных циклов с сезонными условиями. Воздействие температуры носит сложный комплексный характер и зависит от пространственно-временных масштабов изучаемых процессов. Особенности температурного режима могут проявляться в колебании обилия планктона и его состава [Hampton et al., 2008; Winder et al., 2009], в изменении скорости развития планктонов и их жизненных циклах [Gerten, Adrian, 2002]. Отмечаются также фенологические сдвиги явлений в годовом цикле планктона [Winder, Schindler, 2004; Adrian et al., 2006; Thackeray et al., 2012; Лазарева, Соколова, 2013]. Кроме того, исследования показали, что количественные изменения в зоопланктоне в значительной степени зависят от синоптической ситуации на водоеме во время съемки и в предшествующий период [Куликова и др., 1997; George, 2012].

Анализ сезонных процессов в пелагическом зоопланктоне Центрального плеса и залива

Большое Онего по данным за 1980–2000 гг. показал, что они отличались высокой устойчивостью [Сярки, Чистяков, 2013; Сярки, 2015; Сярки и др., 2015]. В связи с климатическими колебаниями последних лет возникла необходимость оценить современное состояние зоопланктона Онежского озера и его сезонную динамику, что стало целью данной работы.

Материалы и методы

В работе использованы материалы, полученные в рамках выполнения госзадания ИВПС КарНЦ РАН, а также российско-швейцарского мультидисциплинарного проекта «Lake Lado-ga: life under ice interplay of under-ice processes by global change» 2015–2017 гг. и гранта РНФ № 14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние». Также использовались материалы комплексных гидробиологических съемок на Онежском озере 2015 (июнь, август, октябрь), 2016 (июнь, июль) и 2017 (июль, август, октябрь) годов. Были отобраны пробы зоопланктона на трех станциях в Центральном плесе озера (С1, С2 и С3) и на одной станции в заливе Большое Онего (В1) (рис. 1). Глубина станций В1 и С2 варьировала от 75 до 100 м, станций С1 и С3 – 40–60 м (табл. 1). Районы Центрального плеса и глубоководный залив Большое Онего имеют хороший водообмен, сходны по гидротермическому режиму и трофическим характеристикам [Онежское..., 2010]. Период максимального прогрева поверхностного слоя воды в исследуемых районах наступает в первой декаде августа [Онежское..., 2010; Теканова, Сярки, 2015].

Исследованные годы различались по температурному режиму (табл. 2).

Температура воды определялась с помощью глубоководного зонда CastAway. В августе 2015 г. температура поверхностных слоев воды колебалась по станциям от 14,2 до 16,0 °C. Относительно холодная погода в июле этого года сказалась на температуре воды и ее вертикальном профиле (рис. 2). В августе 2017 г. темпе-

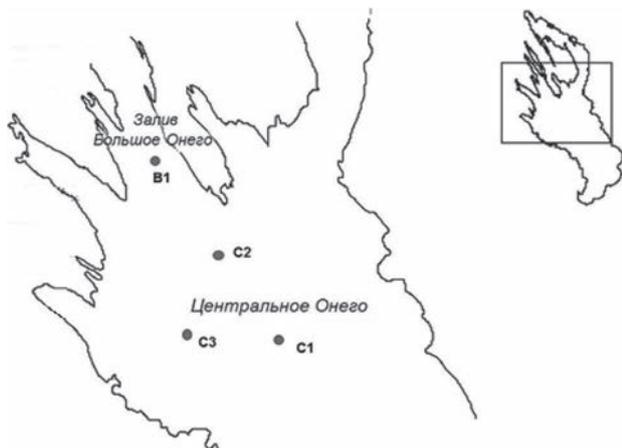


Рис. 1. Карта-схема станций в Центральном плесе и заливе Большое Онего

Fig. 1. The schematic map of stations in the Central part and Bolshoe Onego Bay

Таблица 1. Координаты и средняя глубина станций
Table 1. Coordinates and average depth of stations

Станция Station	Координаты Coordinates	Средняя глубина, м (мин.-макс.) Average depth, m (min-max)
B1	N62°04.186, E34°51.604	80,7 (70–100)
C1	N61°38.205, E35°28.274	56,4 (50–65)
C2	N61°48.044, E35°04.248	77,2 (70–83)
C3	N61°41.937, E34°58.995	40,5 (40–42)

ратура поверхностных слоев воды была выше, чем в 2015 г., и изменялась по станциям от 15,3 до 17,4 °С. Особенностью 2016 г. является раннее начало прогрева воды. Высокие температу-

ры позволили считать июль 2016 г. теплым. Так, в этот период в Центральном плесе вода нагревалась до 18 °С, а в заливе Большое Онего до 20 °С, что превышает среднемноголетние значения на 4–6 °С.

Зоопланктон обрабатывался стандартными методами [Методические..., 1984; Методика..., 2011]. Уловы производились сетью Джеди диаметром 20 см, с газом 100 мкм. На станциях с глубиной от 40 до 100 м облавливались стандартные горизонты (0–5, 5–10, 10–25, 25–50, 50–75 и далее до дна). Пробы фиксировали 4% формалином. Для расчета биомассы применялся параметр индивидуального веса поло-размерно-возрастных групп для массовых видов, вычисленный общепринятым способом [Куликова, Сярки, 1994].

Для анализа амплитуды сезонных и межгодовых колебаний показателей использовалась информация из базы данных «Зоопланктон Онежского озера» [Сярки, Куликова, 2012], в которой собраны данные по зоопланктону Онежского озера с 1988 по 2011 гг. Использовались данные сетных уловов. Траектории среднемноголетней сезонной динамики были получены с помощью метода скользящего среднего в модификации для нерегулярных рядов с шагом в 7 элементов. Индекс Шеннона – Уивера по численности и биомассе вычислялся по показателям зоопланктона в столбе воды.

Результаты

В период наблюдений 2015–2017 гг. в зоопланктоне пелагиали Центрального плеса и за-

Таблица 2. Среднемесячные температуры воздуха за 2015–2017 гг. метеостанции г. Петрозаводска* и среднемесячные температуры воздуха за период 1991–2010 гг. [Назарова, 2014]

Table 2. Average monthly air temperatures for 2015–2017 at the Petrozavodsk meteorological station* and average monthly air temperatures for the period 1991–2010 [Nazarova, 2014]

Месяц Month	1991–2010	2015	2016	2017
Январь January	-8,5	-7,1	-14,9	-7,3
Февраль February	-9,3	-2,7	-2,3	-7,5
Март March	-3,8	0,7	-1,3	-1,0
Апрель April	2,5	2,2	3,5	0,2
Май May	8,5	10,4	12,7	5,0
Июнь June	13,9	14,2	14,2	11,7
Июль July	17,2	14,3	18,5	15,5
Август August	14,9	15,5	15,3	15,9
Сентябрь September	9,8	11,8	10,0	9,8
Октябрь October	3,8	3,5	2,8	3,2
Ноябрь November	-2,5	0,1	-4,3	-0,2
Декабрь December	-6,2	-1,5	-4,6	-1,9
среднее average	3,4	5,1	4,1	3,6

Примечание. *По данным сайта www.RP5.ru.

Note. *According to www.RP5.ru.

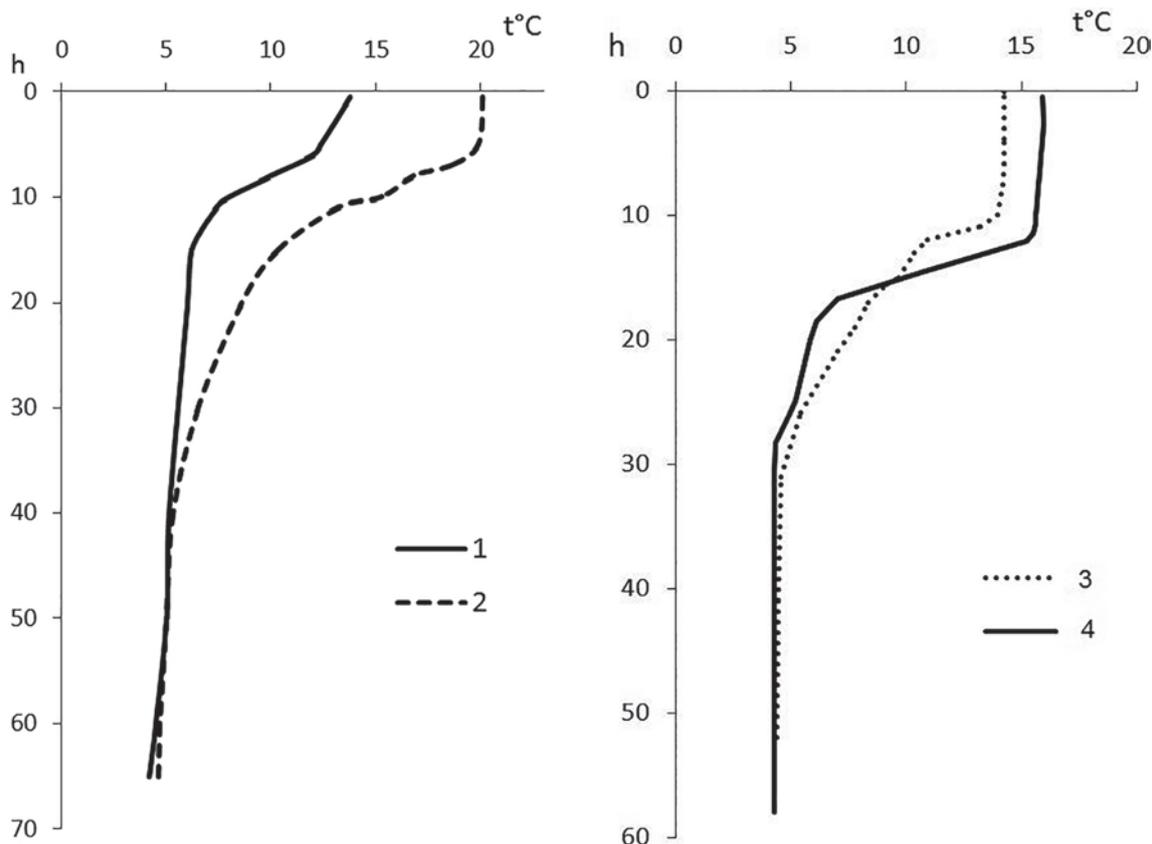


Рис. 2. Температурные профили на станции В1 в июле (слева) и на станции С1 в августе (справа). h – глубина в м:

1 – средний за 1980–2000 гг.; 2 – июль 2016 г.; 3 – август 2015 г.; 4 – август 2017 г.

Fig. 2. Temperature profiles at station B1 in July (left) and station C1 in August (right). h – depth in m:

1 – average for 1980–2000; 2 – July 2016; 2 – August 2015; 4 – August 2017

лива Большое Онего преобладали веслоногие рачки, такие как *Eudiaptomus gracilis* (Sars), *Limnocalanus macrurus* Sars, *Eurytemora lacustris* (Poppe), *Heterocope appendiculata* Sars, *Mesocyclops leuckarti* Claus и *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Cyclops lacustris* Sars. В летний период многочисленными были ветвистоусые: *Daphnia cristata* Sars, *Bosmina coregonii lacustris* Leydig, *Limnosida frontosa* Sars и *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller). Из коловраток в состав доминирующего комплекса входили: *Kellicottia longispina* (Kellicott), *Keratella cochlearis* (Gosse), *Polyarthra dolichoptera* Idelson и *P. major* Burckhardt, *Asplanchna priodonta* Gosse, виды рода *Conochilus* и *Notholca*. В весенний период многочисленными были виды рода *Synchaeta*. В целом видовой состав зоопланктона пелагиали озера и его доминирующего комплекса остается стабильным с 1960-х годов [Смирнова, 1972].

По данным наблюдений 2015–2017 гг., биоразнообразие, оцененное по индексам Шеннона – Уивера, соответствовало ве-

личинам, характерным для зоопланктона 1980–2000 гг. Показатели индекса колебались в июне по численности от 2,63 до 2,90 тыс. экз./м³ и по биомассе от 1,87 до 2,14 г/м². В июле обогащение сообщества летними видами, особенно коловратками, повышает индексы – 3,45–3,71 и 2,70–3,01 соответственно. В августе наблюдается максимальное разнообразие рачкового планктона с индексами в 3,30–3,68 и 2,89–3,55, характерными для олиготрофных пелагических систем. Осенью, в связи с исчезновением тепловодных видов и увеличением доли копепод, индексы снижаются до 2,8 по численности и 2,5 по биомассе.

В период исследований 2015–2017 гг. общая численность зоопланктона изменялась от 0,25 тыс. экз./м³ (14 тыс. экз./м²) до 13 тыс. экз./м³ (760 тыс. экз./м²). Общая биомасса варьировала от 0,004 г/м³ (0,26 г/м²) до 0,35 г/м³ (15 г/м²).

Структура, или соотношение основных таксономических групп, зоопланктона изменялась по сезонам. Каждый период имеет харак-

Таблица 3. Структура сообщества зоопланктона по сезонам (средние проценты основных групп за 2015–2017 гг.)

Table 3. The zooplankton community structure by seasons (average percent of main groups for 2015–2017)

	Численность Abundance (%)			Биомасса Biomass (%)		
	Веслоногие Copepods	Ветвистоусые Cladocera	Коловратки Rotifers	Веслоногие Copepods	Ветвистоусые Cladocera	Коловратки Rotifers
Июнь June	92,4	2,2	5,4	97,1	2,4	0,5
Июль July	40,1	20,2	39,6	44,7	17,1	38,2
Август August	48,0	19,8	32,1	49,1	30,9	20,1
Октябрь October	80,3	9,7	10,0	82,9	10,6	6,5

терные особенности и состав [Куликова и др., 1997; Сярки, 2013] (табл. 3).

На станции С2 в июне в изучаемый период биомассы зоопланктона достигали 0,02 г/м³ (1,43 г/м²), что почти в два раза выше средне-многолетних для этого времени. Это связано с тем, что в начале июня 2015 и 2016 гг. термобар уже прошел, поэтому исследованные станции находились в термоактивной зоне. Обычно же термобар приходит в центральную часть озера 15–20 июня [Онежское..., 2010], поэтому в первой декаде июня станции Центрального плеса и залива Большое Онего находятся в термоинертной зоне с температурой воды 2,5–3,5 °С и среднемноголетняя биомасса зоопланктона в это время, как правило, составляет 0,01 г/м³ (0,81 г/м²).

Структура сообщества в изучаемый период была близка к среднемноголетней (табл. 3). В пелагическом зоопланктоне Центрального плеса и залива Большое Онего во все сезоны годового цикла доминируют веслоногие рачки, что характеризует систему как олиготрофную [Андроникова, 1996].

В период съемки в июле 2016 г. температура поверхностных слоев воды в исследуемых районах достигала 18–20 °С при норме 11–12 °С (рис. 2). В таких благоприятных условиях зоопланктон достиг высоких общих показателей как в Центральном плесе – в среднем по численности 4,5 тыс. экз./м³ (282,9 тыс. экз./м²) и по биомассе 0,17 г/м³ (11,11 г/м²), так и в заливе Большое Онего – 3,9 тыс. экз./м³ (328,4 тыс. экз./м²) и 0,13 тыс. экз./м³ (11,21 тыс. экз./м²) соответственно. Показатели обилия в июле 2016 года оказались выше отмеченных ранее для этого времени по численности в 1,5 раза, по биомассе – в 2–4 раза.

Высокие температуры в июле 2016 г. способствовали активному развитию ветвистоусых рачков, доля которых в верхних слоях уже

достигала 20–30 %. Обычно малочисленный в это время рачок *Daphnia cristata* достигал 19 % общей численности и 26 % биомассы, продолжалось активное развитие популяции, доля молодежи составляла до 70 % численности. Кроме рачка *Daphnia* многочисленными были *Eudiatomus gracilis* и *Thermocyclops oithonoides* (>10 % общей численности по станции).

В августе 2015 г. отмечены низкие количественные показатели, причем в заливе Большое Онего численность и биомасса были достоверно ниже среднемноголетних значений, в Центральном плесе находились в пределах межгодовой изменчивости (табл. 4). В августе 2017 г., напротив, зафиксированы высокие значения численности и биомассы. Преобладание в структуре сообщества по численности и биомассе веслоногих рачков и увеличение доли ветвистоусых по биомассе в 2015 и 2017 гг. (табл. 3) характерно для данного периода.

В осенний период происходит постепенное снижение обилия зоопланктона. Так, в октябре 2015 и 2017 гг. показатели варьировали по численности в пределах 0,2–1,2 тыс. экз./м³ (11,8–95,8 тыс. экз./м²) и по биомассе – 0,003–0,03 г/м³ (0,24–2,14 г/м²). В составе зоопланктона исчезают летние теплолюбивые виды ветвистоусых. Постепенно растет доля веслоногих рачков, и сообщество приближается к зимнему состоянию.

Обсуждение

Для анализа сезонных процессов в планктоне озера удобнее использовать абсолютные величины в столбе воды, которые связаны с продукционно-деструкционными процессами. Но нельзя упускать из виду вертикальную неоднородность показателей зоопланктона, ярко выраженную в условиях летней стратификации вод. Вертикальное распределение продиктовано температурными и трофическими условия-

Таблица 4. Количественные показатели зоопланктона в первой декаде августа 2015 и 2017 гг. и средние за тот же период 1989–2011 гг.

Table 4. Zooplankton quantitative values in the first decade of August 2015 and 2017, and average for the same period 1989–2011

	Численность, тыс. экз./м ² Abundance, th. ind.·m ⁻²			Биомасса, г/м ² Biomass, g·m ⁻²		
	2015 г.	2017 г.	1989–2011 гг.	2015 г.	2017 г.	1989–2011 гг.
Центральный плес Central part	158,8	329,2	300,9 ± 84,3	4,32	8,69	8,13 ± 1,76
Залив Большое Онего Bolshoe Onego Bay	79,4	358,7	323,3 ± 31,8	2,15	9,29	8,54 ± 1,14

ми в эпилимнионе и гиполимнионе, а также биологическими особенностями планктонных животных, их взаимоотношениями и миграциями. Обычно в летний период в слое 0–5 м сосредоточено до 70–80 % общей численности и более 60 % общей биомассы зоопланктона [Куликова и др., 1997; Сярки, 2010].

Чтобы объяснить различия в состоянии зоопланктона в августе 2015 и 2017 гг., был проведен анализ его вертикального распределения. Так, на станции С1 в августе 2017 г. наблюдалось типично летнее состояние (рис. 3). Иная ситуация отмечалась в августе 2015 г. – здесь зафиксировано необычное распределение по вертикали с концентрацией организмов в слое 5–10 м. При этом коловратки и ветвистоусые рачки занимали заметно меньшую долю в сообществе. Интересно, что сходное вертикальное распределение зоопланктона было на всех изученных станциях, в том числе и в заливе Большое Онего, где отмечались минимальные показатели зоопланктона за весь период наблюдений. Возможно, холодная погода в июле 2015 г. затормозила процесс прогрева воды и изменила температурный профиль (рис. 2), и это сказалось на вертикальном распределении зоопланктона и его общем количестве.

Кроме анализа вертикального распределения зоопланктона было выполнено сравнение полученных данных со среднемноголетней сезонной динамикой зоопланктона. В районе исследований сезонная динамика зоопланктона характеризуется высокой степенью воспроизводимости на протяжении многих лет наблюдений. Это связано с большой инертностью водных масс по отношению к внешним факторам воздействия. В предшествующие годы нами были выявлены основные закономерности сезонной динамики зоопланктона в исследуемых районах озера [Куликова и др., 1997; Сярки, Чистяков, 2013; Сярки, 2013, 2015; Сярки и др., 2015]. Наблюдаемые сроки сезонных явлений определяются главным образом температурным фактором, в то время как показатели оби-

лия планктона связаны с трофическими условиями. Анализ с помощью метода аппроксимации выявил, что межгодовая изменчивость сезонной динамики показателей в 2–3 раза меньше внутригодовой изменчивости, и это доказывает высокую устойчивость годового цикла планктона в районе исследования [Сярки и др., 2015].

Наблюдения последних трех лет показали высокую вариабельность зоопланктона в этот период (рис. 4). Общая численность зоопланктона по годам различалась в 7,4 раза (от 79 до 592 тыс. экз./м²), а биомасса – в 5,7 раза (от 2,2 до 12,5 г/м²). Возможно, причиной подобных колебаний является различие термического режима сравниваемых лет.

В последнее десятилетие наблюдается сдвиг весенних явлений. Так, биомассы зоопланктона в первой декаде июня выше, чем в те же сроки в прошлом веке. Можно сравнить реакцию зоопланктона на раннюю весну 2016 и 1989 гг. Весь вегетационный период 1989 г. наблюдались значительные сдвиги сезонных явлений в планктоне на более ранние сроки [Куликова и др., 1997], что сказалось также на продуктивности сообщества. Так, биомасса зоопланктона в июне 1989 г. на станции В1 достигала 1,7 г/м² и была сопоставима с показателями 2015 и 2016 гг.

Реакция зоопланктона на высокую температуру воды в июле 2016 г. имеет сходство с показателями сообщества в июле 2006 г. Тогда наблюдалась высокая численность молодежи рачка *Eudiaptomus gracilis*. В 2016 г. многочисленными были и другие виды рачкового планктона. Интересно, что аналогичная реакция зоопланктона на высокую температуру воды июня–июля 2016 г. отмечалась в том числе и в крупных заливах [Фомина, Сярки, 2018].

Сообщество в августе 2015 г. отличалось низким обилием. По количественным и структурным показателям оно было сходным с состоянием зоопланктона второй половины августа 1995 г. Тогда на станции В1 численность зоопланктона составляла всего 150 тыс. экз./м², а биомасса 6,4 г/м², и это были минимальные

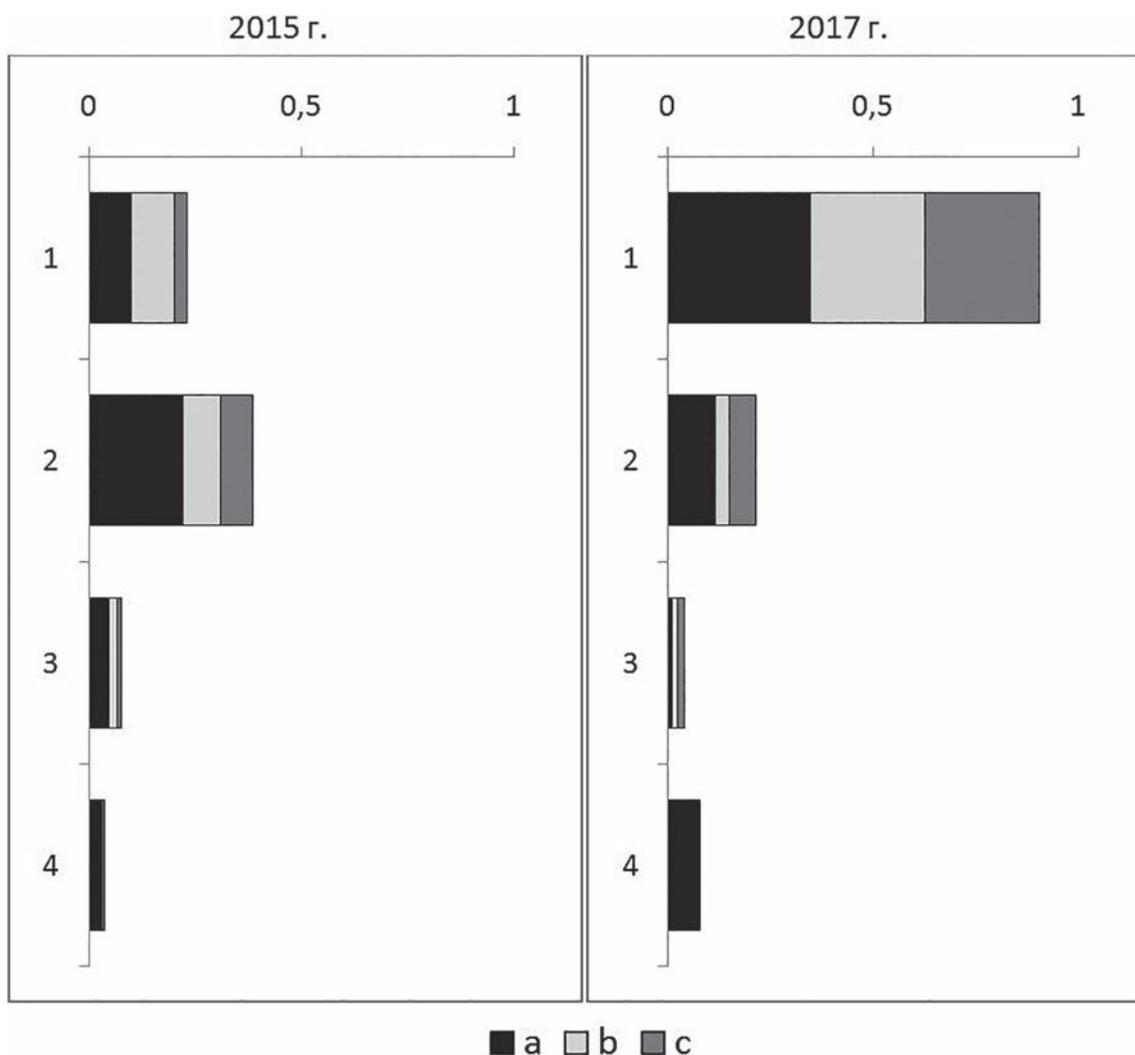


Рис. 3. Вертикальное распределение общей биомассы ($\text{г}/\text{м}^3$) зоопланктона и его основных групп на станции С1 по слоям в августе 2015 и 2017 гг.:

а – веслоногие; b – ветвистоусые; с – коловратки.

Слои: 1 – 0–5 м; 2 – 5–10 м; 3 – 10–25 м; 4 – 25 – дно

Fig. 3. Vertical biomass distribution (g/m^3) of zooplankton and its groups at station C1 by layers in August 2015 and 2017:

a – Copepods; b – Cladocera; c – Rotifers.

Layers: 1 – 0–5 m; 2 – 5–10 m; 3 – 10–25 m; 4 – 25 – bottom

значения для августа за весь период наблюдений. Показатели 2015 года установили новый минимум (общая численность 79 тыс. экз./ м^2 и биомасса 2,2 $\text{г}/\text{м}^2$) на фоне средних для этого периода августа величин в 1980–1990-х годах (соответственно 350 тыс. экз./ м^2 и 10,0 $\text{г}/\text{м}^2$).

Повышенная изменчивость количественных показателей зоопланктона в первой декаде августа последних трех лет может быть вызвана различными причинами. Прежде всего это температурный режим и трофическая ситуация. Низкие показатели 2015 г. могут объясняться задержкой в прогреве воды в июле этого года. Высокие показатели обилия зоопланктона

на станции В1 кроме температуры определяются кормовыми условиями. Отмечаются случаи выноса в акваторию залива Большое Онего сточных вод Кондопожского ЦБК, которые вызывают стохастическую вариабельность показателей планктонных сообществ [Сабылина, 1999; Сярки, Теканова, 2008].

Заключение

Пелагическая планктонная система Центрального плеса и залива Большое Онего обладает высокой структурной и динамической устойчивостью. В 2015–2017 гг. основные

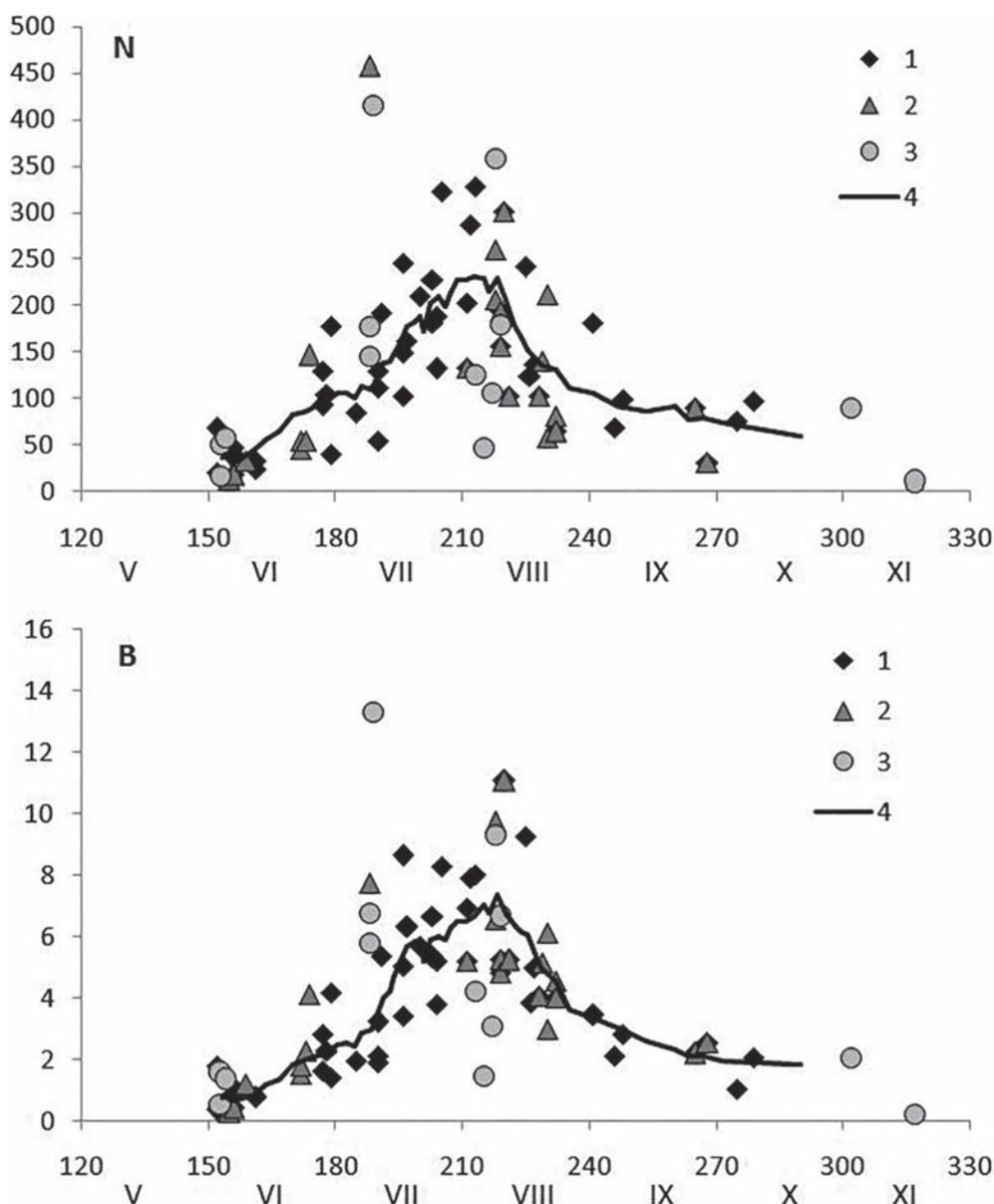


Рис. 4. Сезонное распределение общей численности (N, тыс. экз./м²) и биомассы (B, г/м²) рачкового планктона Центрального плеса и залива Большое Онего в разные периоды:

1 – 1980–1990-е гг.; 2 – 2001–2014 гг.; 3 – данные 2015, 2016 и 2017 гг.; 4 – среднееголетняя траектория сезонной динамики для данных прошлого века

Fig. 4. Seasonal distribution of total abundance (N, th. ind./m²) and biomass (B, g/m²) of crustacean plankton in the Central part and Bolshoe Onego Bay in different periods:

1 – 1980–1990s.; 2 – 2001–2014; 3 – data of 2015, 2016 and 2017; 4 – long-term average annual trajectory of the seasonal dynamics of the last century data

свойства зоопланктона, его состав, структура и характерные особенности годовой цикличности сохранились, но наблюдалась повышенная пространственно-временная изменчивость, связанная с особенностями термического режима этих лет. В июле 2016 г. были отмечены сдвиги на более ранний период в развитии зоопланктона и экстремально высокие, нехарактерные для этого периода показате-

ли (численность 6,2 тыс. экз./м³ и биомасса 0,21 г/м³). Первая декада августа 2015 г. выделялась низким обилием зоопланктона (численность 1,2 тыс. экз./м³ и биомасса 0,03 г/м³), тот же период в 2017 г. характеризовался повышенным его количеством (численность 7,5 тыс. экз./м³ и биомасса 0,17 г/м³). В изученные годы в июне и октябре показатели численности и биомассы зоопланктона соответствовали их

среднемноголетнему состоянию с учетом межгодовых колебаний. Появление экстремально отклоняющихся минимальных и максимальных показателей обилия зоопланктона может свидетельствовать о начальных этапах разбалансировки планктонной системы озера в условиях различных по температурному режиму лет.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

В работе использованы материалы, полученные в рамках выполнения российско-швейцарского мультидисциплинарного проекта «Lake Ladoga: life under ice interplay of under-ice processes by global change» 2015–2017 гг. и гранта РФФИ № 14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние».

Литература

Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем. СПб.: Наука, 1996. 190 с.

Гутельмахер Б. Л. Метаболизм планктона как единого целого: трофометаболические взаимоотношения зоо- и фитопланктона. Л.: Наука, 1986. 155 с.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Ледовая фенология и термическая структура озер северо-запада России в период ледостава (по данным многолетних наблюдений) // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Междунар. конф. (11–15 сент. 2017 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 222–228.

Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.

Куликова Т. П., Сярки М. Т. Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера (справочно-информационный материал). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. 16 с.

Лазарева В. И., Соколова Е. А. Динамика и фенология зоопланктона крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133, № 6. С. 564–574.

Методика комплексного гидрохимического и биологического исследования качества вод и состояния водных и околосредовых экосистем: методическое руководство. Ч. 1. Полевые исследования / Под ред. Т. И. Моисеенко. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2011. 63 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Ред. Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 33 с.

Назарова Л. Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Изв. РГО. 2014. Т. 146, № 4. С. 27–33.

Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Сабылина А. В. Современный гидрохимический режим озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 58–109.

Смирнова Т. С. Планктонные коловратки и ракообразные // Зоопланктон Онежского озера. Л.: Наука, 1972. С. 126–233.

Сярки М. Т. Зоопланктон // Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 117–119.

Сярки М. Т. Зоопланктон // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 121–127.

Сярки М. Т. Как долго длится лето для зоопланктона Онежского озера? // Принципы экологии. 2013. № 4. С. 70–75. doi: 10.15393/j1.art.2013.2781

Сярки М. Т., Куликова Т. П. «Зоопланктон Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012621150. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU). Дата регистрации в реестре баз данных 9 ноября 2012 г.

Сярки М. Т., Чистяков С. П. О применении метода ортогональных расстояний для моделирования сезонной динамики планктона Онежского озера // Экология. 2013. № 3. С. 234–236.

Сярки М. Т., Теканова Е. В. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // Изв. РАН. Сер. биол. 2008. № 5. С. 621–625.

Сярки М. Т., Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Полякова Т. П. Разработка подходов к оценке устойчивости функционирования водных сообществ // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 133–145.

Теканова Е. В., Сярки М. Т. Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // Изв. РАН. Сер. биол. 2015. № 6. С. 645–652.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богданова М. И. Изменения и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 80–93.

Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Влияние изменения климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 48–55.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Современное состояние зоопланктона Петрозаводской губы Онежского

озера и его отклик на изменение климата // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 54–64. doi: 10.17076/lim820

Adrian R., Wilhelm S., Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming // *Global Change Biol.* 2006. Vol. 12. P. 652–661.

George D. G. The effect of nutrient enrichment and changes in the weather on the abundance of *Daphnia* in Esthwaite Water, Cumbria // *Freshwater Biol.* 2012. Vol. 57, iss. 2. P. 360–372.

Gerten D., Adrian R. Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers // *Freshwater Biol.* 2002. Vol. 47. P. 2163–2173.

Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Katz S. L., Dennis B., Silow E. A. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia // *Global Change Biol.* 2008. Vol. 14. P. 1947–1958.

Hampton S. E., Gray D. K., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Ozersky T. The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of algae

and grazers in Lake Baikal, Siberia // *PLoS ONE.* 2014. Vol. 9, iss. 2. P. 1–10.

Rice E., Dam H. G., Gillian Stewart G. Impact of climate change on estuarine zooplankton: Surface water warming in long island sound is associated with changes in copepod size and community structure // *Estuaries and Coasts.* January 2015. Vol. 38, iss. 1. P. 13–23.

Thackeray S. J., Henrys P. A., Jones I. D., Feuchtmayr H. Eight decades of phenological change for a freshwater cladoceran: what are the consequences of our definition of seasonal timing? // *Freshwater Biol.* 2012. Vol. 57. P. 345–359.

Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes // *Global Change Biol.* 2004. Vol. 10. P. 1844–1856.

Winder M., Schindler D. E., Essington T. E., Litt A. H. Disrupted seasonal clockwork in the population dynamics of a freshwater copepod by climate warming // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, no. 6 (part 2). P. 2493–2505.

Поступила в редакцию 30.01.2019

References

Andronikova I. N. Strukturno-funktsional'naya organizatsiya zooplanktona ozernykh ekosistem [Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems]. St. Peterburg: Nauka, 1996. 190 p.

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. N., Bogdan M. I. Izmeneniya i izmenchivost' klimata evropeiskogo Severa Rossii i ikh vliyanie na vodnye ob'ekty [Climate change and variability in the European North of Russia and their impact on water bodies]. *Arktika: ekol. i ekonomika* [The Arctic: ecol. and economics]. 2012. No. 2(6). P. 80–93.

Filatov N. N., Rukhovets L. A., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Efremova T. V., Pal'shin N. I. Vliyanie izmeneniya klimata na ekosistemy ozer Severa evropeiskoi territorii Rossii [The impact of climate change on the lakes ecosystems in the North of European Russia]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2014. No. 34. P. 48–55.

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Sovremennoe sostoyanie zooplanktona Petrozavodskoi guby Onezhskogo ozera i ego otklik na izmenenie klimata [Modern state of zooplankton and its response to climate change in Petrozavodsk Bay of Lake Onego]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 9. P. 54–64. doi: 10.17076/lim820

Gutel'makher B. L. Metabolizm planktona kak edinogo tselogo: trofometabolicheskie vzaimootnosheniya zoo- i fitoplanktona [Metabolism of plankton as a whole: trophometabolic relationships of zoo- and phytoplankton]. Leningrad: Nauka, 1986. 155 p.

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Ledovaya fenologiya i termicheskaya struktura ozer severo-zapada Rossii v period ledostava (po dannym mnogoletnikh nablyudeni) [Ice phenology and thermal structure of the lakes in the north-west of Russia during the freeze-up period (according to long-term observations)]. *Ozera Evrazii: probl. i puti ikh resheniya.* Mat. 1-i Mezhdunar.

konf. (11–15 sent. 2017 g.) [Lakes of Eurasia: problems and their solutions. Proceed. 1st int. conf. (Sept. 11–15, 2017)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 222–228.

Kulikova T. P., Kustovlyankina H. B., Syarki M. T. Zooplankton kak komponent ekosistemy Onezhskogo ozera [Zooplankton as a component of the Lake Onega ecosystem]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1997. 112 p.

Kulikova T. P., Syarki M. T. Razmerno-vesovaya kharakteristika massovykh vidov rakoobraznykh i kolovratok Onezhskogo ozera (spravochno-informatsionnyi material) [Size and weight characteristics of mass species of crustaceans and rotifers in Lake Onega (reference and information material)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1994. 16 p.

Lazareva V. I., Sokolova E. A. Dinamika i fenologiya zooplanktona krupnogo ravninnogo vodokhranilishcha: otklik na izmenenie klimata [Dynamics and phenology of zooplankton in a large plain reservoir: a response to climate changes]. *Uspekhi sovr. biol.* [Biol. Bull. Reviews]. 2013. Vol. 133, no. 6. P. 564–574.

Metodika kompleksnogo gidrokhimicheskogo i biologicheskogo issledovaniya kachestva vod i sostoyaniya vodnykh i okolovodnykh ekosistem: metodicheskoe rukovodstvo. Ch. 1. Polevye issledovaniya [Methods of complex hydrochemical and biological research of water quality and the state of aquatic and riparian ecosystems: a methodological guide. Part 1. Field studies]. Ed. T. I. Moiseenko. Tyumen': Tyumen. gos. univ., 2011. 63 p.

Metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke materialov v gidrobiologicheskikh issledovaniyakh na presnovodnykh vodoemakh. Zooplankton i ego produktsiya [Methodological recommendations for sampling and processing materials for hydrobiological research on freshwater reservoirs. Zooplankton and its production]. Eds. G. G. Vinberg, G. M. Lavrent'eva. Leningrad: GosNIORKh, 1984. 33 p.

Nazarova L. E. Izmenchivost' srednikh mnogoletnikh znachenii temperatury vozdukh v Karelii [Variability

lity of average long-term air temperature values in Karelia]. *Izv. RGO* [The RGS Herald]. 2014. Vol. 146, no. 4. P. 27–33.

Onezhskoe ozero. Atlas. [Lake Onego. An atlas]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 151 p.

Sabylina A. V. Sovremennyi gidrokhimicheskii rezhim ozera [Modern hydrochemical regime of a lake]. *Onezhskoe ozero. Ekol. probl.* [Lake Onego. Ecological probl.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1999. P. 58–109.

Smirnova T. S. Planktonnye kolovratki i rakoobraznye [Plankton rotifers and crustaceans]. *Zooplankton Onezhskogo ozera* [Zooplankton of Lake Onego]. Leningrad: Nauka, 1972. P. 126–233.

Syarki M. T. Zooplankton [Zooplankton]. *Onezhskoe ozero* [Lake Onego]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 117–119.

Syarki M. T. Zooplankton [Zooplankton]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the north-western European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 121–127.

Syarki M. T. Kak dolgo dlitsya leto dlya zooplanktona Onezhskogo ozera? [How long does the summer last for zooplankton of Lake Onego?]. *Printsipy ekol.* [Principles of the Ecol.]. 2013. No. 4. P. 70–75. doi: 10.15393/j1.art.2013.2781

Syarki M. T., Kulikova T. P. Zooplankton Onezhskogo ozera. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2012621150. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie nauki Institut vodnykh problem Severa Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN (IVPS KarNTs RAN) (RU). Data registratsii v reestre baz dannykh 9 noyabrya 2012 g. [Zooplankton of Lake Onego. The certificate of the state registration of database No. 2012621150. Copyright holder: FSBI Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (NWPI KarRC RAS) (RU). The date of the registration in the register of databases: 9.11.2012].

Syarki M. T., Chistyakov S. P. O primeneniya metoda ortogonal'nykh rasstoyanii dlya modelirovaniya sezonnoi dinamiki planktona Onezhskogo ozera [On application of the orthogonal distance method to Lake Onego plankton seasonal cycling modelling]. *Russ. J. Ecol.* 2013. Vol. 44, no. 3. P. 264–266. doi: 10.1134/S1067413613020112

Syarki M. T., Tekanova E. V. Sezonnyi tsikl pervichnoi produktsii v Onezhskom ozere [Seasonal primary production cycle in Lake Onego]. *Biol. Bull.* 2008. Vol. 35, no. 5. P. 536–540.

Syarki M. T., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Polyakova T. P. Razrabotka podkhodov k otsenke ustoychivo-

sti funktsionirovaniya vodnykh soobshchestv [Development of approaches to assess the sustainability of water communities functioning]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the north-western European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 133–145.

Tekanova E. V., Syarki M. T. Osobennosti fenologii pervichno-produktsionnogo protsessa v pelagiali Onezhskogo ozera [Peculiarities of phenology of the primary production process in the pelagic zone of Lake Onego]. *Biol. Bull.* 2015. Vol. 42, no. 6. P. 556–562.

Adrian R., Wilhelm S., Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming. *Global Change Biol.* 2006. No. 12. P. 652–661.

George D. G. The effect of nutrient enrichment and changes in the weather on the abundance of *Daphnia* in Esthwaite Water, Cumbria. *Freshwater Biol.* 2012. Vol. 57, iss. 2. P. 360–372.

Gerten D., Adrian R. Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers. *Freshwater Biol.* 2002. Vol. 47. P. 2163–2173.

Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Katz S. L., Dennis B., Silow E. A. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biol.* 2008. Vol. 14. P. 1947–1958.

Hampton S. E., Gray D. K., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Ozersky T. The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of algae and grazers in Lake Baikal, Siberia. *PLoS ONE.* 2014. Vol. 9, iss. 2. P. 1–10.

Rice E., Dam H. G., Gillian Stewart G. Impact of climate change on estuarine zooplankton: Surface water warming in long island sound is associated with changes in copepod size and community structure. *Estuaries and Coasts.* 2015. Vol. 38, iss. 1. P. 13–23.

Thackeray S. J., Henrys P. A., Jones I. D., Feuchtmayr H. Eight decades of phenological change for a freshwater cladoceran: what are the consequences of our definition of seasonal timing? *Freshwater Biol.* 2012. No. 57. P. 345–359.

Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biol.* 2004. No. 10. P. 1844–1856.

Winder M., Schindler D. E., Essington T. E., Litt A. H. Disrupted seasonal clockwork in the population dynamics of a freshwater copepod by climate warming. *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, no. 6 (part 2). P. 2493–2505.

Received January 30, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сярки Мария Тагевна

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: Msyarki@yandex.ru
тел.: (8142) 576381

Фомина Юлия Юрьевна

научный сотрудник лаборатории гидробиологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: Rambler7780@rambler.ru
тел.: (8142) 576381

CONTRIBUTORS:

Syarki, Maria

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Msyarki@yandex.ru
tel.: (8142) 576381

Fomina, Yulia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Rambler7780@rambler.ru
tel.: (8142) 576381