



# СНИЖЕНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ ГЛУБОКОВОДНОГО МАКРОЗООБЕНТОСА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ МНОГОФАКТОРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

<b>КАЛИНКИНА</b> Наталья Михайловна	Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, <i>cerioda@mail.ru</i>
<b>СИДОРОВА</b> Анастасия Ивановна	Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, <i>cerioda@mail.ru</i>
<b>ПОЛЯКОВА</b> Тамара Николаевна	Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, <i>cerioda@mail.ru</i>
<b>БЕЛКИНА</b> Наталья Александровна	Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, <i>cerioda@mail.ru</i>
<b>БЕРЕЗИНА</b> Надежда Александровна	Зоологический институт РАН, <i>cerioda@mail.ru</i>
<b>ЛИТВИНОВА</b> Ирина Абрамовна	Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, <i>cerioda@mail.ru</i>

## Ключевые слова:

Онежское озеро  
глубоководный бентос  
донные отложения  
трансформация сообществ  
антропогенная нагрузка  
биоинвазии

**Аннотация:** В последнее десятилетие наблюдается сокращение показателей развития сообществ глубоководного макрозообентоса в Петрозаводской губе и сопредельном с ней центральном районе Онежского озера. Численность макрозообентоса снижалась в 6–7 раз, биомасса – в 2–4 раза. Одновременно в водоеме наблюдается изменение процессов седиментогенеза органического вещества, биогенных элементов, железа и марганца, что привело к увеличению концентраций железа и марганца в поверхностном слое донных осадков, в поровых водах содержание этих элементов составило 13 мг Fe/л и 7 мг Mn/л. Резкое возрастание содержания железа и марганца на дне можно рассматривать как возможный фактор угнетения макрозообентоса. Другой причиной снижения показателей развития бентоса является уменьшение антропогенной нагрузки, в результате чего в настоящее время в Петрозаводскую губу поступает в 3 раза меньше легкоокисляемого органического вещества, чем 10 лет назад. Рассмотрена третья возможная причина сокращения сообществ бентоса: вселение в Онежское озеро байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus*, в результате чего произошло перераспределение потоков органического вещества из литоральной зоны в пелагическую и обеднение кормовой базы глубоководного бентоса

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. В. Крылов

## Введение

В последние два десятилетия в различных географических регионах мира отмечается уменьшение продуктивности пресноводных экосистем. Этот процесс получил название «ре-олиготрофирование» (reoligotrophication – англ.) или олиготрофизация, что обозначает улучшение общей экологической ситуации, тенденцию к снижению трофического статуса водоема и возвращение к олиготрофному состоянию (Решетников, 2004).

Причины ре-олиготрофирования озер различны. Во многих случаях основным фактором является снижение антропогенной нагрузки на водоем, в том числе уменьшение количества фосфора, поступающего с водосборной территории. Олиготрофизация отмечена в настоящее время для Ладожского озера (Драбкова и др., 2006), Выгозерского водохранилища (Теканова и др., 2011), оз. Констанц (Tilzer et al., 1991; Straile, Geller, 1998) и других водоемов. Еще одной причиной снижения трофического статуса может быть вселение чужеродных видов. Так, в оз. Нарочь (Республика Беларусь) после вселения мощного моллюска-фильтратора (*Dreissena polymorpha*) заметно увеличилась прозрачность воды (Остапеня, 2007).

В последние 15 лет антропогенная нагрузка на экосистему Онежского озера заметно сократилась (Крупнейшие озероводохранилища..., 2015). В этот же период отмечается снижение показателей развития глубоководного макрозообентоса Онежского озера. Например, в центральном районе озера за период 2005–2011 гг. численность макрозообентоса снизилась в два раза по сравнению с 2001–2003 годами (Полякова, 2015). Кроме того, за этот период в состав донных сообществ вошел новый вид-вселенец – байкальская амфипода *Gmelinoides fasciatus* Stebbing, ставший доминирующим видом на литорали Онежского озера (Сидорова, Калинкина, 2015). Является ли наблюдаемое снижение показателей развития бентоса признаком олиготрофизации озера или отражает новую фазу состояния водоема – подобных исследований до сих пор не проводилось.

Цель настоящей работы – рассмотреть возможные причины снижения численности биомассы глубоководного макрозообентоса в различных районах Онежского озера за последние 25 лет. В задачи входило изучение динамики количественных показателей макрозообентоса, проведение химического анализа донных отложений в Петрозаводской

губе и сопредельном с ней центральном районе Онежского озера с учетом изменения антропогенной нагрузки на Петрозаводскую губу, а также исследование спектра питания вселенца (*G. fasciatus*) и оценка его роли в процессах трансформации органического вещества литоральной зоны Онежского озера.

## Материалы

Для изучения динамики состояния макробентоса Онежского озера была использована база данных по макробентосу № 2012620882 (Полякова, 2012). Кроме того, анализируемый массив данных включал результаты экспедиций 2014 и 2015 гг., организованных в рамках гранта РНФ № 14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние». Рассматривалась динамика общей численности макрозообентоса и его основных групп (Amphipoda, Oligochaeta, Chironomidae) за период 1988–2015 гг. Относительно подробные наблюдения на озере были начаты с 1988 г., поэтому именно этот год был выбран в качестве начального в анализируемом периоде. Для анализа из базы данных были использованы сведения по бентосу в Петрозаводской губе: данные по станции Р2 с глубиной 26.7 м (координаты 61°48,49'N; 34°25,93'E) и станции Р3 с глубиной 27.8 м (61°46,19'N; 34°31,91'E). Кроме того, были рассмотрены данные по центральному району озера, сопредельному с Петрозаводской губой, – станция С1 с глубиной 50 м (61°38,26'N; 35°28,06'E). Со станций Р3 и С1 отбирали пробы донных отложений на физико-химический анализ.

Динамика антропогенной нагрузки на Петрозаводскую губу Онежского озера была проанализирована с использованием данных по статистической отчетности водопотребителей г. Петрозаводска за период 1988–2013 гг.

## Методы

Пробы макрозообентоса были отобраны дночерпателем автоматическим коробчатым (площадь захвата 0.025 м<sup>2</sup>) в соответствии со стандартными методами (Методические рекомендации..., 1984; Методические рекомендации..., 2005). Съёмки в разные годы проводились в период с июня по сентябрь.

Отбор проб донных отложений для химического анализа производился в сентябре 2013 г. поршневой трубкой. Керна де-

лиллся послойно и паковался в пластиковые пакеты. В донных отложениях «*in situ*» потенциометрическим методом определяли pH (стеклянный электрод) и Eh (Pt-электрод с добавкой медиатора Трилон-Б). В лаборатории во влажных донных отложениях определяли Fe и Mn. При этом использовали фотометрические методы с формальдоксимом ( $\lambda = 450 \text{ nm}$ ) и о-фенантролином ( $\lambda = 510 \text{ nm}$ ) после кипячения осадка с 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в течение 1 часа. В сухих пробах (после сушки при комнатной температуре) определяли Corg (окисление грунта с K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> в растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), потерю при прокаливании (гравиметрический метод, T = 550 °C), азот (N<sub>tot</sub>) и фосфор (P<sub>tot</sub>) (титриметрический и фотометрический методы после окисления донных отложений в H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> по Кьельдалю). Химические анализы выполнялись в лабораториях гидрохимии и гидрогеологии и палеоолиминологии ИВПС КарНЦ РАН в соответствии с руководящими документами Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Руководство..., 2009).

Для оценки роли бокоплава *Gmelinoides fasciatus* (байкальский вид, вселившийся в Онежское озеро) в процессах снижения численности глубоководного макрозообентоса изучали спектр питания вида-вселенца. В 2011 и 2012 гг. были отобраны пробы бентоса в литоральной зоне Онежского озера в Кондопожской губе, Прионежье (Пинь-губа), устье реки Водлы и Повенецком заливе. Состав пищи массовых видов амфипод исследовали с использованием микро-

скопического анализа содержимого кишечника отдельных группы I (длиной тела 4–6 мм), группы II (7–9 мм) и группы III (10–13 мм). Длина амфипод измерялась от основания антенн до основания тельсона. Кишечник осторожно извлекали из тела рачка, используя микроиглу и пинцет, и расчленили в капле глицерина на предметном стекле. Анализировали только рачков с заполненными кишечниками. Была рассчитана частота встречаемости (% от встречаемости в анализируемых кишечниках) основных типов пищи, а также массовое соотношение детрита, растений и беспозвоночных (Berezina, 2007).

При изучении связей между показателями использовали корреляционный анализ (Ивантер, Коросов, 2003). При оценке достоверности коэффициентов корреляции принимали уровень значимости, равный 0.05.

## Результаты

### Динамика численности и биомассы макрозообентоса в Петрозаводской губе и центральном районе Онежского озера

Динамика общей численности макрозообентоса на станции P2 представлена на рис. 1. Каждая точка на графике соответствует отдельному году. В случае, если в течение года были получены данные за несколько летних месяцев, такие наблюдения для каждого года были усреднены. Такой подход оправдан, поскольку в течение июня – сентября показатели глубоководного макрозообентоса варьируют слабо.

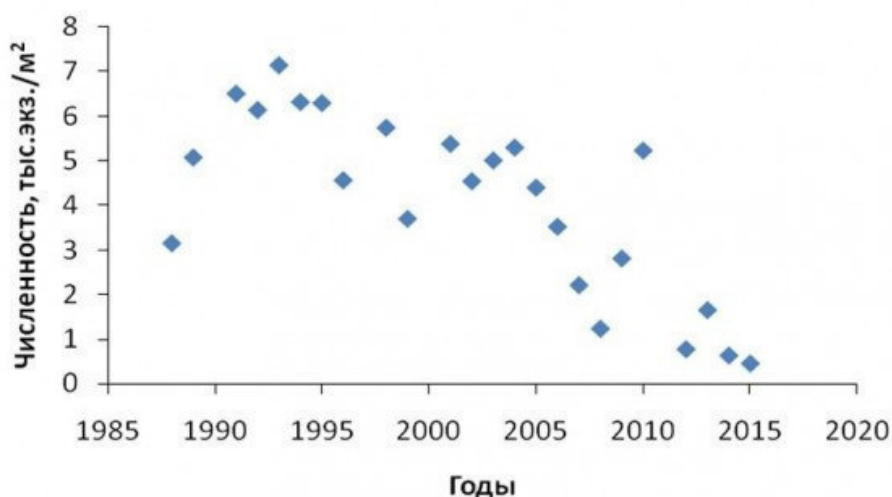


Рис. 1. Динамика общей численности макрозообентоса на станции P2 (Петрозаводская губа); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – общая численность, тыс. экз./м<sup>2</sup>

Fig. 1. The dynamics of the total benthos abundance at the station P2 (Petrozavodskaya Bay); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m<sup>2</sup>

Оказалось, что в Петрозаводской губе Онежского озера на протяжении последних 28 лет показатели численности и биомассы бентоса заметно снижаются. По сравнению с 1988 г. общая численность в 2015 г. снизилась в 7 раз; в сравнении с 1991 г. – в 15 раз. Достоверный коэффициент корреляции между значениями года и общей численности составил  $-0.75$

Сходная тенденция наблюдается для биомассы бентоса. В 1988–2006 гг. этот по-

казатель на станции P2 варьировал в пределах  $3.1\text{--}7.1\text{ г/м}^2$ ; в 2007–2015 гг. биомасса бентоса снизилась до  $0.44\text{--}2.2\text{ г/м}^2$ .

Для выявления основных этапов динамики показателей бентоса исходные данные по общей численности были преобразованы методом скользящей средней (Коросов, 2007). На рис. 2 представлены расчетные значения численности, изменения которой можно рассмотреть как последовательность трех основных этапов.

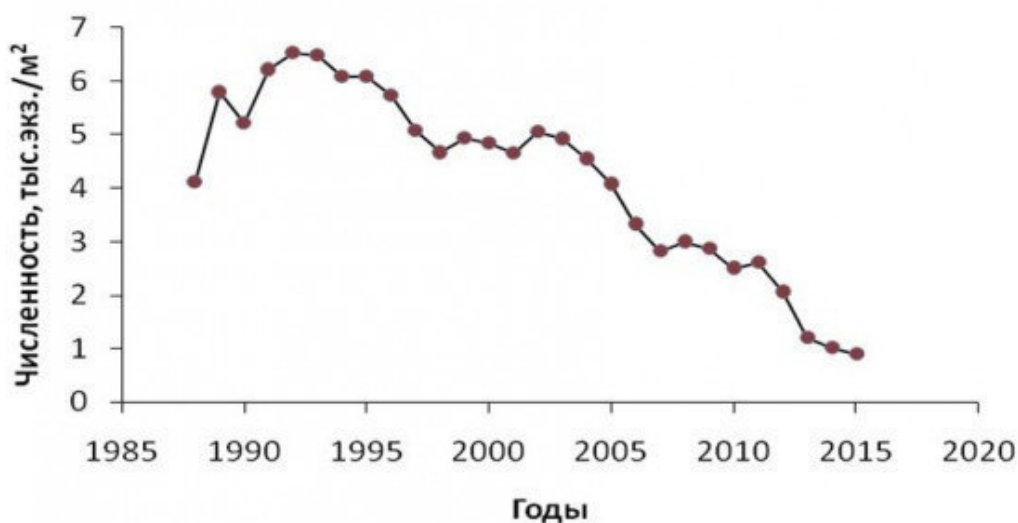


Рис. 2. Показатели общей численности бентоса, преобразованные методом скользящей средней; станция P2 (Петрозаводская губа); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – общая численность, тыс. экз./м²

Fig. 2. The parameters of the total benthos abundance calculated by the sliding average method; the station P2 (Petrozavodskaya Bay); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m²

Первая фаза в динамике численности наблюдается в течение 1988–1996 гг., когда за рассматриваемый период наблюдаются наибольшие показатели развития макробентоса. Вторая фаза приходится на 1997–2005 гг. В этот период отмечается начальное снижение общей численности. Наконец, в последние годы (2006–2015) происходит резкое снижение показателей бентоса.

Анализ динамики отдельных групп бентоса представлен на рис. 3. Данные по численности групп преобразованы методом скользящих средних.

Как оказалось, численность амфипод и олигохет снижается в течение анализируемого периода, проявляя колебания в противофазе. Лишь в последние годы численность амфипод и олигохет сни-

жается синхронно. Показатели развития хирономид, для которых характерна невысокая доля в численности и биомассе глубоководного бентоса Онежского озера, не проявляют какой-либо тенденции к изменению.

Подобный анализ был проведен для данных по макрозообентосу, собранных на станции P3 в Петрозаводской губе, удаленной от станции P2 на 10 км к югу. Оказалось, что на станции P3 также происходит снижение общей численности макрозообентоса. Достоверный коэффициент корреляции между значениями года и численности бентоса составил  $-0.6$ .

На рис. 4 представлены данные по общей численности бентоса на станции P3, преобразованные методом скользящей средней.

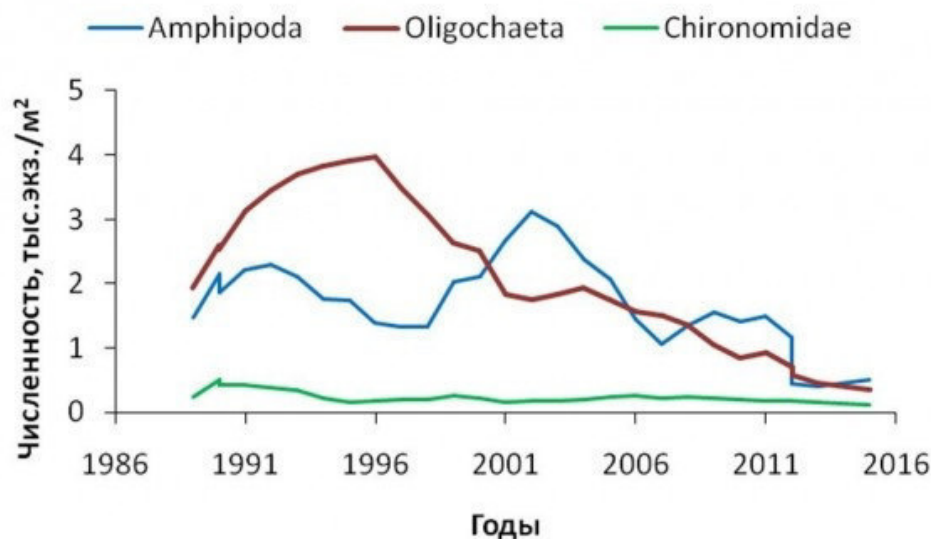


Рис. 3. Показатели численности, амфипод, олигохет и хирономид, преобразованные методом скользящей средней на станции Р2 (Петрозаводская губа); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – численность, тыс. экз./м<sup>2</sup>

Fig. 3. The parameters of Amphipoda, Oligochaeta and Chironomidae abundance calculated by the sliding average method, at the station P2 (Petrozavodskaya Bay); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m<sup>2</sup>

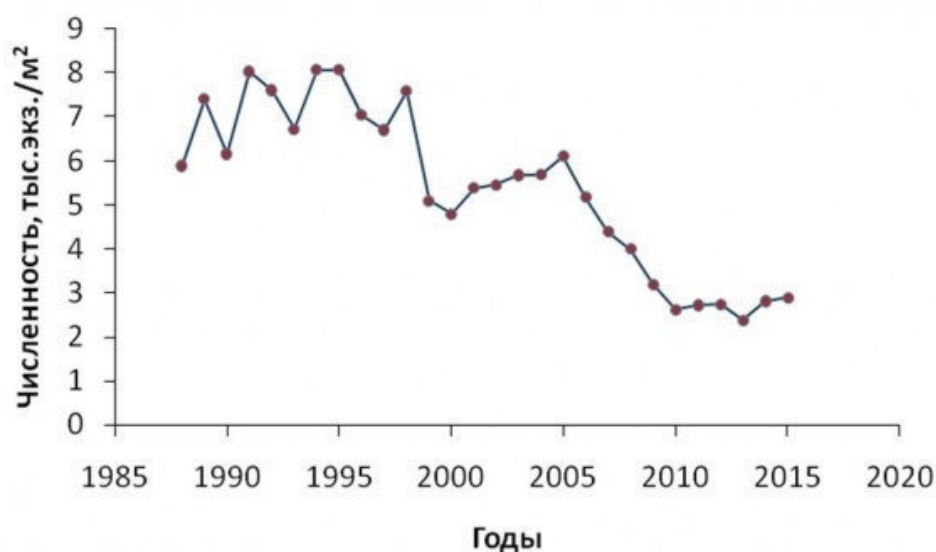


Рис. 4. Показатели общей численности бентоса, преобразованные методом скользящей средней; станция Р3 (Петрозаводская губа); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – общая численность, тыс. экз./м<sup>2</sup>

Fig. 4. The parameters of the total benthos abundance calculated by the sliding average method; the station P3 (Petrozavodskaya Bay); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m<sup>2</sup>

Здесь так же, как и на станции Р2, можно выделить три условных периода: наибольшая численность (1988–1996 гг.), относительное понижение показателя (1997–2005 гг.) и наименьшие показатели развития бентоса (2006–2015 гг.).

Что касается отдельных групп бентоса, то на станции Р3 наиболее отчетливо выражено снижение численности Oligochaeta (рис. 5). Реликтовые ракообразные (Amphipoda) сохраняют относительно постоянные показатели развития

вплоть до 2005 г., затем отмечается резкое снижение их количества на дне. Показатели численности хирономид, как и на станции Р2, не проявляют каких-либо тенденций к изменению.

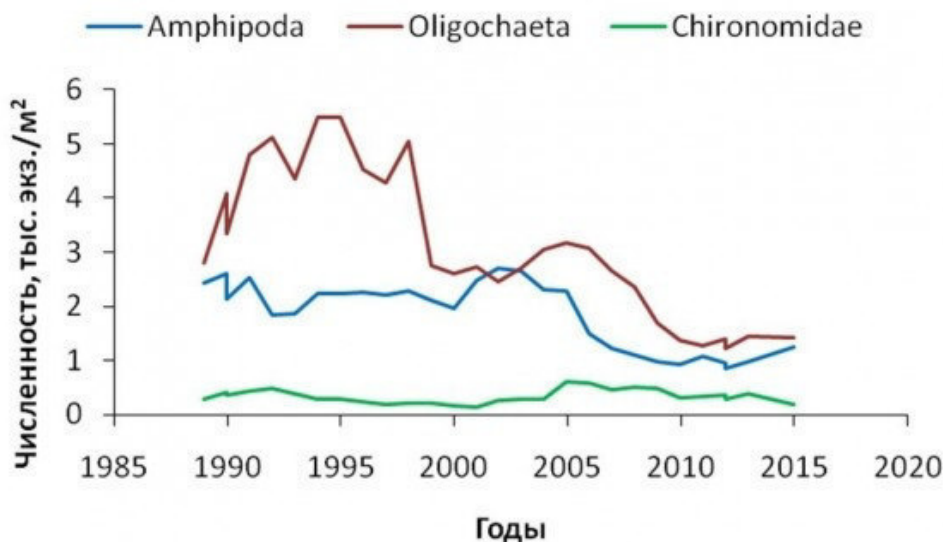


Рис. 5. Показатели численности амфипод, олигохет и хирономид, преобразованные методом скользящей средней на станции Р3 (Петрозаводская губа); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – численность, тыс. экз./м<sup>2</sup>

Fig. 5. The parameters of Amphipoda, Oligochaeta and Chironomidae abundance calculated by the sliding average method; the station P3 (Petrozavodskaya Bay); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m<sup>2</sup>

Для оценки достоверности наблюдаемых изменений в состоянии бентоса был применен однофакторный дисперсионный анализ (Ивантер, Коросов, 2003). При этом исходные данные по станциям Р2 и Р3 были объединены. Показатели общей численности объединенного массива данных были организованы в сезонном аспекте: для июня, июля, августа и сентября. Для трех сравниваемых периодов (1988–1996 гг., 1997–2005 гг. и 2006–2015 гг.) были сформированы выборки по средним, максимальным и минимальным значениям общей численности в каждый месяц вегетационного сезона.

На рис. 6 представлена сезонная динамика средних значений общей численности бентоса в Петрозаводской губе за три периода.

Величина критерия Фишера ( $F = 52.2$ ;  $F_{st} = 4.26$ ,  $p = 0.01$ ) свидетельствует о высокой достоверности наблюдаемого тренда в снижении показателей развития

бентоса в Петрозаводской губе на протяжении 1988–2015 гг. (рис. 7).

Достоверность тренда снижения численности бентоса была доказана с использованием дисперсионного анализа данных по максимальным значениям (величина критерия Фишера составила 57.1;  $p = 0.01$ ) и минимальным значениям общей численности бентоса ( $F = 9.1$ ;  $p = 0.05$ ).

Представляло интерес проследить динамику показателей бентоса в центральном глубоководном районе Онежского озера, сопредельном с Петрозаводской губой. На станции С1 (глубина 50 м) регулярные наблюдения проводились начиная с 1993 г. Оказалось, что в центральном районе озера, как и в Петрозаводской губе, наблюдается направленное снижение показателей макрозообентоса. Достоверный коэффициент корреляции между значениями лет и показателями численности составил -0.7.

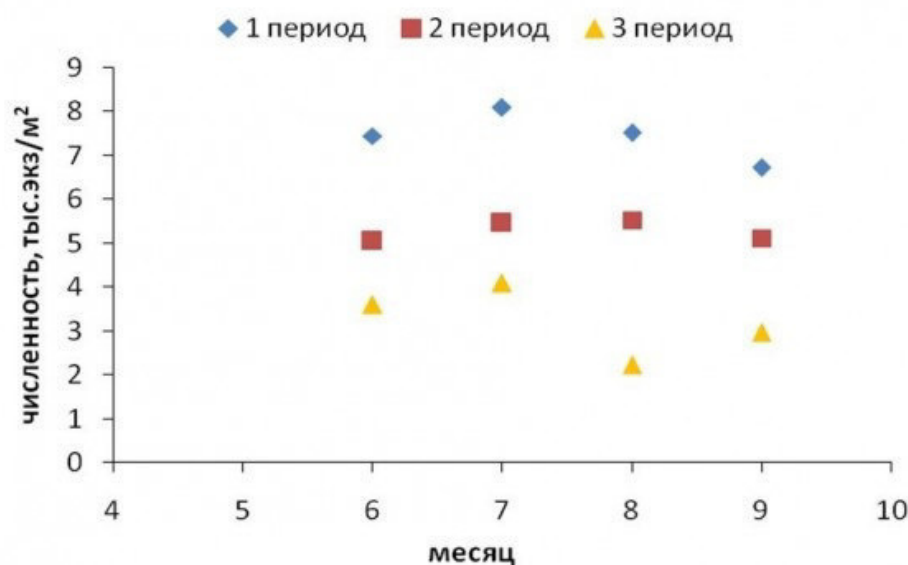


Рис. 6. Сезонная динамика средних значений общей численности бентоса в Петрозаводской губе за три периода: 1-й период – 1988–1996 гг., 2-й период – 1997–2005 гг., 3-й период – 2006–2014 гг.; по оси абсцисс – месяц; по оси ординат – численность, тыс. экз./м²

Fig. 6. The seasonal dynamics of the average value of total benthos abundance in Petrozavodskaya Bay during three periods: 1 – 1988–1996; 2 – 1997–2005; 3 – 2006–2014; on the abscissa – months; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m²

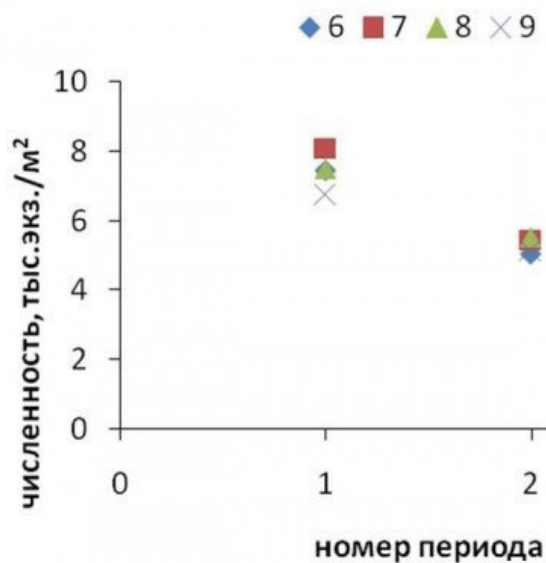


Рис. 7. Диапазоны сезонного изменения численности бентоса в Петрозаводской губе в разные периоды наблюдения; по оси абсцисс – номер периода (1 – период 1988–1996 гг., 2 – период 1997–2005 гг., 3 – период 2006–2014 гг.); по оси ординат – численность, тыс. экз./м²; вверху рисунка: 6 – июнь, 7 – июль, 8 – август, 9 – сентябрь

Fig. 7. The ranges of seasonal benthos abundance changes in Petrozavodskaya Bay in different periods; on the abscissa – the number of period (1 – 1988–1996; 2 – 1997–2005; 3 – 2006–2014); on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m²; at the top of the figure: 6 – June; 7 – July; 8 – August; 9 – September

Динамика общей численности бентоса (данные преобразованы методом скользящей средней) в центральной части озера

за период 1993–2015 гг. представлена на рис. 8.

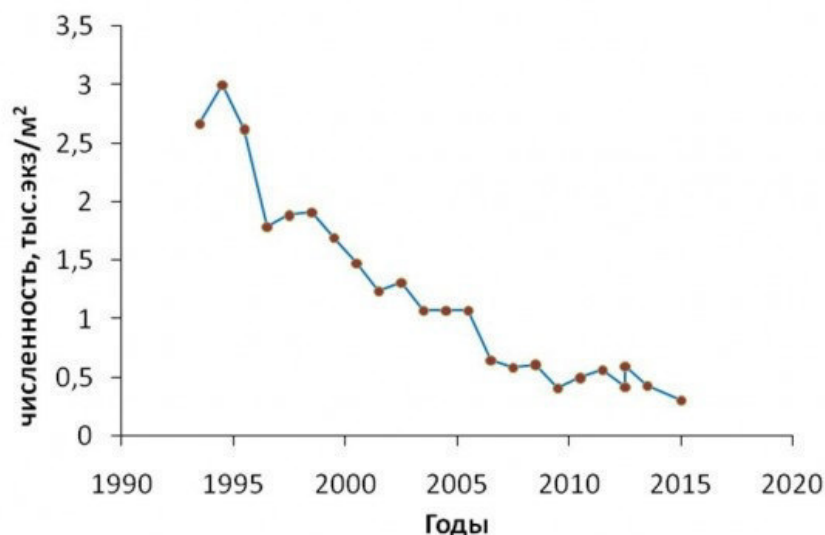


Рис. 8. Показатели общей численности бентоса, преобразованные методом скользящей средней; станция C1 (центральная часть Онежского озера); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – общая численность, тыс. экз./м<sup>2</sup>

Fig. 8. The parameters of the total benthos abundance calculated by the sliding average method; the station C1 (the central part of Onego Lake); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m<sup>2</sup>

Обращает внимание очень низкая численность бентоса в центре озера по сравнению с Петрозаводской губой (см. рис. 2, 4). Существенно большая численность бентоса в Петрозаводской губе (в 3–4 раза больше, чем в центре) связана с процессами эвтрофирования залива из-за поступления сточных вод г. Петрозаводска. Несмотря на различия в абсолютных значениях численности в центре и в заливе, тен-

денции снижения бентоса в разных районах совпадают.

Изменение показателей развития отдельных групп бентоса в центральном районе Онежского озера представлено на рис. 9. Как видно, в центральном районе для амфипод и олигохет отмечаются схожие тенденции с наблюдаемыми нами в Петрозаводской губе. Численность этих двух групп падает, причем в противофазе. Численность хирономид также снижается.

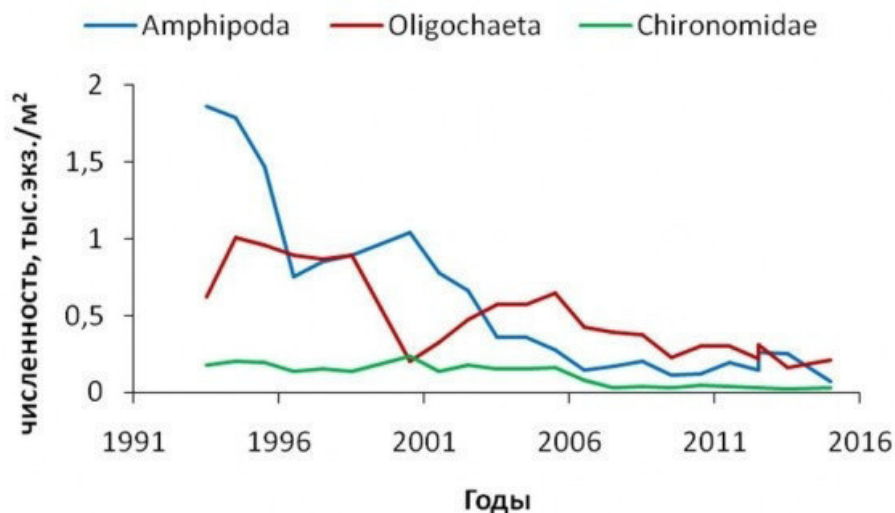


Рис. 9. Показатели численности амфипод, олигохет и хирономид, преобразованные методом скользящей средней; станция C1 (центральная часть Онежского озера); по оси абсцисс – годы; по оси ординат – численность, тыс. экз./м<sup>2</sup>

Fig. 9. The parameters of Amphipoda, Oligochaeta and Chironomidae abundance calculated by the sliding average method; the station C1 (the central part of Onego Lake); on the abscissa – years; on the ordinate – total abundance, thousands of ind./m<sup>2</sup>

Интегрально оценить состояние макрозообентоса позволяет расчет средне-взвешенных показателей биомассы с учетом площадей участков дна на различных глубинах. Оценку суммарной биомассы

донных сообществ (в пересчете на органический углерод) проводили по станциям наблюдений с последующим пересчетом на площадь основных изобат (табл. 1).

Таблица 1. Суммарная биомасса макробентоса (органический углерод, тонны) для различных глубин и участков Онежского озера

Период	Глубины	Петрозаводская губа	Центральный район
2001–2006 гг.*	5–10 м	34.2	1161.1
	10–30 м	524	9839.8
	более 30 м	–	14490.7
2007–2014 гг.	5–10 м	32.4	1704.3
	10–30 м	283.1	2332.2
	более 30 м	–	6582.6

Примечание: \* – цит. по (Рябинкин, Полякова, 2008).

Расчеты, выполненные для периода 2007–2014 гг., сравнивали с литературными данными (Рябинкин, Полякова, 2008), где подобные вычисления были сделаны для 2001–2006 гг. Оказалось, что на глубинах 5–10 м в Петрозаводской губе и в центральном районе озера биомасса бентоса за 2007–2014 гг. соответствовала показателям 2001–2006 гг. Изменения наблюдаются в более глубоких районах озера. Так, в Петрозаводской губе на глубинах 10–30 м в 2001–2006 гг. суммарная биомасса бентоса составляла 524 тонны (в пересчете на органический углерод), в то время как в следующие 8 лет эта величина снизилась почти в 2 раза и составила 283 тонны (см. табл. 1). В центральном районе озера на глубинах 10–30 м биомасса снизилась в 4 раза (с 9840 до 2332 тонн), на глубинах более 30 м отмечалось 2-кратное снижение биомассы (с 14491 до 6583 тонн).

Таким образом, анализ результатов наблюдений за период 1988–2015 гг. позволил обнаружить достоверные тренды сокращения численности и биомассы глубоководного бентоса в различных районах Онежского озера. Для объяснения наблюдаемого явления были привлечены данные по химическому составу донных отложений, динамике антропогенной нагрузки на Петрозаводскую губу и оценке роли вида-вселенца (байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus*) в процессах транс-

формации вещества и энергии в экосистеме Онежского озера.

#### Химический состав донных отложений в Петрозаводской губе и сопредельном центральном районе Онежского озера

Донные отложения исследуемых районов являются минеральными осадками, большую часть вещественного состава которых представляют кремний, железо и алюминий (Белкина, 2006, 2011). Органическое вещество и биогенные элементы обладают наибольшей изменчивостью в химическом составе осадков. Концентрационные профили показателей органического углерода (Corg), потерь при прокаливании (П.П.П.), органического азота (Norg), фосфора (P) отражают процесс его накопления и трансформации по мере захоронения в донных отложениях. Концентрация веществ в поверхностном слое близка к составу поступающей на дно взвеси. Если условия седиментации не меняются, то по мере деструкции его содержание монотонно уменьшается с глубиной (Белкина, 2007; Белкина и др., 2012; Kulik et al., 2015).

Распределение химических показателей в колонке донных отложений, отобранных в Петрозаводской губе на станции РЗ, представлено на рис. 10.

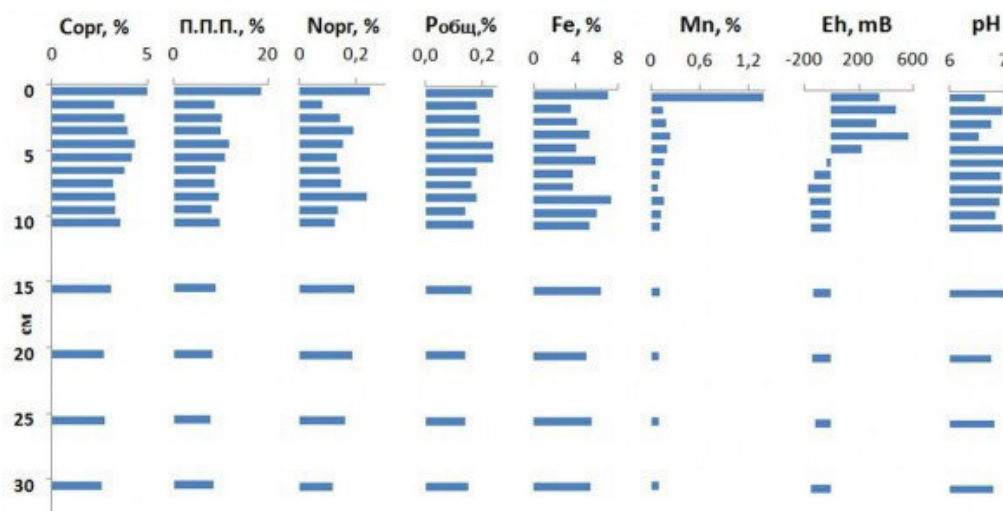


Рис. 10. Химический состав донных отложений Петрозаводской губы (ст. P3); по оси абсцисс – химические показатели; по оси ординат – глубина колонки донных отложений, см

Fig. 10. Chemical composition of the bottom sediments in Petrozavodskaya Bay (station P3); on the abscissa – the chemical parameters; on the ordinate – depth of sediment column, sm

Концентрационные профили показателей органических веществ в Петрозаводской губе не являются монотонно убывающими, что означает изменение процессов седиментогенеза в заливе. Локальный максимум концентрации органических веществ на глубине 5–6 см (содержание фосфора и органического углерода практически равно их содержанию в поверхностном слое) указывает, что поступление органических веществ в донные отложения значительно уменьшилось по сравнению с концом 1980-х – началом 1990-х годов. Неравномерный характер поступления органического вещества в донные отложения отражается на концентрационном профиле редокс-чувствительных элементов (Fe, Mn), вызывая их перераспределение вплоть до образования рудных прослоек на геохимическом барьере, которые при отсутствии восстановителя могут сохраняться в толще донных отложений длительное время. Если концентрационный профиль железа (чередование минимумов и максимумов) может быть объяснен колебаниями продукционных процессов в заливе, то возросшее в 10 раз содержание марганца в поверхностном слое по сравнению со средним значением по колонке только диагенетическими преобразованиями в осадке объяснить нельзя. Можно предположить, что накопление Mn

связано с интенсивным выносом этого элемента с водосборной территории. Необходимо также отметить, что высокие концентрации марганца и железа в донных отложениях этой станции соответствуют высоким концентрациям растворенных форм этих элементов в поровых водах (13 мг Fe/л и 7 мг Mn/л).

Концентрационные профили показателей химического состава в колонке донных отложений центрального района Онежского озера (рис. 11) имеют сходные черты с их распределением в донных отложениях Петрозаводской губы. Обнаружен немонотонный характер распределения показателей органического вещества с локальным максимумом, соответствующим периоду 1980-х годов (слой 1–2 см), накопление фосфора, железа и марганца в зоне редокс-барьера на глубине 3–6 см, захоронение прослоек, обогащенных этими элементами, высокое содержание марганца, уменьшение поступления органического вещества в донные отложения в настоящее время. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в течение последних лет в донных отложениях Онежского озера происходят изменения химического состава осадков, связанные с изменениями в водоеме процессов седиментогенеза органического вещества, биогенных элементов, железа и марганца.

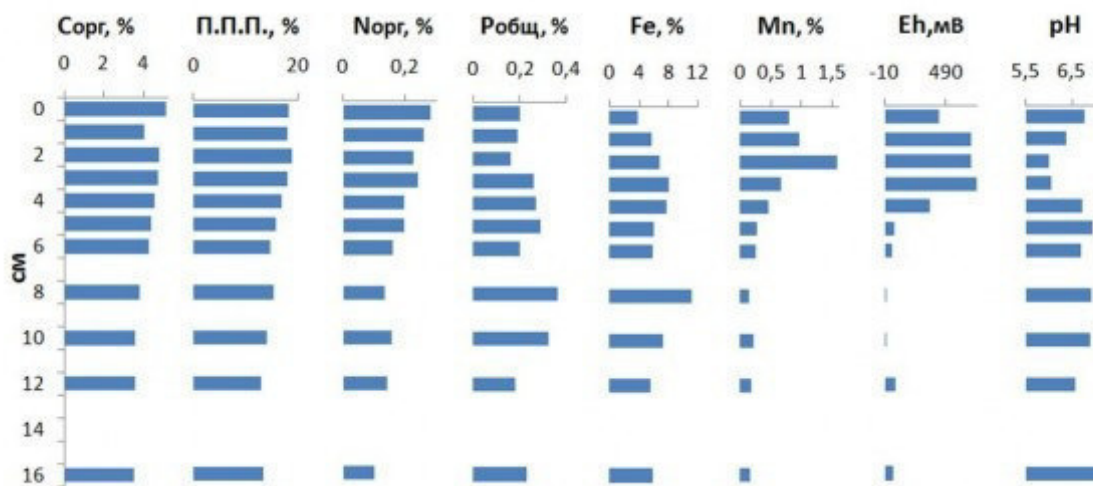


Рис. 11. Химический состав донных отложений центрального района Онежского озера (ст. С1); по оси абсцисс – химические показатели; по оси ординат – глубина колонки донных отложений, см  
Fig. 11. Chemical composition of the bottom sediments in the central part of Onego Lake (station C1); on the abscissa – chemical parameters; on the ordinate – depth of sediment column, sm

Резкое возрастание содержания железа и, особенно, марганца можно расценивать как возможный фактор угнетения состояния макрозообентоса на дне Онежского озера в последние годы. Выявленные в экспериментах на ветвистоусых ракообразных остротоксичные уровни железа и марганца составляют соответственно 40 и 50 мг/л. Эти концентрации вызывают гибель рачков в течение нескольких суток (Калинкина, 2011). Наблюдаемые в поровых водах уровни содержания железа (13 мг/л) и марганца (7 мг/л) могут проявить хроническую токсичность для водных беспозвоночных и стать

одной из причин сокращения количества глубоководного макрозообентоса в Онежском озере.

#### Динамика антропогенной нагрузки на Петрозаводскую губу Онежского озера

Поступление сточных вод в Петрозаводскую губу Онежского озера в 1990–2005 гг. составляло 46–51 млн. м<sup>3</sup> в год (рис. 12). Начиная с 2005 г. отмечается уменьшение сбросов сточных вод в залив. В целом антропогенная нагрузка на Петрозаводскую губу в настоящее время (по сравнению с 2000 г.) снизилась в 1.7 раза.

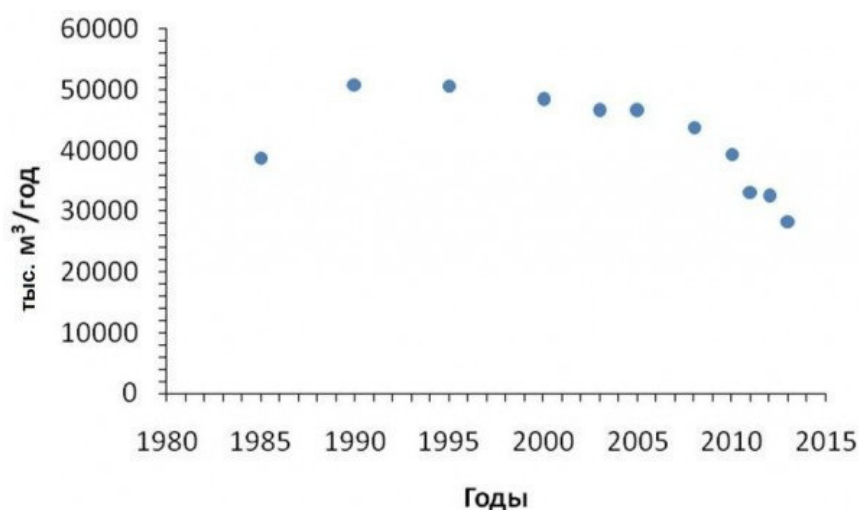


Рис. 12. Динамика сброса сточных вод в Петрозаводскую губу в 1985–2013 гг.; по оси абсцисс – годы; по оси ординат – объем сточных вод, тыс. м<sup>3</sup>/год  
Fig. 12. The dynamics of wastewater discharge in Petrozavodskaya bay in 1985–2013; on the abscissa – years; on the ordinate – the wastewater volume, thous. m<sup>3</sup>/year

Одновременно уменьшается поступление в Петрозаводскую губу легкоокисляемого органического вещества. Так, в 2003 г. в залив поступило 123 тонны органического вещества (в пересчете на органический углерод). В 2005–2009 гг. количество сброшенного органического вещества варьировало в пределах 86–97 тонн в год. В 2010–2013 гг. количество поступившего органического углерода снизилось до 41–69 тонн в год. Легкоокисляемое органическое вещество служит основой для развития бактерий, которые могут использоваться в пищу бентосом. Снижение антропогенной нагрузки и связанное с ним уменьшение поступления в залив органического вещества может рассматриваться как одна из причин сокращения количества макрозообентоса в Петрозаводской губе.

#### **Роль вида-вселенца *Gmelinoides fasciatus* в процессах трансформации органического вещества литоральной зоны Онежского озера**

Байкальская амфипода *Gmelinoides fasciatus* появилась в водоемах северо-западного региона России в 1960–1970-х гг.

в результате преднамеренной интродукции для улучшения кормовой базы рыб (Березина, 2004). В Онежском озере этот вид впервые был зарегистрирован в 2001 г. (Березина, Панов, 2003). Хотя он проник в Онежское озеро гораздо раньше, предположительно в конце 1990-х гг., из Ладожского озера (первая находка в конце 1980-х гг.) по р. Свирь. К настоящему времени вид-вселенец распространился практически по всему Онежскому озеру (Кухарев и др., 2008).

В связи с резким снижением численности и биомассы глубоководного макрозообентоса в Онежском озере представляло интерес рассмотреть спектр питания вселенца *G. fasciatus* и его роль в перераспределении потоков энергии в экосистеме Онежского озера.

Анализ кишечников рачков *G. fasciatus* из Онежского озера выявил смешанный характер питания. Основу рациона у всех рачков составляла растительная пища и детрит. Беспозвоночные были встречены в питании не более 50 % особей (табл. 2).

Таблица 2. Качественный состав и относительная частота встречаемости групп организмов в кишечнике бокоплавов *Gmelinoides fasciatus* разных линейных размеров из Онежского озера (%)

Содержимое кишечников		Размеры особей		
		4–6 мм	7–9 мм	> 10 мм
Детрит		100	100	100
Водоросли	Диатомовые	100	100	100
	Зеленые одноклеточные	100	100	100
	Зеленые нитчатые	100	100	100
	Остатки беспозвоночных			
	Планктонные ракообразные	-	10	20
	Коловратки	-	30	50
	Олигохеты	-	30	50
	Амфипода	-	-	10
	Изопода	-	-	30
	Личинки хирономид	-	20	50
	Личинки других насекомых	-	10	30

Примечание. Частота встречаемости в кишечниках оценивалась как % от числа проанализированных кишечников.

Исследования показали, что в составе пищи мелких (4–6 мм), средних (7–9 мм) и крупных (>10 мм) особей выявлены различия. У мелких рачков в кишечнике в массе обнаружены одноклеточные зеленые и диатомовые водоросли, у средних – одноклеточные и нитчатые зеленые водоросли. Пищу крупных бокоплавов, наряду с однокле-

точными, нитчатыми водорослями и растительными частицами, составляли олигохеты, ракообразные, мелкие личинки хирономид и других насекомых. Таким образом, амфиподы *G. fasciatus* относятся к всеядным организмам с преобладанием в рационе детрита.

Ориентировочные расчеты показали, что за вегетационный сезон рачком *G. fasciatus* в целом по Онежскому озеру потребляется около 300 тонн органического вещества (табл. 3).

Таблица 3. Некоторые показатели участия *G. fasciatus* в трансформации органического вещества в литоральной зоне Онежского озера

Средняя численность <i>G. fasciatus</i> в литорали озера экз./м <sup>2</sup>	4358
Средний вес особи, г	0.0011
Суточный рацион рачка, г	0.00032
Суточный рацион популяции рачка, г/м <sup>2</sup>	1.387
Рацион популяции рачка за сезон (180 дней), г/м <sup>2</sup>	174.7
Суточная продукция бентоса, г/м <sup>2</sup>	0.189
Отношение суточной продукции бентоса к суточному рациону рачка, %	13.7
Длина береговой линии озера, км	1810
Площадь максимального количественного развития рачка ( $S_{0-1.0}$ ), м <sup>2</sup>	1810000
Потребленное рачком органическое вещество, т	316.2

Высокие в целом показатели численности и биомассы *G. fasciatus* в литоральных биотопах позволяют говорить о значительной роли этой амфиподы в трофических взаимодействиях и потоках вещества и энергии в литоральных биоценозах. Включение нового вида в пищевые цепи донных сообществ вызывает интенсификацию продукционно-деструкционных процессов. С участием *G. fasciatus* заметная часть аллохтонного органического вещества в литоральной зоне, во-первых, минерализуется, во-вторых, включается в пищевые цепи бентос – рыбы, поскольку доказано, что рачки *G. fasciatus* стали излюбленным кормом бентоядных рыб (Berezina, Strelnikova, 2010; Сидорова, Калинкина, 2015).

## Обсуждение

В последние 15 лет наблюдается заметная трансформация экосистемы Онежского озера, связанная с действием климатического, антропогенного факторов и биоинвазий. Об изменении климата в Карелии свидетельствуют данные по температуре воздуха и количеству атмосферных осадков (Назарова, Филатов, 2004; Назарова, 2014, 2015). Так, за период с 1989 г. по настоящее время среднегодовая температура воздуха возросла на 1–2 °С по сравнению с предшествующим периодом. Наблюдается рост годовых сумм выпавших атмосферных осадков. Возросла продолжительность безледоставного периода на Онежском озере (Efremova et al., 2013). Антропогенная нагрузка на Онежское озеро в последние годы заметно снизилась. За последние 10

лет сброс сточных вод в прибрежной зоне озера уменьшился на 30 %. Еще один мощный фактор, который оказывает влияние на Онежское озеро, – это биологические инвазии. Около 20 лет назад в озеро вселилась байкальская амфипода *Gmelinoides fasciatus*, которая вызвала коренные перестройки в литоральных бентосных сообществах (Сидорова, Калинкина, 2015).

Многофакторное воздействие повлекло резкое снижение численности и биомассы глубоководных сообществ макрозообентоса. В Петрозаводской губе и сопредельном с ней центральном глубоководном районе в последние 10 лет численность бентоса снизилась в 6–7 раз, биомасса – в 2–4 раза. При этом изменения коснулись глубоководного бентоса, обитающего на глубинах 30 м и более. Каковы же причины подобных изменений состояния бентоса? На наш взгляд, основной причиной может быть снижение антропогенной нагрузки на водоем. О снижении поступления органических веществ в донные отложения по сравнению с 1980–1990-ми гг. свидетельствуют данные химического состава седиментов. Однако олиготрофикацией (снижением трофического статуса водоема) наблюдаемое явление назвать трудно. Данные по увеличению содержания железа и, особенно, марганца в верхних слоях донных отложений позволяют предположить гипотезу об угнетении бентоса в современных условиях осадконакопления. Возможной причиной повышения уровней железа и марганца на дне может быть увеличение количества осадков на водосборную территорию и, как следствие,

интенсивное вымывание гуминовых кислот, с которыми железо и марганец образуют прочные связи. Однако эта гипотеза требует проверки.

Наконец, возможным фактором уменьшения количества бентоса на дне может быть появление в Онежском озере вселенца – байкальской амфиподы *G. fasciatus*. На примере изучения Ладожского озера показано, что хищное питание *G. fasciatus* может быть причиной существенного сокращения численности, вплоть до полного исчезновения из сообществ аборигенных видов. Сравнение состава и биомассы зообентоса литоральной зоны Ладожского озера в 2000 и 2005 гг. с более ранними данными (1988–1990 гг.) показало изменения соотношения биомасс основных групп (олигохет, хирономид, амфипод и др.), сокращение ареалов и снижение численности в популяциях других ракообразных: *Gammarus lacustris*, *Pallasea quadrispinosa* и *Asellus aquaticus*. Причиной этого может быть хищничество и конкуренция со стороны вселенца (Berezina et al., 2009). Кроме того, с появлением вселенца в экосистеме Онежского озера произошло перераспределение потоков органического вещества из литоральной зоны в пелагическую. Количество же аллохтонного вещества, поступающего с терригенным стоком в глубокие зоны озера, по-видимому, уменьшилось, произошло обеднение кормовой базы глубоководного макрозообентоса и, как следствие, снижение его численности и биомассы.

Следует ли считать наблюдаемые изменения в состоянии глубоководного макрозообентоса катастрофическими? В настоящее время показатели численности и биомассы бентоса приближаются к 1960-м гг., до начала интенсивного эвтрофирования Петрозаводской губы. Однако в составе современных сообществ возрастает доля олигохет. Согласно предположению Т. Н. Поляковой (2015), уменьшение численности наиболее распространенного реликто-

вого рачка *Monoporeia affinis* можно объяснить естественными механизмами регуляции его численности. Это предположение предстоит проверить в будущих исследованиях. Необходимо также отметить, что состояние современных планктонных сообществ Онежского озера не претерпевает столь сильных изменений, как в случае с бентосными сообществами (Сярки, Фомина, 2015; Теканова, Сярки, 2015). Ввиду высокой сезонной изменчивости достоверных трендов в изменении планктона пока обнаружено не было.

## Заключение

В последнее десятилетие произошло резкое снижение численности (в 6–7 раз) и биомассы (в 2–4 раза) глубоководного макрозообентоса Онежского озера.

В течение последних лет в донных отложениях Онежского озера происходит изменение процессов седиментогенеза органического вещества, биогенных элементов, железа и марганца, что привело к увеличению содержания железа и марганца в поверхностных слоях донных отложений.

Антропогенная нагрузка (количество сточных вод) на Петрозаводскую губу Онежского озера в последние 10 лет снизилась в 2 раза, в результате чего поступление легкоокисляемого органического вещества уменьшилось в 3 раза.

Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* в Онежское озеро привело к перераспределению потоков органического вещества из литоральной зоны в пелагическую.

Возможными причинами снижения численности и биомассы бентоса в Онежском озере могут быть уменьшение антропогенной нагрузки, увеличение содержания в поверхностных слоях донных отложений железа и марганца, вселение байкальской амфиподы, вызывавшей обеднение кормовой базы глубоководного бентоса.

## Библиография

- Березина Н. А. Причины, особенности и последствия распространения чужеродных видов амфипод в водных экосистемах Европы // Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах / Под ред. А. Ф. Алимова, Н. Г. Богущкой. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 254–268.
- Березина Н. А., Панов В. Е. Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* в Онежское озеро // Зоологический журнал. 2003. Т. 82. № 6. С. 731–734.

- Драбкова В. Г., Капустина Л. Л., Летанская Г. И. Процессы самоочищения в Ладожском озере на различных стадиях антропогенного воздействия // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии: Сборник научных работ. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 234–241.
- Белкина Н. А. Загрязнение нефтепродуктами донных отложений Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 181–187.
- Белкина Н. А. Химический состав донных отложений Онежского озера // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Под ред. П. А. Лозовика. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 40–48.
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 35–42.
- Белкина Н. А., Вапиров В. В., Ефременко Н. А., Романова Т. Н. К вопросу о путях естественной миграции меди в Онежское озеро // Принципы экологии. 2012. № 1. С. 23–26. <http://ecopri.ru/journal/article.php?id=483>. DOI: 10.15393/j1.art.2012.483.
- Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.
- Калинкина Н. М. Эволюционные аспекты экологической токсикологии // Современные проблемы водной токсикологии. К 100-летию со дня рождения профессора Е. А. Веселова: Материалы конф. 17–19 мая 2011 г. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. С. 61–63.
- Коросов А. В. Специальные методы биометрии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 364 с.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова, Н. М. Калинкиной, Т. П. Куликовой, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 375 с.
- Кухарев В. И., Полякова Т. Н., Рябинкин А. В. Распространение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежском озере // Зоологический журнал. 2008. Т. 87. № 10. С. 1270–1273.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при ведении мониторинга биологического загрязнения на Финском заливе / Под ред. А. Ф. Алимова, Т. М. Флоринской. СПб., 2005. 68 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л., 1984. 52 с.
- Назарова Л. Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Известия РГО. 2014. Т. 146. Вып. 4. С. 27–33.
- Назарова Л. Е. Атмосферные осадки в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. № 9. Сер. Лимнология. 2015. С. 114–121.
- Назарова Л. Е., Филатов Н. Н. Изменчивость климата по данным метеорологических наблюдений // Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. С. 12–34.
- Остапеня А. П. Дезэвтрофирование или бентификация? // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы 3-й международной научной конференции, 17–22 сентября, 2007 г. Минск: Изд. центр БГУ, 2007. С. 31–32.
- Полякова Т. Н. Макробентос Онежского озера. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620882. 2012.
- Полякова Т. Н. Макрозообентос // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова, Н. М. Калинкиной, Т. П. Куликовой, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 127–133.
- Решетников Ю. С. Проблема ре-олиготрофизации водоемов // Вопросы ихтиологии. 2004. Т. 44. № 5. С. 709–711.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / Под ред. Л. В. Боевой. Ростов н/Д: НОК, 2009. 104 с.
- Рябинкин А. В., Полякова Т. Н. Макрозообентос озера и его роль в питании рыб // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. С. 67–91.
- Сидорова А. И., Калинкина Н. М. Инвазия байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* в Онежское озеро. Сезонная динамика популяционных показателей. Lap Lambert Academic Publishing, 2015. 80 с.
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. Сер. Экологические исследования. 2015. № 1. С. 63–68.
- Теканова Е. В., Лозовик П. А., Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Полякова Т. Н., Рябинкин А. В., Сластина Ю. Л., Тимакова Т. М., Чекрыжева Т. А. Современное состояние и трансформация

- северной части Выгозерского водохранилища // Труды КарНЦ РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 50–56.
- Теканова Е. В., Сярки М. Т. Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // Известия РАН. Сер. биологическая. 2015. № 6. С. 645–652.
- Berezina N. A., Strelnikova A. P. The role of the introduced amphipod *Gmelinoides fasciatus* and native amphipods as fish food in two large-scale north-western Russian inland water bodies: Lake Ladoga and Rybinsk Reservoir // Journal of Applied Ichthyology. Special Issue: Alien Species in Aquaculture and Fisheries. 2010. Vol. 26. P. 89–95.
- Berezina N. A. Food spectra and consumption rates of four amphipod species from the North-West of Russia // Fundamental and Applied Limnology/Archiv fur Hydrobiologie. 2007. Vol. 168. № 4. P. 317–326.
- Berezina N. A., Zhakova L. V., Zaporozhets N. V., Panov V. E. Key role of the amphipod *Gmelinoides fasciatus* in reed beds of Lake Ladoga // Boreal Env. Res. 2009. Vol. 14. № 3. P. 404–414.
- Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. Vol. 62. № 1. P. 33–41.
- Kulik N., Belkina N., Lozovik P., Efremenko N. Trace elements in the Lake Onega // Abstracts of 4th European Large Lakes Symposium. Ecosystem Services and Management in a Changing World. August 24–28, 2015. Joensuu, 2015. P. 41.
- Straile D., Geller W. Crustacean zooplankton in Lake Constance from 1920 to 1995: Response to eutrophication and re-oligotrophication // Advances in Limnology. 1998. Vol. 53. P. 255–274.
- Tilzer M. M., Gaedke U., Schweizer A., Beese B., Wiese T. Interannual variability of phytoplankton productivity and related parameters in Lake Constance: no response to decreased phosphorus loading? // Journal of Plankton Research. 1991. Vol. 13. № 4. P. 755–777.

## Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00766) (80 %) и гранта РФФИ 14-04-00207 (20 %).

# DECLINE IN THE DEEPWATER BENTHIC COMMUNITIES ABUNDANCE IN THE ONEGO LAKE UNDER MULTIFACTOR INFLUENCE

**KALINKINA**  
Nataliya Michailovna

*Northern Water Problems Institute, KRC RAS, cerioda@mail.ru*

**SIDOROVA**  
Anastasiya Ivanovna

*Northern Water Problems Institute, KRC RAS, cerioda@mail.ru*

**POLYAKOVA**  
Tamara Nikolaevna

*Northern Water Problems Institute, KRC RAS, cerioda@mail.ru*

**BELKINA**  
Nataliya Alexandrovna

*Northern Water Problems Institute, KRC RAS, cerioda@mail.ru*

**BEREZINA**  
Nadezda Alexandrovna

*Zoological Institute RAS, cerioda@mail.ru*

**LITVINOVA**  
Irina Abramovna

*Northern Water Problems Institute, KRC RAS, cerioda@mail.ru*

## Key words:

Onego Lake  
deepwater benthic communities  
bottom sediments  
transformations  
anthropogenic load  
bioinvasion

**Summary:** The dynamics of deepwater benthic communities state between 1988 and 2015 was analyzed. In the last decade the decline in the deepwater benthic communities development indicators is observed in Petrozavodskaya Bay and contiguous central area of the Lake Onego. The abundance of benthos decreased by 6-7 times, biomass dropped in 2-4 times. At the same time the changes in sedimentation processes of organic matter, nutrients, iron and manganese are observed in the water ecosystem. This has resulted in an increase in the concentrations of Fe and Mn in the sediment surface layers; in pore waters up to 13 mg Fe/l and 7 mg Mn/l. The sharp increase in the content of iron and manganese in the bottom sediment can be considered as a possible factor of benthos oppression. Another reason of the benthos decrease is the reduction of anthropogenic load. Now Petrozavodskaya bay receives 3 times less light organic substances than 10 years ago. The third possible reason for the reduction of benthic communities is invasion of baikalian amphipods *Gmelinoides fasciatus*, resulting in the redistribution of organic matter flow from the littoral zone to the pelagic zone and depletion of deepwater benthic food resources.

**Reviewer:** A. V. Krylov

**Received on:** 12 April 2016

**Published on:** 20 June 2016

## References

- Berezina N. A. Causes, characteristics and consequences of the alien species amphipods spread in aquatic ecosystems in Europe, *Biologicheskie invazii v vodnyh i nazemnyh ekosistemah*, Pod red. A. F. Alimova, N. G. Boguckoy. M.; SPb.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2004. P. 254–268.
- Berezina N. A. Panov V. E. Invasion of Baikal amphipods *Gmelinoides fasciatus* in the Lake Onego, *Zoologicheskii zhurnal*. 2003. T. 82. No. 6. P. 731–734.

- Drabkova V. G. Kapustina L. L. Letanskaya G. I. Self-purification processes in Lake Ladoga at various stages of human impact, *Sostoyanie i problemy produkcionnoy gidrobiologii: Sbornik nauchnyh rabot*. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2006. P. 234–241.
- Belkina N. A. Oil pollution of bottom sediments in Petrozavodskaya bay of the Lake Onego, *Vodnye resursy*. 2006. T. 33. No. 2. P. 181–187.
- Belkina N. A. The chemical composition of bottom sediments of the Lake Onego, *Sostoyanie vodnyh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.*, Pod red. P. A. Lozovika. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 2007. P. 40–48.
- Belkina N. A. The sediment role in the processes of organic matter and nutrients transformation in lake ecosystems, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Vodnye problemy Severa i puti ih resheniya*. 2011. No. 4. P. 35–42.
- Belkina N. A. Vapirov V. V. Efremenko N. A. Romanova T. N. To the question of the natural migration of copper in Lake Onego, *Principy ekologii*. 2012. No. 1. P. 23–26. <http://ecopri.ru/journal/article.php?id=483>. DOI: 10.15393/j1.art.2012.483.
- Ivanter E. V. Korosov A. V. Introduction into quantitative biology. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2003. 304 p.
- Kalinkina N. M. Evolutionary aspects of environmental toxicology, *Sovremennye problemy vodnoy toksikologii. K 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora E. A. Veselova: Materialy konf. 17–19 maya 2011 g.* Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2011. P. 61–63.
- Korosov A. V. Special methods of biometrics. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2007. 364 p.
- The largest lakes and water reservoirs' in the northwest of the European territory of Russia: current state and change of ecosystems under climatic and anthropogenic impacts, Pod red. N. N. Filatova, N. M. Kalinkinoy, T. P. Kulikovoy, A. V. Litvinenko, P. A. Lozovika. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2015. 375 p.
- Kuharev V. I. Polyakova T. N. Ryabinkin A. V. Distribution of Baikal amphipods *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) in Lake Onego, *Zoologicheskij zhurnal*. 2008. T. 87. No. 10. P. 1270–1273.
- Guidelines for the sampling and processing of materials in the biological monitoring of pollution in the Gulf of Finland, Pod red. A. F. Alimova, T. M. Florinskoy. SPb., 2005. 68 p.
- Guidelines for the sampling and processing of materials in hydrobiological research on freshwater ecosystems. Zoobenthos and its production. L., 1984. 52 p.
- Nazarova L. E. Variability of interannual average temperatures in Karelia, *Izvestiya RGO*. 2014. T. 146. Vyp. 4. P. 27–33.
- Nazarova L. E. Air precipitation in Karelia, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. No. 9. Ser. Limnologiya. 2015. P. 114–121.
- Nazarova L. E. Filatov N. N. Climate variability according to meteorological observations, *Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob'ekty i vodosbory*. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2004. P. 12–34.
- Ostapenya A. P. Re-oligotrophication or bentification?, *Ozernye ekosistemy: biologicheskie processy, antropogennaya transformaciya, kachestvo vody: Materialy 3-y mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii, 17–22 sentyabrya, 2007 g.* Minsk: Izd. centr BGU, 2007. P. 31–32.
- Polyakova T. N. Macrobenthos of the Lake Onego. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii bazy dannyh No. 2012620882*. 2012.
- Polyakova T. N. Macrobenthos, *Krupneyshie ozero-vodohranilisha Severo-Zapada evropeyskoy territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeystviyakh*, Pod red. N. N. Filatova, N. M. Kalinkinoy, T. P. Kulikovoy, A. V. Litvinenko, P. A. Lozovika. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2015. P. 127–133.
- Reshetnikov Yu. S. The problems of water bodies re-oligotrophication, *Voprosy ihtologii*. 2004. T. 44. No. 5. P. 709–711.
- Guidelines for chemical analysis of surface waters. Ch. 1, Pod. red. L. V. Boevoy. Rostov n/D: NOK, 2009. 104 p.
- Ryabinkin A. V. Polyakova T. N. Macrozoobenthos of a lake and its role in fish food, *Bioresursy Onezhskogo ozero*. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2008. P. 67–91.
- Sidorova A. I. Kalinkina N. M. Invasion of Baikal amphipods *Gmelinoides fasciatus* in the Lake Onego. Seasonal dynamics of population indices. Lap Lambert Academic Publishing, 2015. 80 c.
- Syarki M. T. Fomina Yu. Yu. Seasonal changes in zooplankton of Petrozavodskaya bay of Lake Onego, *Trudy KarNC RAN. Ser. Ekologicheskie issledovaniya*. 2015. No. 1. C. 63–68.
- Tekanova E. V. Lozovik P. A. Kalinkina N. M. Kulikova T. P. Polyakova T. N. Ryabinkin A. V. Slastina Yu. L. Timakova T. M. Chekryzheva T. A. The current state and the transformation of the northern part of Vygozerskoe reservoir, *Trudy KarNC RAN. Vodnye problemy Severa i puti ih resheniya*. 2011. No. 4. P. 50–56.
- Tekanova E. V. Syarki M. T. The peculiarities of primary production process phenology in the pelagic zone of the Lake Onego, *Izvestiya RAN. Ser. biologicheskaya*. 2015. No. 6. P. 645–652.

- Berezina N. A., Strelnikova A. P. The role of the introduced amphipod *Gmelinoides fasciatus* and native amphipods as fish food in two large-scale north-western Russian inland water bodies: Lake Ladoga and Rybinsk Reservoir, *Journal of Applied Ichthyology. Special Issue: Alien Species in Aquaculture and Fisheries*. 2010. Vol. 26. P. 89–95.
- Berezina N. A. Food spectra and consumption rates of four amphipod species from the North-West of Russia, *Fundamental and Applied Limnology/Archiv fur Hydrobiologie*. 2007. Vol. 168. No. 4. P. 317–326.
- Berezina N. A., Zhakova L. V., Zaporozhets N. V., Panov V. E. Key role of the amphipod *Gmelinoides fasciatus* in reed beds of Lake Ladoga, *Boreal Env. Res.* 2009. Vol. 14. No. 3. P. 404–414.
- Efremova T., Palshin N., Zdrovennov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes, *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol. 62. No. 1. P. 33–41.
- Kulik N., Belkina N., Lozovik P., Efremenko N. Trace elements in the Lake Onega, *Abstracts of 4th European Large Lakes Symposium. Ecosystem Services and Management in a Changing World*. August 24–28, 2015. Joensuu, 2015. P. 41.
- Straile D., Geller W. Crustacean zooplankton in Lake Constance from 1920 to 1995: Response to eutrophication and re-oligotrophication, *Advances in Limnology*. 1998. Vol. 53. P. 255–274.
- Tilzer M. M., Gaedke U., Schweizer A., Beese B., Wiese T. Interannual variability of phytoplankton productivity and related parameters in Lake Constance: no response to decreased phosphorus loading?, *Journal of Plankton Research*. 1991. Vol. 13. No. 4. P. 755–777.