



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 3 (41). Сентябрь, 2021

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
A. Gugolek B.
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

А. А. Зорина
А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 591.524.11(470.12)

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ЗНАЧИМЫХ ДЛЯ ЗООБЕНТОСА ОЗЕРА БЕЛОЕ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

ФИЛОНЕНКО

Игорь Владимирович

кандидат биологических наук, Вологодский филиал ФГБНУ «ВНИИ-РО», igor_filonenko@mail.ru

КОМАРОВА

Александра Сергеевна

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук, komarova.as90@yandex.ru

ИВИЧЕВА

Ксения Николаевна

кандидат биологических наук, Вологодский филиал ФГБНУ «ВНИИ-РО», ksenya.ivicheva@gmail.com

Ключевые слова:

зообентос
геоинформационные
системы
макрофиты
донные отложения
уровенный режим озера
данные зондирования
Земли

Аннотация: Для получения сопоставимых данных по кормовой ценности в разнотипных водных объектах необходимо учитывать комплексное действие целого ряда факторов (гидрологических особенностей, характера и типа субстрата, наличия высшей водной растительности и др.). В настоящем исследовании предпринята попытка проанализировать влияние некоторых экологических факторов на количественные показатели зообентоса оз. Белое (Вологодская обл.) с использованием результатов полевых исследований 2010–2020 гг., анализа топографических карт и данных дистанционного зондирования Земли. На большей части акватории озера условия обитания бентоса однотипны, что обусловлено морфометрическими параметрами озера и пологим склоном котловины, имеющей чашеобразную форму и постепенное нарастание глубин. Сроки наступления фенологических явлений в пределах судового хода Волго-Балтийского водного пути смещены по отношению к остальной части озера. Среднегодовое уровенное оз. Белое характеризуется относительным постоянством, при этом отсутствует четко выраженная сезонная динамика колебаний уровня воды, что негативно отражается на гидробионтах мелководной зоны, вызывая их гибель на обмелевших участках. Степень зарастания акватории составляет 3.6 %, распределение сообществ макрофитов по озеру неравномерное (наибольшие площади зарослей формируются в месте слияния р. Кема и р. Ковжа, в устье р. Мегра, а также в истоке р. Шексна). Бентос зарослей характеризуется средними значениями биомассы, но высокой численностью. Показатели зообентоса оз. Белое могут быть охарактеризованы состоянием бентоценозов глубоководной зоны, показателя песчаной литорали, общего показателя устьевых участков рек и истока р. Шексна. Соотношение площади этих биотопов в оз. Белое, рассчитанное по комплексу характеристик, составило 83.3 %, 10.0 % и 6.7 % соответственно. При использовании средних значений зообентоса оз. Белое за последние 10 лет средневзвешенная численность составляет 2539 экз./м², биомасса – 8.0 г/м².

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Н. М. Калинкина

Получена: 11 июня 2021 года

Подписана к печати: 10 октября 2021 года

Введение

Сравнительная оценка состояния кормовой базы водоемов предполагает единый подход в проведении гидробиологических исследований. Качественные и количественные показатели бентоса в значительной степени меняются в зависимости от типа субстрата, наличия высшей водной растительности и гидрологических особенностей местообитания. При использовании обобщенных количественных характеристик зообентоса необходимо учитывать вклад отдельных биотопов (Поздеев, Алексеевнина, 2008; Щербина, 2013; Makarevich, 2019; Федорова, 2020). Чаще всего в практике гидробиологических исследований применяется средневзвешенный показатель численности и биомассы бентоса, который рассчитывается с учетом доли площадей различных биотопов в конкретном водоеме. При этом выделение биотопов основывается прежде всего на типе грунта, другие факторы (глубина, тип растительности, гидрохимический и температурный режим и т. д.) учитываются в меньшей степени. В то же время, например, характеристики фитофильного зообентоса и обитателей грунта отличаются в видовом отношении и по количеству (Ивичева и др., 2021). Для того чтобы учесть влияние комплекса факторов при оценке показателей зообентоса, нами предпринята попытка использовать группу методов, позволяющих сочетать результаты натурных исследований, материалы топографических и тематических карт, данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Наиболее эффективно анализ такой информации позволяют выполнять геоинформационные системы (ГИС).

Целью исследования была оценка состояния факторов, определяющих обилие зообентоса оз. Белое (Вологодская обл.). Для ее решения были поставлены следующие задачи: оценить изменение уровня воды в течение года; картировать распределение преобладающих донных субстратов; определить площадь зарастания высшей водной растительностью; получить количественный показатель обилия зообентоса для оз. Белое в целом.

В качестве модельного объекта было выбрано оз. Белое – одно из крупнейших озер Европы (Herdendorf, 1982; Гусаков, Дружинин, 1983), имеющее важное транспортное, рыбопромысловое, водохозяйственное и экологическое значение. Озеро расположе-

но в западной части Вологодской области, является частью Шекснинского водохранилища и входит в состав Волго-Балтийского водного пути. Для него характерна своеобразная динамика уровня воды, обусловленная в первую очередь не сезонным характером осадков или температуры воздуха, а особенностями функционирования водно-транспортной системы. После создания в 1963–1964 гг. Шекснинского водохранилища уровень воды в озере поднялся на 1 м и при нормальном подпорном уровне площадь озера составляет 1290 км² (Литвинов, 2002; Приказ Росводресурсов..., 2017).

Материалы

В работе использованы оригинальные данные гидробиологических исследований за период с 2010 по 2020 г. Сбор проб зообентоса проводили ежегодно. Пробы в прибрежной зоне отбирали ежеквартально в северо-западной (устье р. Ковжа), северной (с. Троицкое), северо-восточной (с. Липин Бор), южной (г. Белозерск) частях озера (рис. 1). В глубоководной части озера одномоментно отбирали серию проб перед ледоставом (сентябрь – октябрь) с использованием научно-исследовательского судна «Ихтиолог». При сборе зообентоса фиксировали показатели среды, преобладающий тип субстрата и наличие высшей водной растительности.

Данные о распределении грунтов получены в результате оцифровки картосхемы донных отложений оз. Белое (Курочкина, 1981). Батиметрическая карта построена интерполяцией значений глубин атласа Волго-Балтийского водного пути (Атлас..., 2004). Динамику уровня воды в оз. Белое оценивали по гидропосту в г. Белозерске (Allrivers.info, 2020). Площадь акватории озера в паводок и межень, степень зарастания макрофитами анализировали по космическим снимкам из каталога U.S. Geological Survey (USGS) (USGS Global Visualization Viewer, 2020) после обработки ДЗЗ.

Методы

Сбор зообентоса на илах осуществляли дночерпателем Петерсона или Ван-Вина с площадью захвата 0.025 м² (в однократной повторности), на плотных субстратах – штанговым дночерпателем ГР-91 с площадью ковша 0.0045 м² (в трех повторностях). Для промывки проб использовали газ с ячейей 250 мкм, фиксация выполнена 40%-м формалином, разбор и диагностику организмов проводили в лаборатории.

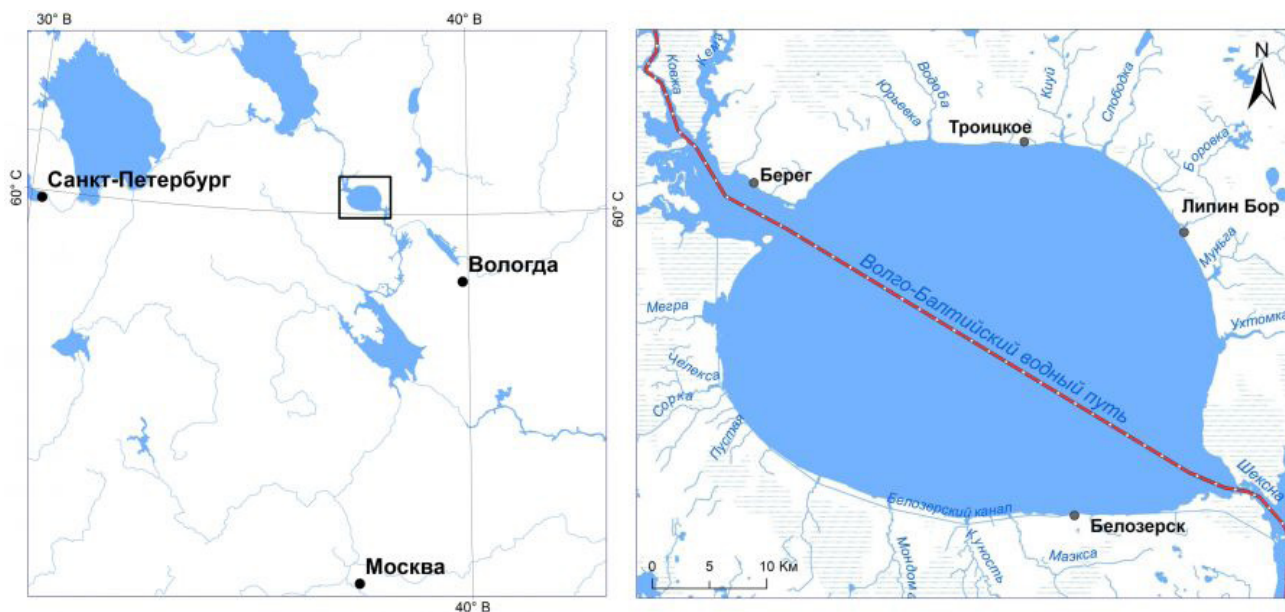


Рис. 1. Карта района исследований и станций отбора проб

Fig. 1. Map of the study area and sampling stations

Показатели кормового зообентоса для всего озера рассчитывали как средневзвешенную величину (Методические рекомендации..., 1983). Всего собрано 250 проб. Для вычисления средневзвешенного показателя использовали численность и биомассу по 218 пробам, собранным в конце вегетационного сезона (средний показатель в августе – ноябре).

В качестве границ анализа ДЗЗ использована вся акватория оз. Белое, разливы в паводок в устьевых участках рек Ковжа, Юрьевка, Киуй, Водоба, Слободка, Боровка, Муньга, Ухтомка, Мегра и истока р. Шексна. Площадь водного зеркала при разных уровнях воды оз. Белое была рассчитана по снимкам ДЗЗ на дату соответствующих значений гидропоста г. Белозерска. Площадь водного зеркала при максимальном уровне воды получена по снимкам Landsat 8 (LC08_L1TP_179018_20200523 и LC08_L1TP_179018_20200615) путем расчета индекса mNDWI (Xu, 2006). Среднеголетний уровень определяли по снимкам спутника Sentinel-2 за май 2018 г. (T37VDG_20180510T084559 и T37VCG_20180510T084559), урез воды при минимальных уровнях – по снимкам за август 2018 г. (T37VDG_20180801T090019 и T37VCG_20180801T090019) с помощью индекса NDWI (McFeeters, 1996). Эти же сцены за август использованы для вычисления зоны, занимаемой водными и прибрежно-водными растениями, путем расчета индекса NDVI (Rouse et al., 1973; Sakuno, Kunii, 2013; Oyama et al., 2015) с дальнейшим сопоставлением с полевыми наблюдениями на кон-

трольных участках мест отбора проб на литорали.

Несмотря на предпочтительное использование индекса mNDWI для оценки площади водных объектов (Xu, 2006), в расчетах по снимкам спутника Sentinel применяли индекс NDWI. Это сделано для достижения единого разрешения растров водной поверхности и вегетационного индекса.

Ошибка картирования растительности по индексу NDVI определена путем сравнения с результатами визуального дешифрирования изображений высокого разрешения сервиса Google maps (0.5 км²) на участок истока р. Шексна за 2018 г. Полностью погруженные в воду растения по ДЗЗ оказались неразличимы, но фиксировались во время полевых исследований среди зарослей гелофитов. В качестве границ для классификации растительности использована площадь озера при максимальных показателях уровня 2020 г. Атмосферную коррекцию ДЗЗ проводили в QGIS. Полученный результат использован только при расчетах индексов mNDWI и NDWI (площадь водного зеркала). Сравнение результатов расчета индекса NDVI, выполненных по снимкам с атмосферной коррекцией, с изображениями высокого разрешения тестовых участков показало отсутствие больших площадей существующих водных растений. Как следствие, для оценки растительности в работе использованы показатели индекса NDVI-снимка, сцена которого покрывает всю акваторию озера, но без атмосферной коррекции. В качестве основного инструмента анализа использовали ArcGIS10.

Результаты

На донные сообщества озер может оказывать влияние ряд факторов: фенологические явления, колебания уровня воды, распределение глубин, тип донных отложений, пространственная структура и степень развития высшей водной растительности. Ниже рассмотрим состояние зообентоса через вклад этих факторов в рамках принадлежности к участкам озера с однородными условиями обитания.

Фенология. Фенологические явления вдоль трассы Волго-Балтийского канала, пересекающей озеро от места впадения р. Ковжа до истока р. Шексна, контрастируют с отдаленными участками озера. В зависимости от наличия течения сход и установление ледового покрова происходят в разные сроки. Наиболее ранняя дата очищения ото льда оз. Белое у г. Белозерска приходится на 23 апреля, средняя – 3 мая, поздняя – 2 июня (Атлас..., 2004). На судовом пути эти процессы наблюдаются заметно раньше. К примеру, для р. Шексна в районе с. Иванов Бор эти же даты соответствуют 11 марта, 26 апреля и 16 мая. Так же, если наиболее ранняя дата начала ледостава у г. Белозерска отмечена 20 октября, средняя – 21 ноября, поздняя – 14 декабря, то в р. Шексна (у с. Иванов Бор) эти показатели соответствуют 26 октября, 18 ноября и 6 января. При этом в период вегетации, благодаря ровной береговой линии и ветрам, разница в условиях обитания организмов нивелируется в связи с постоянным активным перемешиванием водных масс (Воронцов, 1981).

Уровенный режим. Абсолютная отметка проектного уровня Волго-Балтийского канала не меняется на протяжении почти 240 км: в нижнем бьефе шлюза № 6 в пос. Девятины Вытегорского района отметка составляет 112.7 м от уровня Балтийской системы высот, а в верхнем бьефе шлюза № 7–8 в пос. Шексна – 112.8 м (Атлас..., 2004). Среднемноголетний уровень воды за период с 1 апреля по 31 октября по гидропосту в г. Белозерске составил 113.01 м, минимальные показатели – 112.54 м, средний многолетний максимум – 113.18 м (Allrivers.info, 2020). В 2020 г. отмечался экстремально высокий уровень воды, который в мае составил 113.6 м. Таким образом, амплитуда колебаний в оз. Белое по гидропосту в г. Белозерске за период 2008–2020 гг. составляет 1.24 м при средней глубине 4.0 м и максимальных глубинах 6.3 м (Атлас..., 2004).

Площадь акватории озера при максимальном уровне в мае 2020 г. составила 1239.4 км². За период с 2008 г. это самый высокий уровень воды, как правило, такие значения редко достижимы. Площадь озера при среднемноголетнем уровне составила 1215.0 км², при минимальном – 1200.6 км², т. е. водное зеркало (при оценке ДЗЗ на всю акваторию озера) может сокращаться на 3.1 % от уровня 2020 г. (рис. 2). При сравнении со среднемноголетним уровнем водное зеркало оз. Белого уменьшается лишь на 15 км² (1.2 %).

Распределение донных отложений. В результате сопоставления батиметрических данных и карты распределения грунтов (рис. 3) определено, что песчаные субстраты располагаются преимущественно в литоральной зоне от уреза воды до глубины 5.9 м (средняя глубина над песчаными грунтами составляет 3 м). Илистыми субстратами занята центральная часть озера и русла рек (89 % от всей площади озера).

Зарастание. Наибольшие площади зарослей макрофитов расположены в месте слияния р. Ковжа и р. Кема (рис. 4). Весной данная территория представляет собой общий водоем, а в меженный период проявляются контуры берегов рек, существовавших до создания водохранилища. Здесь на мелководьях развиваются как гелофиты, так и погруженные гидрофиты. Схожие условия формируются в устье р. Мегра, где весной образуются существенные площади мелководий, перемежаемые островами (табл. 1). Устья остальных рек простые, однорукавные, больших по площади зарослей водных растений не образуется. В истоке р. Шексна доминантным видом-гелофитом является тростник (*Phragmites australis*), при этом сообщества погруженных водных растений представлены в незначительном количестве в связи с сильным колебанием уровня воды на этом участке (рис. 4). Общая площадь водной и прибрежно-водной растительности, рассчитанная по ДЗЗ, составила 44.8 км² (см. табл. 1). В период снижения уровня воды часть растений оказывается на суше. Так, лишь 13.8 % (6.2 км²) зарослей находятся в воде при самых низких уровнях воды, тогда как оставшаяся часть – на обсыхающих мелководьях (см. табл. 1). Ошибка картирования растительности снимка высокого разрешения сервиса Google maps (0.5 км²) по отношению к результатам дешифрирования с помощью индекса NDVI на участок истока р. Шексна составила 7 %.

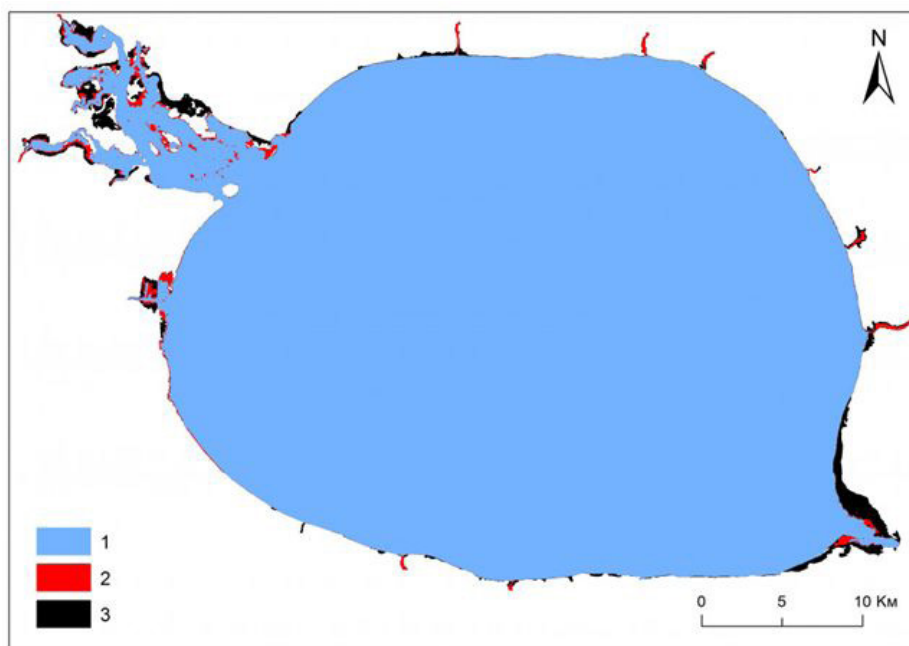


Рис. 2. Площадь акватории оз. Белое при разных уровнях воды: минимальном (1), среднемноголетнем максимальном (2), максимальном 2020 г. (3)

Fig. 2. Water area of Lake Beloe at different water levels: minimum (1), average long-term maximum (2), maximum 2020 (3)

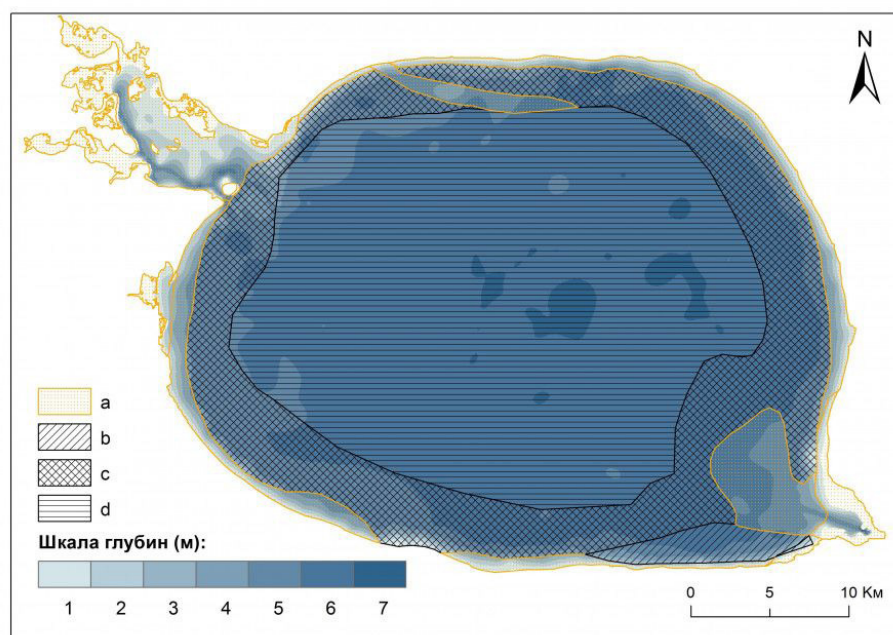


Рис. 3. Распределение донных отложений (по: Курочкина, 1981) на фоне батиметрической карты оз. Белое: а – пески, b – крупноалевритовый ил, c – мелкоалевритовый ил, d – глинистый ил

Fig. 3. Distribution of bottom sediments (according to A. A. Kurochkina, 1981) against the background of the bathymetric map of Lake Beloe: a – sands, b – coarse silt, c – fine silt, d – clayey silt

Распределение зообентоса. Зообентос оз. Белое можно охарактеризовать показателями глубоководной зоны, песчаной литорали и эстуариями устьев рек совместно с истоком р. Шексна (табл. 2). Высокие средние значения характерны для илов глубоководной зоны – 2741 экз./м² и 9.0 г/м². Несколько

ниже показатели в заросших макрофитами устьях рек, характеризующихся чередованием разнотипных донных субстратов, – 2340 экз./м² и 3.5 г/м². Низкие величины обнаружены на песках литоральной зоны – 987 экз./м² и 2.5 г/м² (см. табл. 2).

Таблица 1. Площадь зарастания акватории оз. Белое и отдельных его участков

Участки озера	Площадь зарослей макрофитов, км ²	Степень зарастания акватории, %	Доля макрофитов при минимальном уровне воды, %
Устье р. Ковжа	27	44.6	20.0
Устье р. Мегра	3.5	61.4	14.3
Исток р. Шексна	10.6	60.9	0.9
Озеро в целом	44.8	3.6	13.8

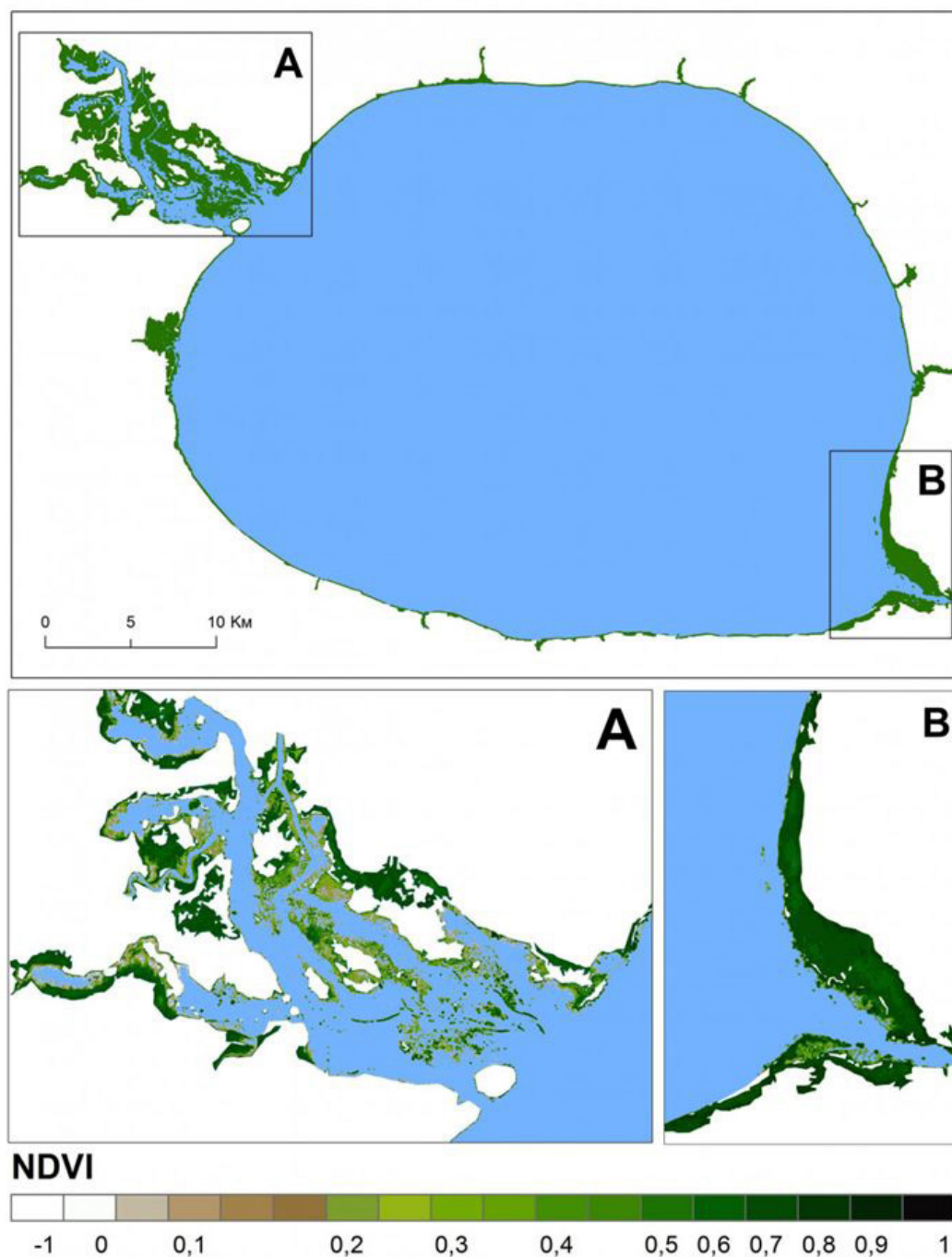


Рис. 4. Степень развития высшей водной растительности в границах максимального уровня воды оз. Белое

Fig. 4. The degree of development of aquatic vegetation within the maximum water level of Lake Beloe

Таблица 2. Средние количественные показатели зообентоса в различных биотопах оз. Белое в 2010–2020 гг.

Тип субстрата	Занимаемая площадь, км ²	Численность		Биомасса	
		экз./м ²	ст. откл.	г/м ²	ст. откл.
Разнотипные илы	1028.0	2741.7	1776.11	9.02	5.560
Песчаные грунты	124.3	987.0	669.24	2.52	1.542
Эстуарии устьев р. Ковжа и р. Мегра, исток р. Шексна	83.6	2339.5	1559.62	3.53	2.167

Обсуждение

Несмотря на однотипные условия обитания зообентоса на большей части акватории оз. Белое, обусловленные пологим склоном котловины (показатель емкости – 0.76) и большими размерами озера (Веселова, Дружинин, 1981), для получения сопоставимых количественных данных необходимо учитывать показатели развития бентосных сообществ глубоководной зоны, песчаной литорали, эстуарии устьев рек (Кема, Ковжа, Мегра) и истока р. Шексна через призму таких факторов, как фенологические процессы, среднегодовая и сезонная динамика уровня воды, донные отложения, характер распределения и степень развития макрофитов.

Сроки наступления сезонных явлений (сход и установление ледового покрова) различаются для судоходной части и отдаленных участков озера. В зимний период участки фарватера остаются долгое время не покрытыми льдом в связи с наличием течения в сторону Рыбинского водохранилища (Литвинов и др., 1981).

В отличие от других крупных озер региона среднесезонный уровеньный режим оз. Белое характеризуется относительным постоянством (среднесезонный уровень по гидропосту г. Белозерска составил 113.0 м; минимальный – 112.5 м; максимальный – 113.2 м) (Allrivers.info, 2020). Для оз. Кубенское амплитуда сезонных колебаний уровня воды может составлять более 2 м. В результате за вегетационный период урез воды в отдельных частях озера смещается до 1 км к центру водоема, что уменьшает зону мелководной литорали на 25 % (Филоненко, 2018). Среднегодовая амплитуда колебаний уровня воды на оз. Воже, по данным М. Ф. Веселовой (1978), составляет 1.4 м.

Для оз. Белое характерно отсутствие четко выраженной сезонной динамики колебания уровня воды. Многолетние показатели гидропоста в г. Белозерске

показывают слабый тренд падения уровня к осени, но периодически годовой максимум может быть достигнут в любой период года. Так же и снижение уровня воды может произойти даже весной, когда сброс воды осуществляется для поддержания работы водного транспорта. Непрогнозируемая динамика уровня воды негативно сказывается на всех гидробионтах мелководной зоны, вызывая их гибель на обмелевших участках.

Преобладание илистых субстратов (89 % от площади озера) и морфометрические параметры водоема, имеющего чащеобразную форму с равномерным нарастанием глубины (Веселова, Дружинин, 1981), определяют однообразие условий обитания донных организмов. Несмотря на представленность илов разного типа, характер распределения зообентоса глубоководной зоны в значительной степени обусловлен уровнем антропогенного воздействия (Филоненко, Ивичева, 2012).

Степень зарастания акватории оз. Белое макрофитами, по нашим данным, незначительна (3.6 %). Для сравнения на оз. Воже данный показатель составляет 10.7 % (Филоненко, Комарова, 2015). По данным И. М. Распопова (1985), высшая водная растительность на оз. Белое занимала площадь в 1320 га, что составляет немногим более 1 % площади водоема. При этом до включения оз. Белое в Волго-Балтийскую систему, по данным автора, площадь зарастания озера достигала 10 %. По материалам картирования 1995 г. зарастание оз. Белое составило 0.5 % от площади акватории и 8.3 % от площади мелководий (Папченков, Козловская, 1998).

Распределение сообществ высшей водной растительности по озеру неравномерное. Основные площади зарослей расположены в северо-западной (устья рек Кема, Ковжа и Мегра) и юго-восточной (исток р. Шексна) частях озера. Наибольшая площадь фитоценозов формируется в месте слияния р. Кема и р. Ковжа (27.0 км²), в

устье р. Мегра (3.5 км²), а также в истоке р. Шексна (10.6 км²). Общая площадь водной и прибрежно-водной растительности для оз. Белое составила 44.8 км². Из них лишь 13.8 % от общей площади зарослей находятся в обводненном состоянии при крайних значениях падения уровня воды. В отдельных частях водоема доля таких биотопов может меняться: в разливах рек Кема и Ковжа составляет 20 %, р. Мегра – 14 %, исток р. Шексна – менее 1 % от площади всех водных растений этих участков. Заросли макрофитов на 90 % представлены воздушно-водными растениями, среди которых доминантом является тростник (*Phragmites australis*). Достаточно слабо развиты гидрофиты и практически отсутствуют гигрофитные ценозы (в частности осочники) (Папченков, Козловская, 1998), что обусловлено сильным и частым волнением (Воронцов, 1981).

Показатели зообентоса оз. Белое могут быть охарактеризованы состоянием бентоценозов, сформировавшихся в устьях рек Кема, Ковжа и Мегра, истоке р. Шексна, а также разнотипных илов глубоководной зоны и песчаной литорали. В большей степени различаются биотопы зообентоса в районе впадения р. Ковжа и в истоке р. Шексна. Здесь определяющее влияние имеют течения, а высшая водная растительность наиболее разнообразна и развита. Активное судоходство, а также проведение дноуглубительных работ по судовому ходу приводят к нарушению структуры донных субстратов и способствуют поступлению в водоем разного рода загрязнителей (Дружинин, Румянцев, 1981).

Без учета экстремально высоких показателей 2020 г. изменения уровня воды оз. Белое в течение года незначительны по амплитуде и оказывают на зообентос умеренное воздействие. Зона, которая обнажается при снижении уровня, занимает не более 3.1 % от всей акватории (если не учитывать отдельно разливы, расположенные в истоке р. Шексна, устьях р. Ковжа и р. Мегра). Здесь обнажается от 34 % (устье р. Ковжа) до 50 % территории (исток р. Шексна и устье р. Мегра). На этих участках развиваются наиболее крупные по площади заросли макрофитов – данные биотопы служат постоянным местообитанием фитофильного зообентоса.

Биотопы прибрежного мелководья расположены на значительном расстоянии от основной магистрали Волго-Балтийского водного пути, где в условиях низкого

коэффициента извилистости береговой линии (1.1) первостепенное значение имеет волновой режим. Макрофиты практически отсутствуют, и высокие показатели зообентоса наблюдаются только среди немногочисленных каменистых гряд. Антропогенное влияние выражено в основном на путях движения крупных судов, для которых возможность подойти к берегу осталась только в районе г. Белозерска и пос. Нижняя Мондома.

Наиболее стабильными характеристиками зообентоса обладает в глубоководной части оз. Белое. Донные субстраты здесь представлены илами, и показатели зообентоса в среднем всегда выше. Основными представителями илов глубоководной зоны являются крупные хирономиды родов *Chironomus*, *Procladius* и виды сем. тубифициды – *Limnodrilus hoffmestery*, *Tubifex newaensis*, *T. tubifex*.

Зообентос активно развивается в зарослях макрофитов, при этом пиковые значения его показателей приходятся на период наибольшего развития фитомассы водной растительности. Сообщества макрофитов приурочены к мелководьям, и падение уровня воды может губительно отражаться не только на зарослях, но и на связанных с ними организмах зообентоса. По урезу воды на каменистых субстратах массово развивается инвазионный вид бокоплавов – *Gmelinoides fasciatus*, хотя общая площадь таких биотопов в озере незначительна.

Для оценки динамики кормовой базы водоема, поиска зависимостей состояния зообентоса и величины добываемых рыбных ресурсов желательно иметь некий общий показатель. В этом отношении характеристикой зообентоса оз. Белое могут быть состояние бентоценозов глубоководной зоны, показатель песчаной литорали, общий показатель устьев рек (Кема, Ковжа и Мегра) и истока р. Шексна. Соотношение этих биотопов в оз. Белое, рассчитанное по комплексу характеристик, составило 83.3 %, 10.0 % и 6.7 % соответственно. При использовании средних количественных значений зообентоса оз. Белое за последние 10 лет средневзвешенная численность составляет 2539 экз./м², биомасса – 8.0 г/м².

Заключение

Применение ГИС для оценки состояния зообентоса водоемов позволяет использовать большой набор разнотипных данных – топографических карт, ДЗЗ,

показателей станций учета. Проведение анализа по стандартизированной схеме дает возможность сравнивать разнотипные водные объекты по кормовой ценности. Определение площади биотопов зообентоса на основе влияния уровня воды, субстрата и степени развития высшей водной растительности позволило оценить средневзвешенную биомассу зообентоса оз. Белое (8.0 г/м^2), что в целом соотносится с величинами для других рыбопромысловых водоемов Вологодской области: оз. Кубенское – 7.1 г/м^2 (Филоненко, 2018),

оз. Воже – 3.0 г/м^2 (Филоненко, Комарова, 2017).

Зонирование водоема посредством геоинформационного анализа во многом применимо в отношении других гидробионтов. Так, площадь зоны затопления и степень развития высшей водной растительности характеризуют состояние основных нерестилищ фитофильных видов рыб и определяют условия формирования скоплений фитофильных видов зоопланктона.

Библиография

- Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Т. 3, ч. 2. Волго-Балтийский водный путь. От Онежского озера до Рыбинского водохранилища. М.: Росречфлот, 2004. 14 с.
- Веселова М. Ф. Природные особенности озер Воже и Лача // Гидробиология озер Воже и Лача в связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг. Л.: Наука, 1978. С. 5–11.
- Веселова М. Ф., Дружинин Г. В. Природные условия, этапы освоения и история исследования // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть I. Гидрология и гидрохимия озера Белого. Л.: Наука, 1981. С. 5–23.
- Воронцов Ф. Ф. Волнение // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть I. Гидрология и гидрохимия озера Белого. Л.: Наука, 1981. С. 58–68.
- Гусаков Б. Л., Дружинин Г. В. Белое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 112 с.
- Дружинин Г. В., Румянцев В. Б. Влияние судоходства на прозрачность и температуру воды // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть I. Гидрология и гидрохимия озера Белого. Л.: Наука, 1981. С. 220–225.
- Ивичева К. Н., Комарова А. С., Угрюмова Е. В., Филоненко И. В. Сообщества беспозвоночных зарослей макрофитов разнотипных водных объектов Вологодской области // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2021. Вып. 94 (97). С. 94–104. DOI: 10.47021/0320-3557-2021-94-104.
- Курочкина А. А. Донные отложения // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть II. Гидробиология и донные отложения озера Белого. Л.: Наука, 1981. С. 131–149.
- Литвинов А. С. Общие сведения о водохранилище // Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища. Ярославль: ЯГТУ, 2002. С. 5–9.
- Литвинов А. С., Охлопкова А. Н., Тержевик А. Ю. Течения и внутренний водообмен // Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть I. Гидрология и гидрохимия озера Белого. Л.: Наука, 1981. С. 68–83.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л., 1983. 47 с.
- Папченков В. Г., Козловская О. И. Флора и растительность Шекснинского водохранилища // Ботанический журнал. 1998. Т. 83, № 11. С. 13–23.
- Поздеев И. В., Алексеевнина М. С. Роль личинок хирономид в структуре донных сообществ рек бассейна Верхней и Средней Камы // Биология внутренних вод. 2008. № 2. С. 57–61.
- Приказ Росводресурсов от 14.09.2017 № 194 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Ковжского и Шекснинского водохранилищ». URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/37353> (дата обращения: 15.02.2020).
- Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 197 с.
- Федорова Л. П. Оценка состояния зообентоса Иваньковского водохранилища с целью биомониторинга водной среды // Вестник ТвГУ. Сер. «География и геоэкология». 2020. № 1 (29). С. 40–51. DOI: 10.26456/2226-7719-1-2020-40-51.
- Филоненко И. В. Оценка количественных показателей макрозообентоса озера Кубенского методами ГИС // Рыбохозяйственные водоемы России: фундаментальные и прикладные исследования: Материалы II Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Санкт-Петербург, 2–4 апреля 2018 г.). СПб., 2018. С. 379–383.
- Филоненко И. В., Ивичева К. Н. Динамика изменения площади потенциальных нерестилищ озера Кубенского // Рыбохозяйственные водоемы России: фундаментальные и прикладные исследования: Материалы междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию ГосНИОРХ. СПб.: ООО «Проект-цвет», 2014. С. 767–772.

- Филоненко И. В., Ивичева К. Н. Оценка пространственного распределения макрозообентоса Шекснинского водохранилища методами геоинформационного анализа // Бассейн Волги в XXI-м веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ: Сб. материалов докл. участников Всерос. конф. Ижевск: Издатель Пермьяков С. А., 2012. С. 315–317.
- Филоненко И. В., Комарова А. С. Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. Т. 4, № 4. С. 63–72. DOI: 10.15393/j1.art.2015.4622.
- Филоненко И. В., Комарова А. С. Степень развития макрозообентоса различных участков акватории оз. Воже как показатель состояния кормовой базы рыб // Эволюционные и экологические аспекты изучения живой материи: Материалы I Всерос. науч. конф. (Череповец, 8–9 февраля 2017 г.). Череповец: ЧГУ, 2017. С. 163–168.
- Щербина Г. Х. Видовой состав и структура макрозообентоса озера Севан в период повышения его уровня // Биология внутренних вод. 2013. № 2. С. 44–50. DOI: 10.7868/S0320965213020083.
- Allrivers.info – уровень рек онлайн. URL: <https://allrivers.info> (дата обращения: 15.02.2020).
- Herdendorf C. E. Large Lakes of the World // Journal of Great Lakes Research. 1982. Vol. 8. Issue 3. P. 379–412. DOI: 10.1016/S0380-1330(82)71982-3.
- Makarevich O. A. Basic results of long-term makrozoobenthos studies in lakes Naroch, Myastro, and Batorino (Belarus) // J. Sib. Fed. Univ. Biol. 2019. Vol. 12, No. 2. P. 180–195. DOI: 10.17516/1997-1389-0038.
- McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
- Oyama Y., Matsushita B., Fukushima T. Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands // Remote Sensing of Environment, Special Issue: Remote Sensing of Inland Waters. 2015. Vol. 157. P. 35–47. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.031.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, Washington DC, 10–14 December 1973. Washington, 1973. P. 309–317.
- Sakuno Y., Kunii H. Estimation of Growth Area of Aquatic Macrophytes Expanding Spontaneously in Lake Shinji Using ASTER Data // International Journal of Geosciences. 2013. Vol. 4. P. 1–5. DOI: 10.4236/ijg.2013.46A1001.
- USGS Global Visualization Viewer. URL: <http://glovis.usgs.gov> (дата обращения: 15.02.2020).
- Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

Благодарности

Работа А. С. Комаровой выполнена в рамках государственного задания № 121051100109-1. Работа И. В. Филоненко выполнена в рамках государственного задания № 076-00002-21-01. Авторы благодарят команду научно-исследовательского судна «Ихтиолог» (капитан В. Л. Скулябин) и коллег Вологодского отделения ВНИРО, принимавших участие в ежегодных траловых съемках, а также Д. А. Филиппова (ИБВВ РАН, ТюмГУ) за обсуждение рукописи.

ANALYSIS OF FACTORS SIGNIFICANT TO ZOOBENTHOS OF LAKE BELOE, VOLOGDA REGION

FILONENKO
Igor Vladimirovich

PhD, Vologda branch of VNIRO, igor_filonenko@mail.ru

KOMAROVA
Aleksandra Sergeevna

I.D.Papanin Institute of Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, komarova.as90@yandex.ru

IVICHEVA
Ksenia Nikolaevna

PhD, Vologda branch of VNIRO, ksenya.ivicheva@gmail.com

Keywords:

zoobenthos
geographic information
systems
macrophytes
bottom sediments
lake level regime
Earth sensing data

Summary: To obtain comparable data on food value in different types of water bodies, it is necessary to take into account the complex effects of a number of factors (hydrological features, the nature and type of substrate, the presence of aquatic vegetation, etc.). In this study, an attempt is made to analyze the influence of some environmental factors on the quantitative indicators of zoobenthos of Lake Beloe (Vologda Region) using the results of field research in 2010–2020, analysis of topographic maps and remote sensing data of the Earth. In most of the lake's water area, the habitat conditions of benthos are of the same type, which is due to the morphometric parameters of the lake and the gentle slope of the basin, which has a bowl-like shape and a gradual increase in depths. The timing of the onset of phenological phenomena within the navigation pass of the Volga-Baltic waterway is shifted relative to the rest of the lake. The average long-term level regime of Lake Beloe is characterized by relative constancy, while there is no clearly pronounced seasonal dynamics of water level fluctuations, which negatively affects the hydrobionts of the shallow water zone, causing their death in shallow areas. The degree of overgrowth of the water area is 3.6 %, the distribution of macrophyte communities on the lake is uneven (the largest areas of thickets are formed at the confluence of the Kema River and Kovzha River, at the estuary of the Megra River, as well as at the source of the Sheksna River). Benthos of thickets is characterized by average values of biomass, but a high abundance. Zoobenthos indicators of Lake Beloe can be characterized by the state of the benthocenoses of the deep-water zone, the indicator of the sandy littoral zone, the general indicator of the estuaries of rivers and the source of the Sheksna River. The ratio of the area of these biotopes in Lake Beloe, calculated according to a set of characteristics, was 83.3 %, 10.0 % and 6.7 %, respectively. When using the average values of the zoobenthos of Lake Beloe over the past 10 years, the weighted average number is 2539 individuals/m², biomass – 8.0 g/m².

Reviewer: N. M. Kalinkina

Received on: 11 June 2021

Published on: 10 October 2021

References

- Allrivers.info – uroven' rek onlayn. URL: <https://allrivers.info> (data obrascheniya: 15.02.2020).
Druzhinin G. V. Rumyantsev V. B. Influence of shipping on water clarity and temperature, *Antropogennoe vliyaniye na krupnye ozera Severo-Zapada SSSR. Chast' I. Gidrologiya i gidrohimiya ozera Belogo. L.*: Nauka, 1981. P. 220–225.
Fedorova L. P. Assessment of the zoobenthos status of the Ivankovo reservoir for the purpose of

- biomonitoring of the aquatic environment, *Vestnik TvGU. Ser. «Geografiya i geoekologiya»*. 2020. No. 1 (29). P. 40–51. DOI: 10.26456/2226-7719-1-2020-40-51.
- Filonenko I. V. Ivicheva K. N. Assessment of the spatial distribution of macrozoobenthos of the Sheksna reservoir using the methods of geoinformation analysis, *Basseyon Volgi v XXI-m veke: struktura i funkcionirovanie ekosistem vodohranilisch: Sb. materialov dokl. uchastnikov Vserop. konf. Izhevsk: Izdatel' Permyakov P. A.*, 2012. C. 315–317.
- Filonenko I. V. Ivicheva K. N. Dynamics of changes in the area of potential spawning grounds of Lake Kubenskoe, *Rybohozyaystvennyye vodoemy Rossii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Materialy mezhdunar. nauch. konf., posvyasch. 100-letiyu GosNIORH. SPb.: OOO «Procvet»*, 2014. P. 767–772.
- Filonenko I. V. Komarova A. S. Long-term dynamics of overgrowing area with coastal aquatic vegetation in Lake Vozhe, *Principy ekologii*. 2015. T. 4, No. 4. P. 63–72. DOI: 10.15393/j1.art.2015.4622.
- Filonenko I. V. Komarova A. S. The degree of development of macrozoobenthos in various parts of Lake Vozhe as an indicator of the state of the fish food reserve, *Evolucionnye i ekologicheskie aspekty izucheniya zhivoy materii: Materialy I Vserop. nauch. konf. (Cherepovec, 8–9 fevralya 2017 g.)*. Cherepovec: ChGU, 2017. P. 163–168.
- Filonenko I. V. Assessment of quantitative indicators of macrozoobenthos of Lake Kubenskoe by GIS methods, *Rybohozyaystvennyye vodoemy Rossii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Materialy II Vserop. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem (Sankt-Peterburg, 2–4 aprelya 2018 g.)*. SPb., 2018. P. 379–383.
- Gusakov B. L. Druzhinin G. V. Lake Beloe. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 112 p.
- Herdendorf C. E. Large Lakes of the World, *Journal of Great Lakes Research*. 1982. Vol. 8. Issue 3. P. 379–412. DOI: 10.1016/s0380-1330(82)71982-3.
- Ivicheva K. N. Komarova A. S. Ugryumova E. V. Filonenko I. V. Macrophyte-associated macroinvertebrates of heterogeneous water bodies of the Vologda region, Russia, *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I. D. Papanina RAN*. 2021. Vyp. 94 (97). P. 94–104. DOI: 10.47021/0320-3557-2021-94-104.
- Kurochkina A. A. Bottom sediments, *Antropogennoe vliyanie na krupnye ozera Severo-Zapada SSSR. Chast' II. Gidrobiologiya i donnye otlozheniya ozera Belogo. L.: Nauka*, 1981. P. 131–149.
- Litvinov A. S. Ohlopkova A. N. Terzhevik A. Yu. Currents and internal water exchange, *Antropogennoe vliyanie na krupnye ozera Severo-Zapada SSSR. Chast' I. Gidrologiya i gidrohimiya ozera Belogo. L.: Nauka*, 1981. P. 68–83.
- Litvinov A. S. General information about the reservoir, *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy Sheksninskogo vodohranilisha. Yaroslavl': YaGTU*, 2002. P. 5–9.
- Makarevich O. A. Basic results of long-term makrozoobenthos studies in lakes Naroch, Myastro, and Batorino (Belarus), *J. Sib. Fed. Univ. Biol*. 2019. Vol. 12, No. 2. P. 180–195. DOI: 10.17516/1997-1389-0038.
- McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
- Methodical recommendations for the collection and processing of materials for hydrobiological research in freshwater reservoirs. *Zoobenthos and its products. L.*, 1983. 47 p.
- On approval of the Rules for the use of water resources of the Kovzhskoe and Sheksninskoe reservoirs. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/37353> (data obrascheniya: 15.02.2020).
- Oyama Y., Matsushita B., Fukushima T. Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands, *Remote Sensing of Environment, Special Issue: Remote Sensing of Inland Waters*. 2015. Vol. 157. P. 35–47. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.031.
- Papchenkov V. G. Kozlovskaya O. I. Flora and vegetation of the Sheksna reservoir, *Botanicheskiy zhurnal*. 1998. T. 83, No. 11. P. 13–23.
- Pozdeev I. V. Aleksevina M. S. The role of chironomid larvae in the structure of river benthic communities of the upper and middle Kama River basin, *Biologiya vnutrennih vod*. 2008. No. 2. P. 57–61.
- RF. T. Atlas of the unified deep-water system of the European part of the Russian Federation. T. 3, part 2. Volga-Baltic waterway. From Lake Onega to Rybinsk Reservoir. M.: Rosrechflot, 2004. 14 p.
- Raspopov I. M. Higher aquatic vegetation of large lakes in the North-West of the USSR. L.: Nauka, 1985. 197 p.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, Washington DC, 10–14 December 1973*. Washington, 1973. P. 309–317.
- Sakuno Y., Kunii H. Estimation of Growth Area of Aquatic Macrophytes Expanding Spontaneously in Lake Shinji Using ASTER Data, *International Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 4. P. 1–5. DOI: 10.4236/ijg.2013.46A1001.
- Scherbina G. H. The species composition and structure of macrozoobenthos of Lake Sevan during the

- period of its water level increase, *Biologiya vnutrennih vod*. 2013. No. 2. P. 44–50. DOI: 10.7868/S0320965213020083.
- USGS Global Visualization Viewer. URL: <http://glovis.usgs.gov> (data obrascheniya: 15.02.2020).
- Veselova M. F. Druzhinin G. V. Natural conditions, stages of development and history of research, Antropogennoe vliyanie na krupnye ozera Severo-Zapada SSSR. Chast' I. *Gidrologiya i gidrohimiya ozera Belogo*. L.: Nauka, 1981. P. 5–23.
- Veselova M. F. Natural features of lakes Vozhe and Lacha, *Gidrobiologiya ozer Vozhe i Lacha v svyazi s prognozom kachestva vod, perebrasyvaemyh na yug*. L.: Nauka, 1978. P. 5–11.
- Voroncov F. F. Wave, Antropogennoe vliyanie na krupnye ozera Severo-Zapada SSSR. Chast' I. *Gidrologiya i gidrohimiya ozera Belogo*. L.: Nauka, 1981. P. 58–68.
- Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.