Московская школа на Юго-Западе №1543
Кафедра биологии

Изменчивость формы тела *Bosmina* (*Eubosmina*) у юго-восточного берега Ладожского озера и в Лахтинском заливе

А. Д. Авдеенко
Д. С. Кашин
К. В. Сим

Научные руководители:
П. А. Волкова
Н. С. Глаголева

Москва
2021

Введение

Наше исследование посвящено изменчивости планктонных организмов в различных водоемах Нижне-Свирского заповедника.

Объектом наших исследовании являются планктонные организмы, которые относятся к роду *Bosmina* (надкласс Crustacea надотряд Cladocera семейство Bosminidae), а именно подрод *Eubosmina* Selegro, 1900.

Босмины обитают в пресных и солоноватых водоемах, питаются водорослями (Korosi et al., 2013) и бактериями (Toth, Kato, 1997). У босмин присутствует фенотипическая пластичность – популяционная изменчивость формы тела организма, в зависимости от факторов окружающей среды, например, кислотности, трофности водоёма, количества хищников. *Bosmina (Eubosmina)* являются пищей для некоторых видов рыб и беспозвоночных хищников (например, *Leptodora*, *Polyphemus*, *Asplanchna*). Изменения в форме тела *Bosmina* могут приводить к тому, что беспозвоночные хищники будут поедать их реже (Faustova et al., 2010). К примеру, мукро (вентральный вырост на нижней поверхности створки), длинный вырост антеннул и горб являются защитными образованиями от беспозвоночных хищников (Котов, 2013). Доминирование морфотипа с загнутыми антеннулами и коротким мукро в водоеме может свидетельствовать о том, что в роли хищников выступают рыбы (Adamczuk, 2015).

Морфотип – это часть популяции или группа популяции, имеющая сходные морфологические особенности. Босмин затруднительно распределять по морфотипам, так как форма и размер тела подвергаются постоянному изменению (Korosi et al., 2013). При определении морфотипа могут возникнуть проблемы с объективностью разграничения морфотипов между собой из-за существования переходных форм. В таких случаях решить проблему помогает метод геометрической морфометрии. Этот метод позволяет сравнивать объекты по их форме, исключая различия в размерах. Геометрическая морфометрия основана на анализе координат точек, расставляемых по контуру объекта (Павлинов, 2002).

Мы преследуем цель продолжить исследования изменчивости формы тела *Bosmina (Eubosmina)*, проведенные ранее (Рябова, 2020; Киселёва и др., 2019; Ковалёва, Смирнова 2018). Необходимо продолжить исследование, чтобы понять, существует ли зависимость между наличием определенных морфотипов и различными внешними условиями (например, наличием хищников), а также проанализировать морфотипы босмин из Лахтинского залива, сравнить морфотипы представителей подрода *Eubosmina* на примере Ладожского озера и Лахтинского залива (см. рис. 1).

Цель работы

Выделить и сравнить морфотипы *Bosmina* (*Eubosmina)* у юго-восточного берега Ладожского озера и в Лахтинском заливе, понять, как они связаны с внешними условиями.

Задачи

1. Изучить, какие морфотипы встречаются у юго-восточного берега Ладожского озера и в Лахтинском заливе.
2. Проанализировать связь между формой тела босмин и условиями, в которых были собраны пробы (место, расстояние от берега).
3. Проанализировать связь между формой тела босмин и наличием хищников в пробе.

Материалы и методы

Нам были предоставлены пробы, собранные на территории Нижне-Свирского заповедника 26.06.2020 у юго-восточного берега Ладожского озера на расстоянии 300 и 1500 метров, а также пробы, взятые в Лахтинском заливе на расстоянии примерно 25-30 метров от берега 22.06.2020 (около стационара), 27.06.2020 (в месте впадения Лахтинского залива в Свирь) и 27.06.2020 (устье ручья Ваемский) (рис. 1, рис. 2).

Пробы были собраны сачком №48. Сачок погружали в воду и проплывали примерно 50 метров вдоль берега. Далее пробы фильтровали, пропуская через мельничный газ. Отфильтрованная масса помещалась в пробирки с 96% этиловым спиртом. Каждая проба была объемом 30 мл.

Мы отмеряли с помощью штемпель-пипетки 3.5 мл пробы, помещали в камеру Богорова и разбавляли проточной водой. Дальше производили подсчет босмин, отдельно половозрелых/неполовозрелых (половозрелость *Eubosmina* мы определяем по наличию яиц в выводковой камере или (в редких случаях) ее размерам относительно общего размера босмины, с мукро/без мукро и различных беспозвоночных хищников, которые могут питаться босминами (*Leptodora*, *Polyphemus*, *Asplanchna*) под бинокуляром (Микромед МС-1). При подсчете пытались выделять определенные морфотипы на глаз. Беспозвоночных хищников мы определяли по «Летние школьные практики по пресноводной гидробиологии» (Глаголев, Чертопруд, 1999). Босмин определяли выборочно Глаголева Н.С. и Дадыкин И.А. по определителю «Keys to Palaearctic Fauna: Thorp and Covich’s Freshwater Invertabrates» (Rogers, Thorp, 2019).

После мы помещали половозрелых босмин под микроскоп и фотографировали с помощью камеры Webbers MyScope 300 M. Всего мы получили 158 фотографии (табл. 1). Далее мы обводили фотографии в программе Photoshop/Figma, получая контур босмин.

Место	Количество полученных фотографии
Ладога, 300 метров	37
Ладога, 1500 метров	24
Устье ручья Ваемский	28
У стационара	20
Место впадения Лахтинского залива в Свирь	49
Всего	158

Таблица 1. Количество полученных фотографии половозрелых босмин.

Рисунок 1. Карта Нижне-Свирского государственного природного заповедника (изображение с сайта geosfera.org с изменениями). Цифрами обозначены: •1 – Ладога, 1.5 км., •2 – Ладога, 300 м., •3 – стационар, •4 – устье ручья Ваемский, •5 – место впадения Лахтинского залива в Свирь

Рисунок 2. Карта Нижне-Свирского государственного природного заповедника (изображение с сайта geosfera.org с изменениями). Цифрами обозначены: •1 – Ладога, 1.5 км., •2 – Ладога, 300 м., •3 – стационар, •4 – устье ручья Ваемский, •5 – место впадения Лахтинского залива в Свирь

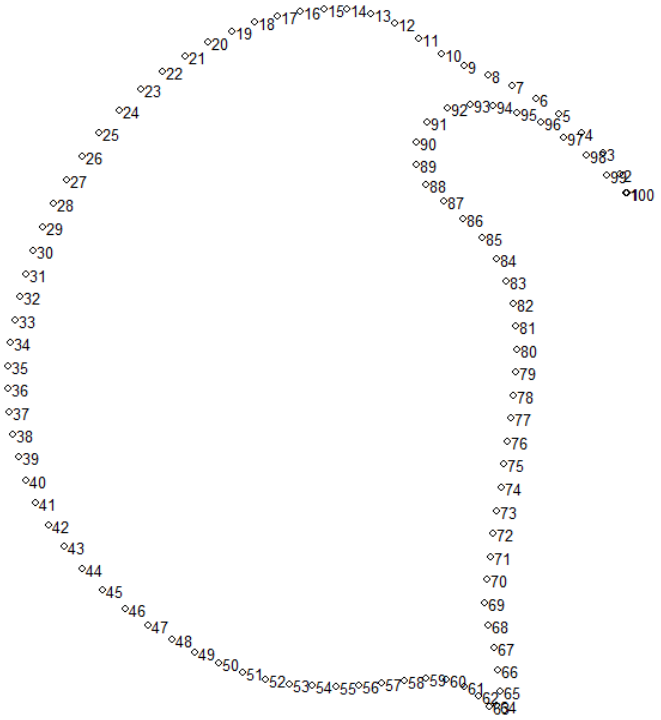


Рисунок 3. Положение точек на контуре босмины.

Далее, используя контуры босмин, в программе tpsDig мы автоматически расставляли 100 точек против часовой стрелки через равные промежутки, начиная с вершины антеннулы (рис. 3).

Мы получили координаты этих точек и, используя их, построили график относительных деформации и нашли координаты точек «эталонной босмины» в программе tpsRelw.

С помощью метода геометрической морфометрии мы сравнивали формы босмин между собой, а также с морфотипами, описанными в литературе (рис. 4).

В программе R мы строили диаграммы распределения морфотипов, которые приведены ниже.

Рисунок 4. Морфотипы, описанные в литературе (Faustova et al., 2010; Faustova et al., 2011).

Результаты

Распределение босмин по морфотипам и сравнение полученных морфотипов с теми, что описаны в литературе

При подсчетах мы выделяли морфотипы на глаз, сравнивая их с рисунками из литературы (табл. 2). Затем по фотографиям, используя метод геометрической морфометрии, мы построили распределения относительной деформации формы тела босмин.

В Лахтинском заливе мы выделили две обособленных группы босмин (рис. 5).

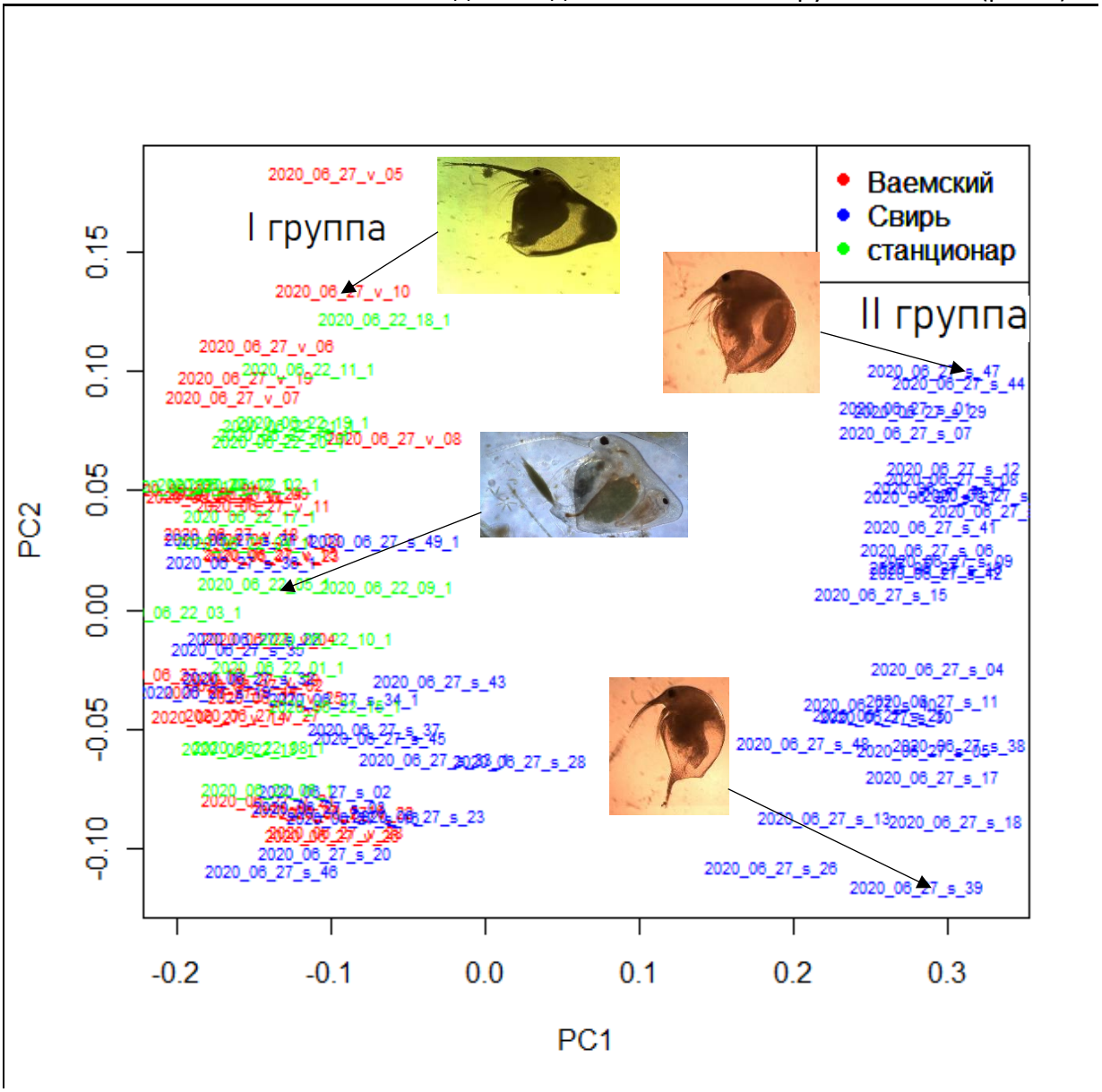


Рисунок 5. Распределение относительных деформаций формы тела босмин. Каждая босмина обозначена «кодом», в котором через нижнее подчеркивание перечислены дата и место сбора пробы и порядковый номер фотографии. Цветами обозначены: синим – босмины, собранные в Лахтинском заливе у Свири, красным – босмины, собранные в устье ручья Ваемский, зеленым – босмины, собранные у стационара.

Для первой из них характерны длинные антеннулы, отсутствие мукро и угловатая форма тела (то есть наличие «горба» на выводковой камере) (рис. 6). Такие босмины

встречаются в пробах, взятых у стационара, в месте впадения ручья Ваемский в Лахтинский залив, и, в небольшом количестве, в месте впадения Лахтинского залива в Свирь.

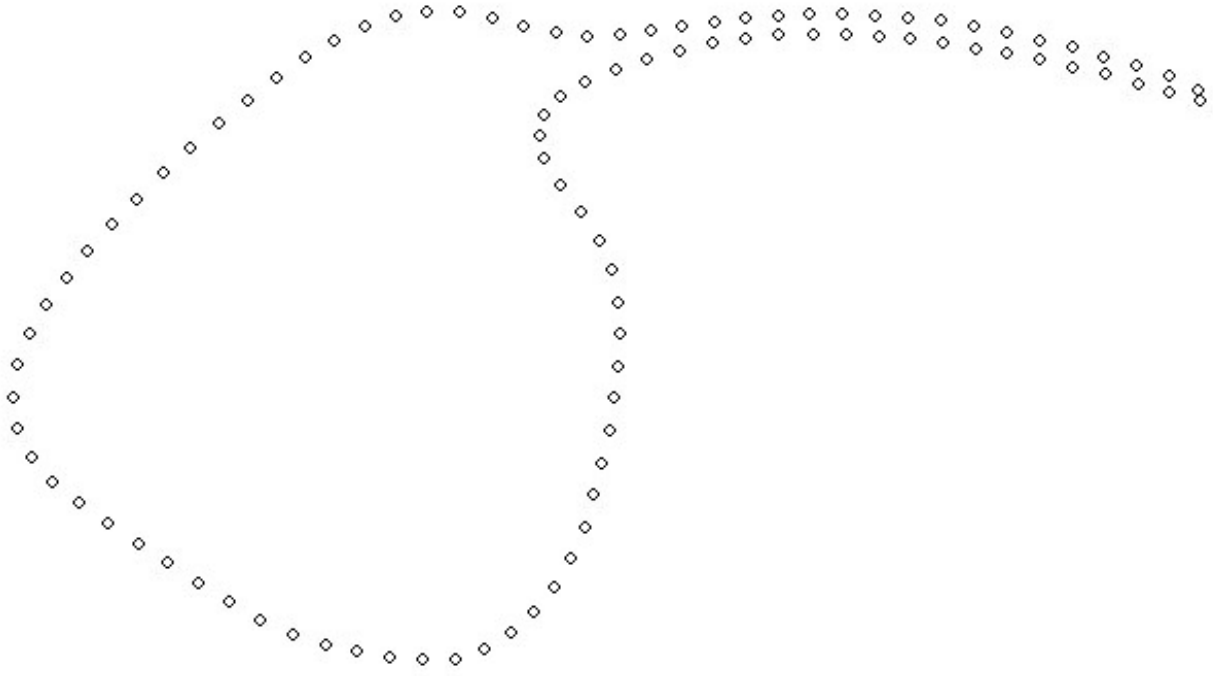


Рисунок 6. Усредненная форма тела образцов из первой группы.

Для второй группы характерны короткие относительно размеров тела антеннулы, мукро и округлая форма тела. Такие босмины встречаются только в месте впадения Лахтинского залива в Свирь (рис. 7).

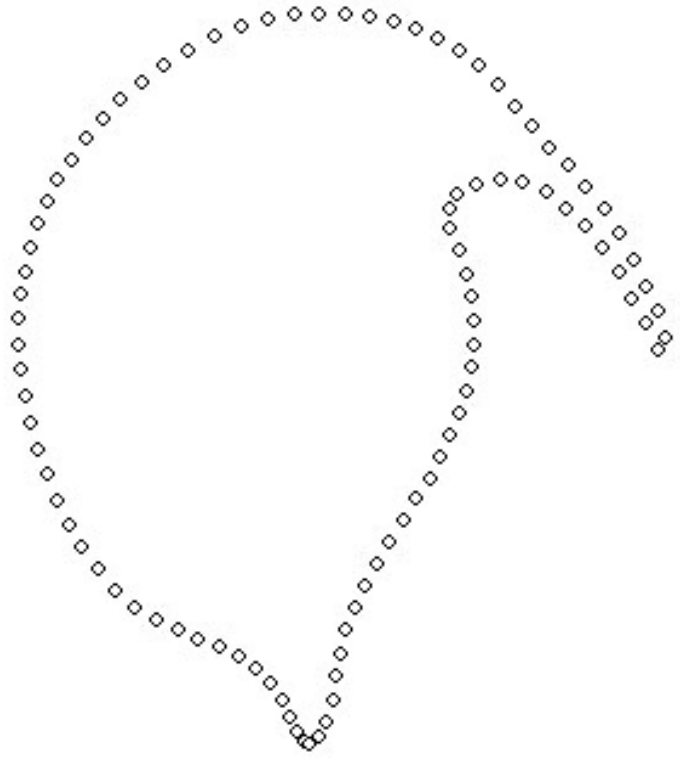


Рисунок 7. Усредненная форма тела образцов из второй группы.

Соотнеся полученные данные с литературой, мы выделили определенные морфотипы босмин. В первой группе мы выделяем морфотипы *Bosmina gibbera* (половозрелые и неполовозрелые), *Bosmina crassicornis* (неполовозрелые) и *Bosmina coregoni* (неполовозрелые). Во второй группе мы отнесли босмин к половозрелым *Bosmina longispina.* Также, исходя из данных рисунка 5, стоит отметить, что среди босмин первой группы четких различий между морфотипами нет.

В Ладоге с помощью геометрической морфометрии не удалось выделить четко различающихся по форме групп, как мы видим на распределении ниже (рис. 8). При подсчетах нами они были разделены на морфотипы: *B. longispina, B. coregoni (неполовозрелые), B. reflexa* (неполовозрелые, половозрелые, «странные» и без мукро, что не характерно для данного морфотипа), *B. kessleri* (половозрелые) и *B. crassicornis* (половозрелые и неполовозрелые) (табл. 2*).*

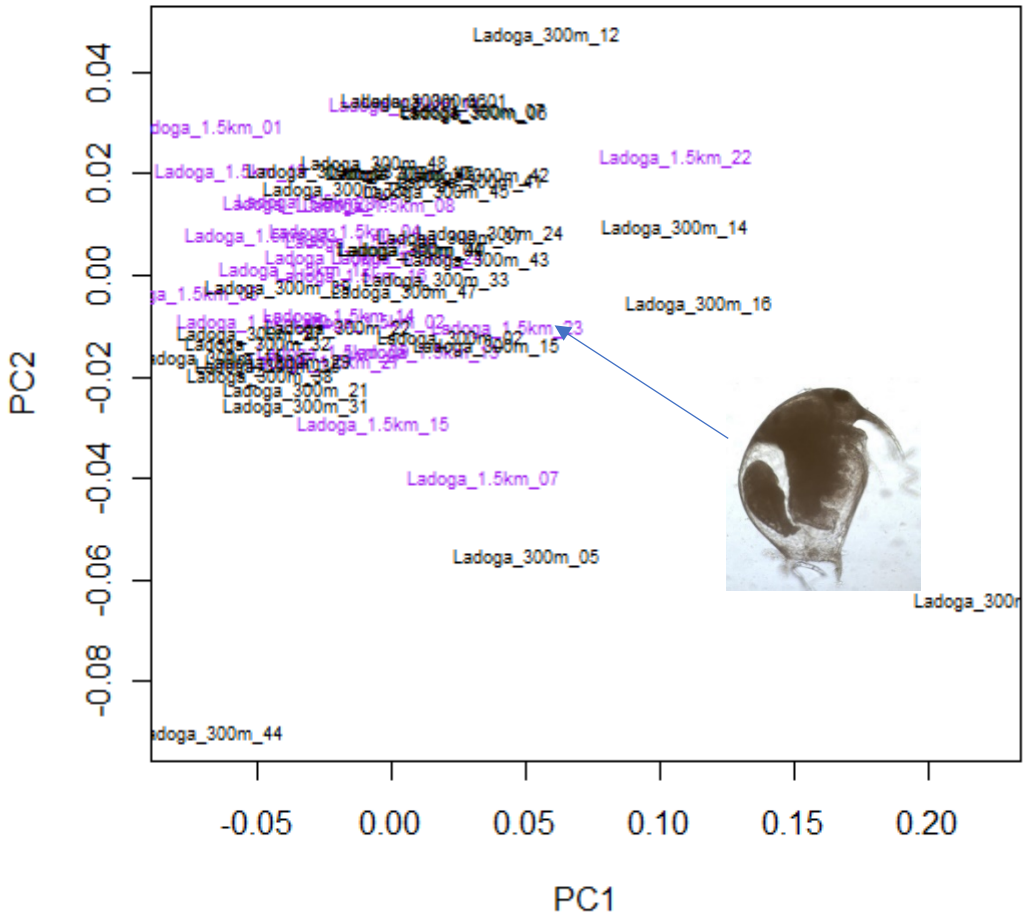


Рисунок 8. Распределение относительных деформаций формы тела босмин. Каждая босмина обозначена «кодом»,в котором через нижнее подчеркивание перечислены дата и место сбора пробы и порядковый номер фотографии. Цветами обозначены: фиолетовым - босмины, собранные на расстоянии 1500 м от берега, чёрным - босмины, собранные на расстоянии 300 м от берега.

Для Ладоги усредненная форма тела босмин представлена на рисунке 9.

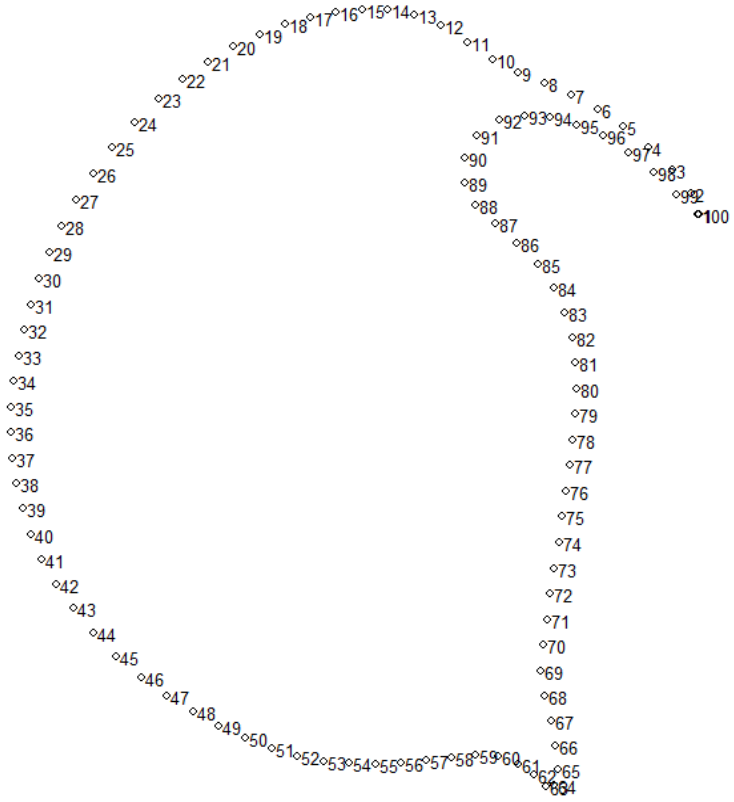


Рисунок 9. Усредненная форма тела образцов из Ладоги.

Общее распределение деформаций. Распределение, построенное по образцам и из Лахты и из Ладоги, показано на рисунке 10.

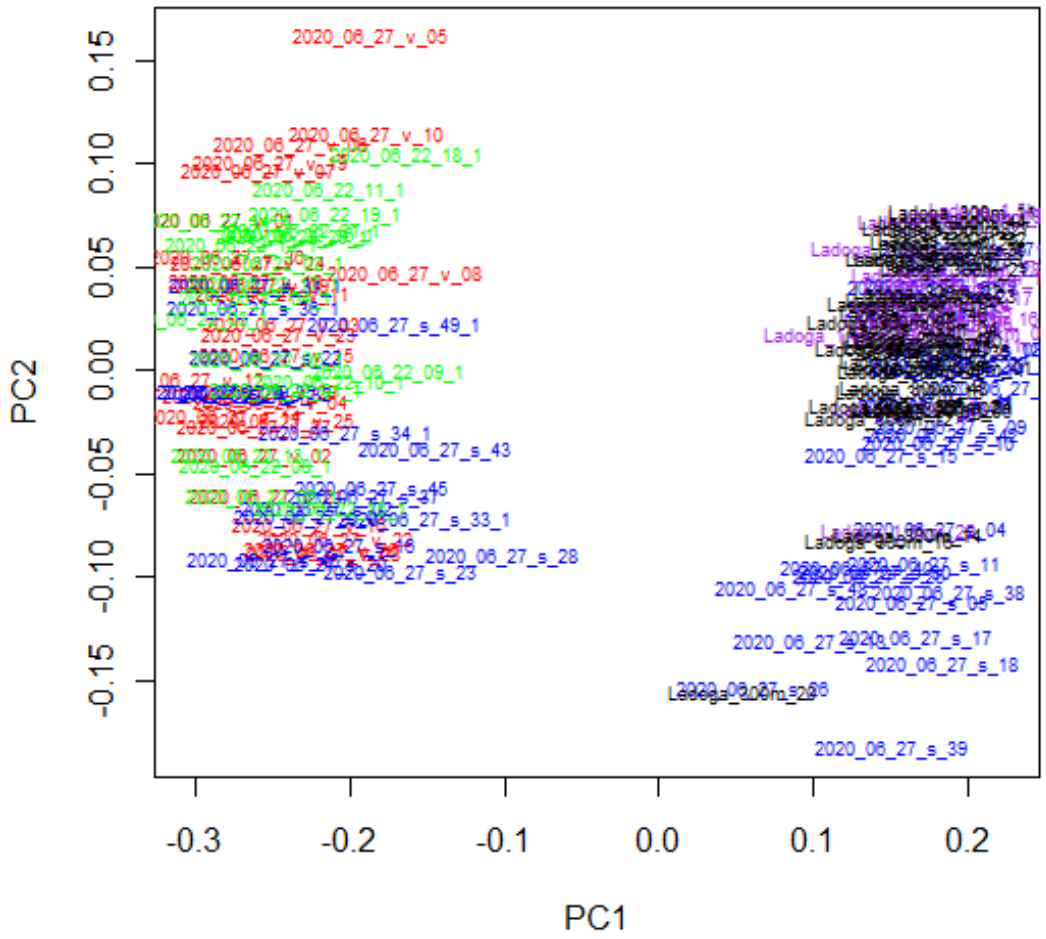
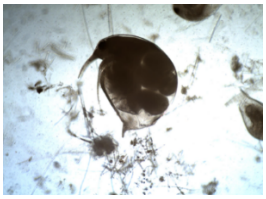
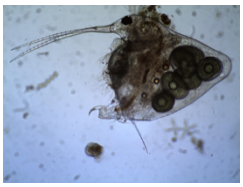
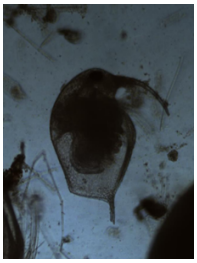
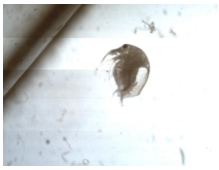
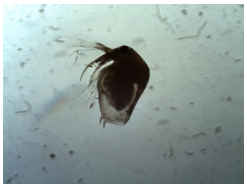
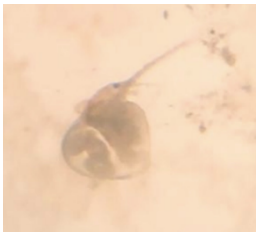


Рисунок 10. Распределение относительных деформаций формы тела босмин. Каждая босмина обозначена «кодом», в котором через нижнее подчеркивание перечислены дата и место сбора пробы и порядковый номер фотографии. Цветами обозначены: фиолетовым - босмины, собранные на расстоянии 1500 м от берега в Ладоге, чёрным - - босмины, собранные на расстоянии 300 м от берега в Ладоге, синим – босмины, собранные в Лахтинском заливе у Свири, красным – босмины, собранные в устье ручья Ваемский, зеленым – босмины, собранные у стационара в Лахте.

Как видно из распределения, расщепление на группы, присутствующее в Лахте, сохраняется и здесь. Все ладожские босмины попали во вторую группу.

Ниже приведена таблица с нашими подсчетами и классификацией босмин по морфотипам (табл. 2).

Морфотип и его фото	Дата(ы)	Место(а)	Количество и % от общего числа босмин в пробе
longispina(половозрелые) 	26.06.2020	Ладога, 300 м	600(12,8%)
		Ладога, 1500 м	139(47,4%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, у Свири	46(19,2%)
gibbera (половозрелые) 	27.06.2020	Лахтинский залив, у стационара	37(11,3%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, устье ручья Ваемский	60(42,9%)
		Лахтинский залив, у Свири	5(2,1%)
gibbera, считавшиеся неполовозрелыми	27.06.2020	Лахтинский залив, у стационара	77(23,5%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, устье ручья Ваемский	36(25,7%)
		Лахтинский залив, у Свири	32(13,4%)
coregoni (неполовозрелые)	26.06.2020	Ладога, 1500 м	2(0,7%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, у стационара	208(63,4%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, устье ручья Ваемский	43(30,7%)

		Лахтинский залив, у Свири	103(43,1%)
reflexa, считавшиеся неполовозрелыми 	26.06.2020	Ладога, 300 м	4000(85,6%)
		Ладога, 1500 м	96(32,8%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, у стационара	2(0,6%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, устье ручья Ваемский	1(0,7%)
		Лахтинский залив, у Свири	47(19,7%)
reflexa, считавшиеся половозрелыми 	26.06.2020	Ладога, 300 м	32(0,7%)
		Ладога, 1500 м	13(4,4%)
reflexa без мукро, неполовозрелые	26.06.2020	Ладога, 300 м	32(0,7%)
		Ладога, 1500 м	30(10,2%)
Странная reflexa, считались неполовозрелыми 	26.06.2020	Ладога, 300 м	8(0,2%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, у стационара	2(0,6%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, у Свири	6(2,5%)
kessleri (половозрелые) 	26.06.2020	Ладога, 1500 м	4(1,4%)

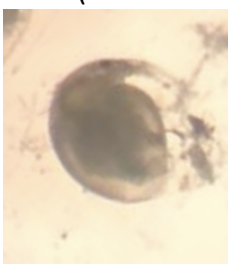
crassicornis (неполовозрелые) 	26.06.2020	Ладога, 1500 м	7(2,4%)
	27.06.2020	Лахтинский залив, у стационара	2(0,6%)
Crassicornis (половозрелые) Фото отсутствует	26.06.2020	Ладога, 1500 м	2(0,7%)

Таблица 2. Подсчеты и деление босмин на морфотипы.

Численность определенных морфотипов босмин. Оценка численности хищников, питающихся босминами.

Нами было посчитано 5 проб: 27.06.2020 (Лахтинский залив, у стационара), 27.06.2020 (Лахтинский залив, устье ручья Ваемский), 27.06.2020 (Лахтинский залив, у Свири), 26.06.2020 (Ладожское о., 300 м от берега) и 26.06.2020 (Ладожское о., 1500 м от берега) (см. таблицу 3). Из данных таблицы видно, что в местах обитания *Asplanchna* преобладают морфотипы с мукро, а в местах обитания *Leptodora* – без мукро. Но статистических подтверждений этому мы не выявили.

Дата	Место	Половозрелые		Неполовозрелые		Всего	*Leptodora*	*Asplanchna*	*Polyphemus*
		С мукро	Без мукро	С мукро	Без мукро				
26.06.2020	Ладога, 300м.	632	0	4008	32	4672	0	48	8
26.06.2020	Ладога, 1500м.	152	6	96	39	293	0	65	0
27.06.2020	Лахта, у стационара	2	37	2	287	328	6	0	0
27.06.2020	Лахта, устье ручья Ваемский	0	60	1	79	140	10	0	0
27.06.2020	Лахта, у Свири	52	5	47	135	239	1	5	1

Таблица 3. Подсчеты численности босмин и хищников.

Обсуждение результатов

Посмотрев на таблицу 1, можно утверждать, что наиболее многочисленными морфотипами, встречающимися в пробах, взятых у юго-восточного берега Ладоги (300 м и 1500 м от берега), были *longispina* (половозрелые) и *reflexa* (неполовозрелые). Для проб у стационара и у Ваемского ручья в Лахтинском заливе характерны морфотипы *gibbera (*половозрелые и неполовозрелые) и *coregoni* (неполовозрелые), остальных ничтожно мало по сравнению с ними. Для пробы в Лахтинском заливе недалеко от р. Свирь

характерны морфотипы *gibbera* (неполовозрелые), *coregoni* (неполовозрелые), *longispina* (половозрелые) и *reflexa* (неполовозрелые).

На графике относительных деформаций (рис. 1) мы видели, что босмин можно разделить на 2 группы по форме карапакса. К первой группе, имеющей длинные антеннулы, угловатую форму тела, и у которой мукро отсутствовало, относятся морфотипы gibbera и coregoni, характерные для Лахтинского залива и в некотором количестве встречающиеся в пробе, взятой в устье Лахтинского залива у Свири. Ко второй группе, для которой характерны короткие антеннулы, округлая форма карапакса и присутствие мукро, относятся морфотипы longispina и reflexa, наиболее многочисленные в пробах из Ладожского озера и в относительно большом количестве присутствовавшие в пробе у Свири.

Морфотип longispina характерен для олиготрофных водоёмов, а gibbera - для более эвтрофных (Faustova et al., 2010). Ладожское озеро считается олиготрофным (Садчиков, Кудряшов, 2004). Возможно, Лахтинский залив более эвтрофен, чем Ладожское озеро, на что указывает большое количество прибрежной растительности, в частности, рдеста и тростника. Хотя понять, за счет чего трофность водоёма влияет на морфотипы Eubosmina, обитающие в нем, на основании наших данных мы не можем.

Возможно, такое разграничение морфотипов связано с хищниками. Из литературы известно, что удлинённые антеннулы лучше «помогают не быть съеденными» при высокой концентрации беспозвоночных хищников, в то время как варианты с более округлой формой тела и короткими антеннулами становятся выгоднее, когда начинают преобладать планктоноядные рыбы (Adamczuk, 2015). Возможно, в Лахтинском заливе доля беспозвоночных хищников по сравнению с долей рыб, питающихся босминами, выше, чем в Ладожском озере.

Также известно, что на удлинение выростов карапакса босмин влияют кайромоны лептодор (Sakamoto et al., 2006). Наши данные этому соответствуют. Посмотрев на таблицу 3, можно сказать, что Leptodora встречались только в Лахтинском заливе, где как раз преобладают морфотипы с более длинными антеннулами и горбами. В Ладоге, где преобладали морфотипы с округлыми формами, в основном встречались другие хищники (Asplanchna).

Из литературы известно, что планктоноядные рыбы могут поедать лептодор (Herzig, 1995), причем отдают предпочтение более крупным особям (больше 6 мм). При этом было показано, что в некоторых озерах между количеством планктоноядных рыб и лептодор существует отрицательная корреляция (Vijverberg, 2005). Поэтому большое количество Лптодор в Лахтинском заливе может косвенно свидетельствовать о том, что там мало планктоноядных рыб..

Но мы не можем твердо утверждать, что в случае с Лахтинским заливом и Ладожским озером на такое разграничение морфотипов влияют именно беспозвоночные хищники. Данных для этого пока слишком мало.

Судя по работам прошлых лет (Рябова, 2020; Киселёва и др., 2019), в Ладожском озере даже в разные дни одного года может быть совершенно разное количество и видовой состав беспозвоночных хищников в одном и том же месте. Иногда в один день наблюдалось большое количество лептодор, а через три дня в том же месте их не было совсем. Возможно, из-за таких частых перемен приспосабливаться к лептодорам (да и вообще к конкретному беспозвоночному хищнику) для ладожских босмин нет смысла, и они имеют короткие антеннулы и мукро, чтобы быть менее заметными для рыб, которых в Ладоге больше, чем в Лахте. Вероятно, в одном и том же месте численность планктоноядных рыб тоже может меняться. Но рыб мы не ловили и не можем ничего сказать по этому поводу.

Выводы

1) В пробах у юго-восточного берега Ладожского озера в конце июня 2020 года наиболее часто встречались морфотипы, похожие на *B. longispina, B. reflexa.*
   В дальнем от р. Свирь конце и в середине Лахтинского залива преобладали морфотипы, похожие на *B. coregoni, B. gibbera.*
   В Лахтинском заливе недалеко от р. Свирь встречались все эти морфотипы.

2) В Ладожском озере в тот день, когда мы брали пробу, на расстоянии 300 м от берега отношение количества босмин с мукро к количеству босмин без мукро было намного больше, чем на расстоянии 1500 м от берега, но причин этого мы понять не можем.

3) Возможно, существует связь между формой тела босмин и наличием определенных хищников: *B. longispina, B. reflexa* нам встретились там, где есть *Asplanchna* и нет *Leptodora,* морфотипы *B. coregoni, B. gibbera* нам встретились там, где есть *Leptodora* и нет *Asplanchna*.

Литература

Глаголев С.М., Чертопруд М.В., 1999. Летние школьные практики по пресноводной гидробиологии. Методическое пособие. М.: Добросвет, МНЦМО. 288 с.

Киселёва А.И., Кульпина А.А., Кычков У.Г., Пахомов Е.А., Фейгин С.Е., 2019. Изменчивость формы и размера тела *Bosmina* (*Eubosmina*) у юго-восточного берега Ладожского озера [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bioclass.ru/files/konf19/bosmina.pdf Дата обновления: 12.01.2021.

Ковалёва А.Ю., Смирнова А.В., 2018. Изменчивость формы и размера тела *Bosmina* (*Eubosmina*) Selegro 1900 (Bosminidae, Cladocera) у юго-восточного берега Ладожского озера [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bioclass.ru/files/konf18/bosmina.pdf
Дата обновления: 12.01.2021.

Котов А.А., 2013. Морфология и филогения Anomopoda (Crustacea: Cladocera). М.: КМК. 638 с.

Павлинов И.Я., Микешина Н.Г., 2002. Принципы и методы геометрической морфометрии // Журнал общей биологии. Т. 63. № 6. С. 473-493.

Рябова Е., 2020. Изменчивость формы тела *Bosmina* (*Eubosmina*) у юго-восточного берега Ладожского озера [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bioclass.ru/files/konf20/bosmina.pdf
Дата обновления: 12.01.2021.

Садчиков А.П., Кудряшов М.А., 2004. Экология прибрежно-водной растительности (учебное пособие для студентов вузов). М.: Изд-во НИА-Природа, РЭФИА. 220 с.

Adamczuk M., 2015. Past, present, and future roles of small cladoceran *Bosmina longirostis* (O. F. Müller, 1785) in aquatic ecosystems // Hydrobiologia. V. 767. P. 1-11.

Faustova M., Sacherova V., Sheets H. D., Svensson J-E, Taylor D. J., 2010. Coexisting Cyclic Parthenogens Comprise a Halocene Species Flock in *Eubosmina* // Plos one. V. 5. № 7. e11623.

Faustova M., Sacherova V., Sheets H.D., Svensson J-E, Taylor D.J., 2011. Radiation of European *Eubosmina* (Cladocera) from *Bosmina* (*E.*) *longispina* – concordance of multipopulation molecular data with paleolimnology // Limnology and Oceanography. V. 56. № 2. P. 440-450.

Herzig A., 1995. *Leptodora kindti:* efficient predator and preferred prey item in Neusiedler See, Austria // Hydrobiologia. V. 307. P. 273-282.

Korosi J. B., Kurek J., Smol J. P., 2013. A review on utilizing *Bosmina* size structure archived in lake sediments to infer historic shifts in predation regimes // Journal of Plankton Research. V. 35. № 2. P. 444-460.

Sakamoto M., Chang K-H., Hanazato T., 2006. Inhibition of development of anti-predator morphology in the small cladoceran *Bosmina* by an insecticide: impact of an anthropogenic chemical on prey-predator interactions // Freshwater Biology. V. 51. № 10. P. 1974-1983.

Rogers D.C., Thorp J.H., 2019. Keys to Palaearctic Fauna // Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates. V. 4. Academic Press, Elsevier. P. 643-724.

Toth L.G., Kato K., 1997. Size-selective grazing of bacteria by *Bosmina longirostris* – an image-analysis study // Journal of Plankton Research. V. 19. № 10. P. 1477-1493.

Vijverberg J., Koelewijn H.P., Van Densel W.L.T., 2005. Effects of predation and food on the population dynamics of the raptorial cladoceran *Leptodora kindtii* // Limnology and Oceanography. V. 50. № 2. P. 455-464.