

*Е. А. Масюткина*

**ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ оз. ВИШТЫНЕЦКОГО  
С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ  
ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ**

*Представлены результаты оценки экологического состояния оз. Виштынецкого с помощью наиболее широко применяемых в мировой практике гидробиологических индексов, основанных на структурных показателях зообентоса. К ним относятся индекс видового разнообразия Шеннона, индекс сапробности по Пантле и Букку, хирономидный индекс Балушкиной, олигохетный индекс Гуднайта – Уитлея, интегральный показатель Балушкиной, комбинированный индекс состояния сообщества по Баканову. Кроме того, построены карты пространственного распределения значений каждого рассматриваемого показателя.*



*This paper presents the results of an assessment of the ecological state of Lake Vištytis using the most widely applied hydrobiological indices based on structural indicators of benthos. They include the Shannon index of species diversity, Pantle-Buck saprobity index, Balushkina chironomid index, Good-night – Whitley oligochaeta index, Balushkina integral index, and Bakanov combined index. Spatial distribution maps were drawn for each indicator.*

**Ключевые слова:** озеро Виштынецкое, качество воды, зообентос.

**Key words:** Lake Vištytis, water quality, zoobenthos.

## Введение

67

Озеро Виштынецкое отличается от других озер области своими значительными размерами, большими перепадами глубин (мелководная часть занимает всего 24 % площади водоема). Кроме того, для оз. Виштынецкого характерно многообразие биотопов и донной фауны. В настоящее время стало актуальным сохранение природного статуса озера в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой. Поэтому важен выбор методик, наиболее адекватно отражающих качество воды.

Экологическое состояние водных объектов оценивается множеством биологических методов, среди которых важная роль отводится гидробиологическому анализу с использованием зообентоса. Выбор и использование того или иного метода, в сущности, зависит от состава фауны, населяющей изучаемый водоем.

Целью настоящей работы было определение экологического состояния оз. Виштынецкого с помощью различных индексов, основанных на структурных показателях зообентоса.

## Материал и методы

Материалом послужили 125 проб зообентоса, собранных на оз. Виштынецком с мая по ноябрь в 2006–2010 и 2012 гг. Сетка станций охватывала всю российскую акваторию водоема и располагалась с учетом изменения глубин и степени variability условий обитания донных беспозвоночных (рис. 1). Отбор проб осуществлялся преимущественно коробчатым дночерпателем системы Петерсена с площадью захвата грунта 0,025 м<sup>2</sup>, на мелководных станциях – иногда скребком с длиной режущей стороны 0,24 м и фиксированной длиной траления. Грунт промывался через капроновое сито №23. Организмы фиксировали 4%-ным раствором формалина. Идентификацию зообентоса проводили по специализированным определителям [2; 6; 7; 10; 12–14; 18; 19].

За многолетний период исследований накоплен обширный материал, позволяющий рассчитать различные индексы, характеризующие качество воды, а также провести их сравнение и выбрать те из них, которые наиболее адекватно отражают состояние оз. Виштынецкого.

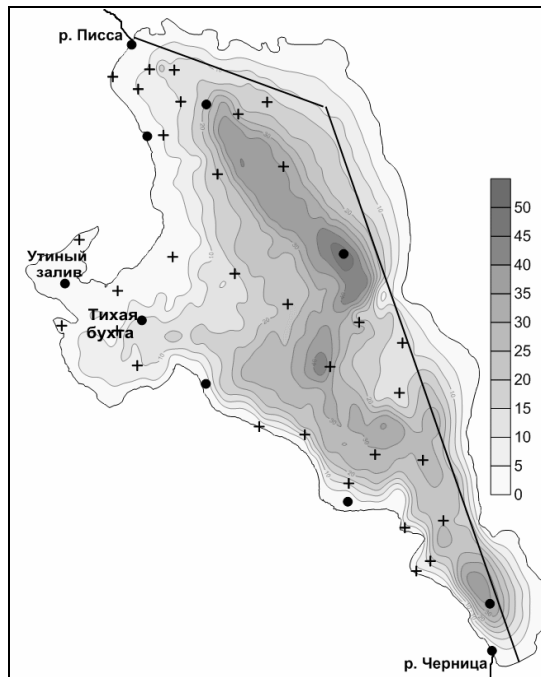


Рис. 1. Схема мест отбора гидробиологических проб на оз. Вишгынецком (• – места регулярных наблюдений, + – места периодических наблюдений)

Численность ( $N$ ) и биомассу ( $B$ ) макрозообентоса для озера в целом определяли по средним значениям численности и биомассы для литорали, сублиторали и профундали с учетом относительных площадей, приходящихся на эти зоны [11]:

$$N = \frac{N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2 + N_3 \cdot S_3}{S}; \quad (1)$$

$$B = \frac{B_1 \cdot S_1 + B_2 \cdot S_2 + B_3 \cdot S_3}{S}, \quad (2)$$

где  $N_1, N_2, N_3$  – численность;  $B_1, B_2, B_3$  – биомасса,  $S_1, S_2, S_3$  – площади, приходящиеся на литораль, сублитораль, профундаль;  $S$  – общая площадь дна озера.

Индекс доминирования был рассчитан по формуле Палия – Ковнацки [20]. Он учитывает не только численность или биомассу вида, но и его встречаемость. Это позволяет не завышать роль вида, единично встретившегося, но имеющего большую численность или массу.

Видовое разнообразие зообентоса, его численность и биомасса, а также изменения этих параметров играют важную роль для оценки экологического состояния водоема. Среди применяемых методов оценки, в основе которых лежат количественные характеристики бентоса, можно отметить АВС-метод. Он заключается в построении графиков ранговых распределений видов по численности и биомассе. В некоторых случаях этот метод оказывался весьма эффективным, но все-таки его рекомендуют использовать в комплексе с другими индексами [4; 5; 20; 21].



В настоящей работе также были рассчитаны и проанализированы наиболее популярные и широко применяемые в биомониторинге гидробиологические индексы [1; 4; 8; 9; 15–17; 20–22]: индекс видового разнообразия Шеннона, индекс сапробности по Пантле и Букку (в модификации Сладачека), хирономидный индекс Е.В. Балужкиной, олигохетный индекс Гуднайта – Уитлея, интегральный показатель Е.В. Балужкиной, комбинированный индекс состояния сообщества по А.И. Баканову (КИСС). Индексы были сопоставлены с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Затем, с помощью программы *Surfer 10*, были построены карты пространственного распределения значений каждого рассматриваемого показателя.

### Результаты и обсуждения

За период исследований с 2006 по 2012 г. в оз. Виштынецком было обнаружено 206 видов и форм зообентоса, принадлежащих 9 группам (рис. 2). Наибольшим разнообразием отличались хирономиды, моллюски, ручейники и олигохеты. В состав хирономид входило 65 видов, что более чем в два раза превышало видовое разнообразие в других группах. Максимальное число видов найдено в прибрежной зоне (188 видов). С увеличением глубины их число существенно падает, и в центральной глубоководной части озера зообентос представлен в основном некоторыми видами хирономид и олигохет.

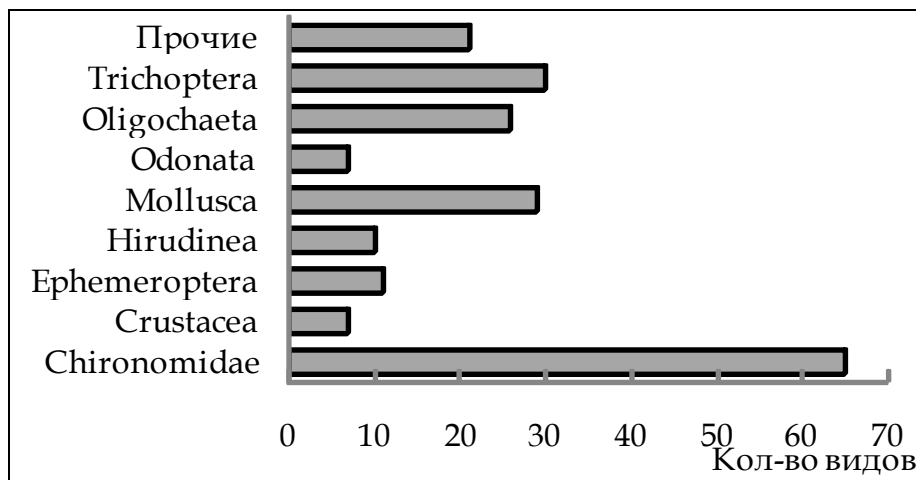


Рис. 2. Видовой состав зообентоса оз. Виштынецкого

Средняя численность зообентоса в течение года достаточно постоянна и изменялась от 1250 до 1500 экз./м<sup>2</sup>. Численность сформирована в основном четырьмя группами: хирономидами, моллюсками, олигохетами и ракообразными. В литорали и сублиторали доминирующих видов не найдено, к субдоминантам можно отнести моллюска *Dreissena*

*polymorpha* (Pall.) и рачка *Asellus aquaticus* (L.). В профундали доминировали личинка хирономид *Sergentia longiventris* (Kief.) и олигохета *Potamothrix hammoniensis* (Mich.). Эти же виды преобладают и по биомассе, основную долю которой формировали моллюски (преимущественно *D. polymorpha*), составляющие около 90 % массы зообентоса. Средняя масса мягкого бентоса в сезонном аспекте изменялась в небольших пределах — от 3,5 до 4,4 г/м<sup>2</sup>. Ведущая роль в биомассе мягкого бентоса принадлежала ракообразным, хирономидам, олигохетам и пиявкам.

Применение АВС-метода показало, что для озера характерны два типа кривых рангового распределения численности и биомассы. На участках с глубинами менее 15 м наблюдался первый тип, где кривая численности проходит ниже кривой биомассы (рис. 3, а). Такой график свидетельствует о слабом загрязнении этих участков. На глубинах более 15 м имел место второй тип (рис. 3, б), где кривые численности биомассы практически совпадают. Это загрязненная зона.

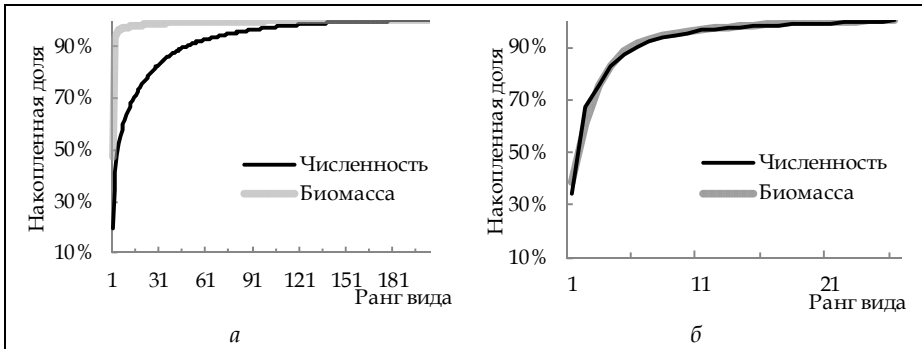


Рис. 3. Графики ранговых распределений видов

Индекс разнообразия Шеннона широко применяется гидробиологами для характеристики структуры донного сообщества. Более сложная организованная структура, а соответственно и более высокие значения индекса, наблюдаются в основном в слабозагрязненных водах. Недостаток данного метода: индекс принимает одинаково низкие значения как при очень сильном загрязнении, так и при его отсутствии [20].

Индекс разнообразия Шеннона, рассчитанный для оз. Виштынецкого, изменяется в широких пределах (от 0,5 до 3,2 бит./экз). Наиболее разнообразна и высокоорганизована фауна донных беспозвоночных литорали, что подтверждается высокими значениями индекса Шеннона (рис 4, а). Зообентос профундали менее разнообразен; кроме того, в его структуре выделяется резкое доминирование двух видов: хирономиды *S. longiventris*, олигохеты *P. hammoniensis*. В этой зоне наблюдаются низкие значения индекса. Таким образом, прибрежная часть озера менее загрязнена, чем центральная.



Качество воды оценивается также с помощью индексов, использующих соотношение крупных таксонов, например хирономидного индекса Е. В. Балушкиной и олигохетного индекса Гуднайта – Уитлея. Хирономидный индекс Е. В. Балушкиной основан на соотношении численностей хирономид из разных подсемейств. В некоторых небольших водных объектах, где разнообразие хирономид невелико, может наблюдаться массовый вылет имаго и резкое снижение численности хирономид. В подобных водных объектах для определения качества воды наряду с хирономидным индексом стоит использовать и другие. Однако в оз. Виштынецком хирономиды являются наиболее распространенной и разнообразной группой зообентоса по сравнению с другими донными организмами. Они имеют достаточно высокие показатели численности и биомассы. Также в озере никогда не наблюдается одновременного вылета всех видов хирономид. Кроме того, личинки комаров-звонцов в профундали зачастую единственные обитатели дна, что повышает их индикаторную значимость в этой части озера. Все это делает допустимым применение хирономидного индекса Балушкиной для оценки качества воды в оз. Виштынецком.

71

Хирономидный индекс не отличается постоянством, его значения изменяются от 1,4 до 9,14. На карте пространственного распределения индекса (рис. 4, б) наименьшие его значения отмечены в прибрежной части озера на юго-западе и в истоке р. Писсы, что характеризует воду этих участков как переходную от чистой к умеренно загрязненной. Наибольшие показатели индекса зарегистрированы в Утином заливе и на выходе из Тихой бухты, а также в центральной глубоководной части озера. Эти районы имеют более загрязненную воду.

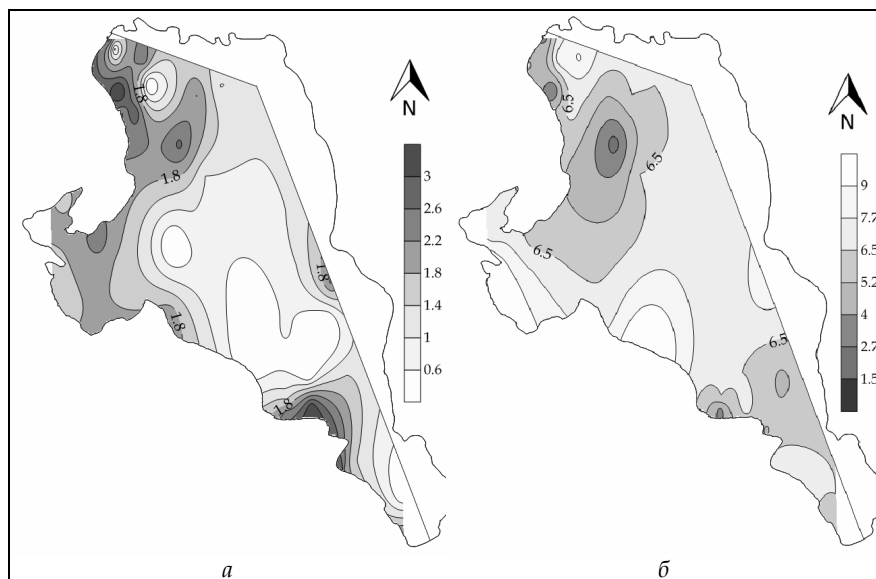


Рис. 4. Пространственное изменение значений индекса Шеннона (а) и хирономидного индекса Балушкиной (б) для оз. Виштынецкого

Олигохетный индекс Гуднайта – Уитлея основан на отношении численности олигохет к общей численности зообентоса. При использовании этого олигохетного индекса стоит учитывать, что не все виды малощетинковых червей могут рассматриваться как показатели чрезвычайного загрязнения. При сильном загрязнении происходит массовое развитие таких видов, как *Tubifex tubifex* (Mull.) и *Limnodrilus hoffmeisteri* (Clap.). В оз. Виштынецком эти виды малочисленны и редко встречаются, а преобладающим видом является *P. hammoniensis*.

В структуре зообентоса озера олигохеты играют важную роль на больших глубинах (более 15 м), здесь на их долю приходится около 47 % дна озера. Доля олигохет в бентосе в течение рассматриваемого периода в основном не превышала 30 %, что характеризует озеро как слабозагрязненное (рис. 5, а). На выходе из Тихой бухты и в Южной котловине численность олигохет возрастала до 80 %, что свидетельствует об ухудшении качества воды и описывает эти участки как загрязненные. Количество олигохет существенно изменяется в сезонном аспекте, и это отражается на величине индекса. В весенний и осенний периоды доля этой группы в численности зообентоса составляла менее 15 %, и только в южной котловине озера они формировали около 60 %. В летний период численность олигохет, в основном в центральной части озера, немного увеличивалась. Подобное изменение олигохетного индекса указывает на сезонное изменение качества воды. В весенний и осенний периоды содержание органических веществ в озере ниже, чем в летний.

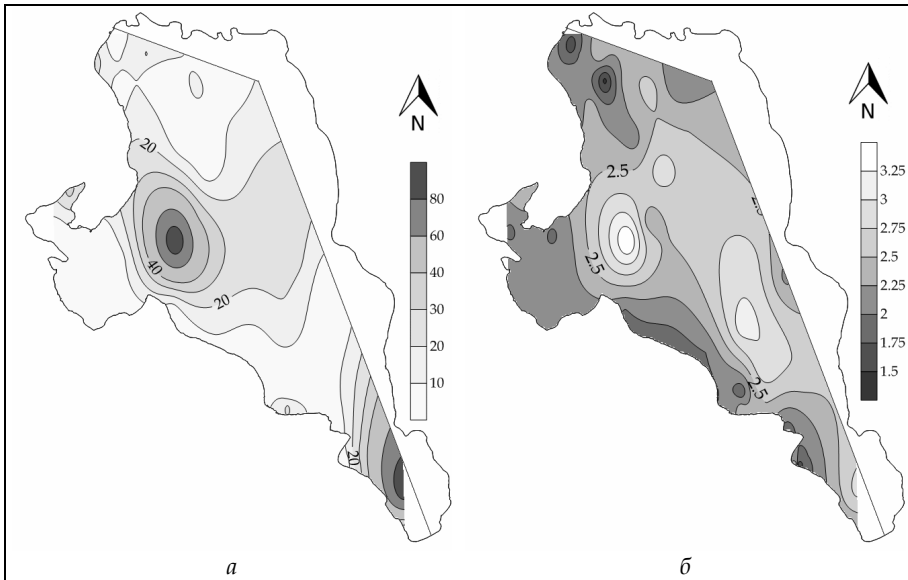


Рис. 5. Пространственное распределение значений олигохетного индекса (а) и индекса сапробности (б) в оз. Виштынецком



При определении качества воды различных водных объектов самым распространенным является индекс сапробности. При расчете этого индекса необходимы сведения об индивидуальной сапробной валентности каждого вида, и чем больше видов с известной сапробной валентностью, тем точнее результаты данного метода. Сапробная валентность известна для 75 % видов, найденных в оз. Виштынецком. Они часто встречаются, а также преобладают по численности и биомассе, что делает возможным применение данного индекса для оз. Виштынецкого, а также свидетельствует о надежности этого метода. Большинство видов с известной сапробной валентностью относится к  $\beta$ -мезосапробам (103 вида); 20 видов, большую часть которых составляют ручейники, относятся к  $\alpha$ - $\beta$ -мезосапробам, 18 видов —  $\alpha$ -мезосапробы, полисапробы представлены 3 видами олигохет. Величина индекса сапробности для озера изменялась в пределах 1,4–3,4. Вода большей части озера соответствует  $\beta$ -мезосапробному качеству. На карте пространственного распределения значений индекса сапробности (рис. 5, б) видно, что наибольшие значения этого показателя отмечены на выходе из Тихой бухты и в глубоководной центральной части озера. Качество воды в придонных слоях этих районов можно охарактеризовать как загрязненное,  $\alpha$ -мезосапробное. На юго-западном прибрежном участке и в истоке р. Писсы индекс сапробности был около 1,5, следовательно, они загрязнены слабее и имеют воду  $\alpha$ - $\beta$ -мезосапробного качества. Сезонные изменения, происходящие в составе и структуре зообентоса, отражаются на значениях индекса. Весной и осенью его значения ниже, чем летом, и даже для центральной части озера редко превышают 2,5. Таким образом, весной и осенью вода в озере чище, чем летом.

В последнее время все больше внимания стало уделяться комплексным гидробиологическим индексам, таким как интегральный показатель Е. В. Балужкиной и комбинированный индекс состояния сообществ по А. И. Баканову (КИСС).

Интегральный показатель учитывает структуру сообщества в целом и такие характеристики, как наличие видов-индикаторов, соотношение индикаторных групп на уровне таксонов более высокого ранга, степень доминирования отдельных групп и видов [20]. Комбинированный индекс основывается в первую очередь на изменении структурных характеристик бентоса: биомассы, численности, видовом разнообразии.

Интегральный и комбинированный индексы, несмотря на различия в компонентах, показали похожие результаты (рис. 6) и подтвердили в итоге вышеописанные индексы. Так, по значениям обоих индексов воду в прибрежных участках озера можно отнести к слабозагрязненной, а в центральной части — к умеренно загрязненной. Участки у истока р. Писсы и юго-западного побережья выделяются как наиболее чистые, в этих районах значения комплексных индексов минимальные (интегральный показатель менее 117, КИСС менее 25).



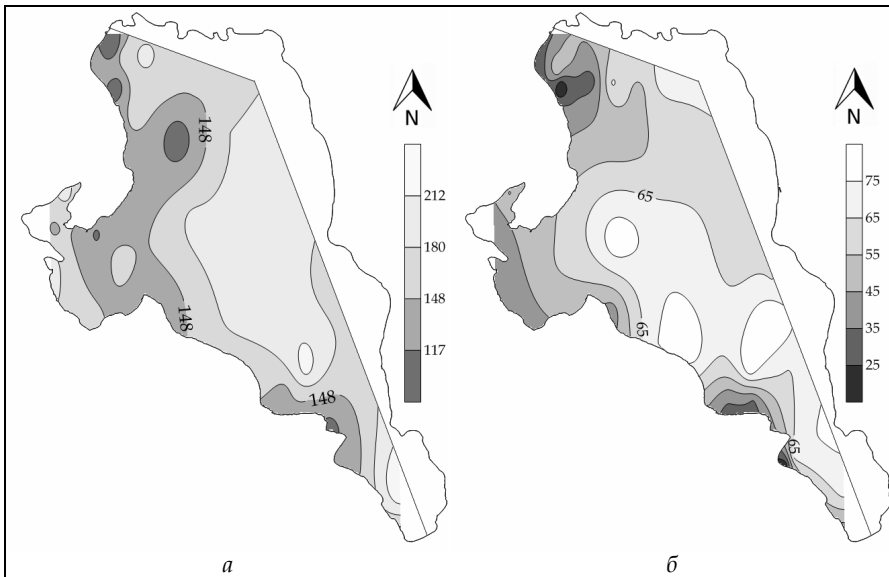


Рис. 6. Пространственное изменение значений комплексных гидробиологических индексов: а – интегральный индекс Балужкиной; б – КИСС

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена указывает на тесную связь между различными гидробиологическими индексами (см. табл.). Например, между индексом Шеннона и хирономидным индексом отмечена достоверная отрицательная связь. Положительная связь наблюдается между хирономидным индексом и индексом сапробности, между сапробиологическим и олигохетным индексами, а также между комплексными индексами. Тесная достоверная связь между индексами подтверждает полученные результаты о качестве воды озера, и оценка качества воды в Виштынецком может быть проведена по любому из них, что характерно далеко не для каждого водоема.

**Значения коэффициентов корреляции  
между гидробиологическими индексами в оз. Виштынецком**

Индекс	Н	Kch	S	О	IP	КИСС
Н	1,00	–	–	–	–	–
Kch	<b>-0,28</b>	1,00	–	–	–	–
S	-0,13	<b>0,27</b>	1,00	–	–	–
О	0,09	-0,04	<b>0,49</b>	1,00	–	–
IP	<b>-0,53</b>	<b>0,64</b>	<b>0,70</b>	<b>0,39</b>	1,00	–
КИСС	<b>-0,67</b>	0,16	0,21	0,00	<b>0,45</b>	1,00

*Примечание:* Н – индекс Шеннона, Kch – хирономидный индекс Е.В. Балужкиной, S – сапробность, О – олигохетный индекс Гуднайта – Уитлея, IP – интегральный индекс Е.В. Балужкиной, КИСС – комбинированный индекс состояния сообщества по А.И. Баканову.



Применение вышеперечисленных индексов для оценки экологического состояния озера показало сходные результаты. Качество воды в Виштынецком неодинаково для различных его участков. Наиболее чистые из них находились в истоке р. Писсы и на юго-западном побережье. Хуже качество воды в центральных глубоководных впадинах, Тихой бухте и Утином заливе. С помощью зообентоса можно получить оценку состояния придонных водных слоев. Чтобы охарактеризовать качество всей толщи воды, особенно центральной части озера, необходимо учитывать результаты оценок, полученных с помощью других видов гидробионтов, в частности зоопланктона, фитопланктона, ихтиофауны, а также гидрохимические показатели.

### Выводы

1. Большое разнообразие зообентоса, незначительные сезонные изменения его средней численности и биомассы свидетельствуют о благополучном состоянии оз. Виштынецкого.

2. Все рассчитанные гидробиологические индексы оценивают качество воды в озере в целом как умеренно загрязненное, что соответствует  $\beta$ -мезосапробному типу.

3. По сапробиологическим показателям вода в озере загрязнена неравномерно. Наиболее чистые участки характерны для литорали и сублиторали (особенно выделяются прибрежные участки на юго-западе и на северо-западе). К более загрязненным участкам можно отнести центральную глубоководную часть, Утиный залив и Тихую бухту.

4. Олигохетный индекс и индекс сапробности оказались более чувствительными к сезонному изменению качества воды: в весенний и осенний периоды вода чище, чем в летний.

5. Богатство донной фауны оз. Виштынецкого делает возможным применение каждого из рассмотренных гидробиологических индексов для оценки его экологического состояния, что характерно не для всех водоемов.

6. Наиболее оптимальным индексом, на наш взгляд, можно считать интегральный показатель Е. В. Балужкиной, оценивающий качество воды по комплексу гидробиологических показателей.

### Список литературы

1. Балужкина Е. В. Оценка качества вод и состояния водоемов и водотоков Северо-Запада России по характеристикам сообществ донных животных // Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов : материалы объединенного пленума Научного совета ОБН РАН по гидробиологии и ихтиологии, Гидробиологического общества при РАН и Межведомственной ихтиологической комиссии М., 2011. С. 69–101.

2. Жадин В. И. Жизнь пресных вод СССР. М. ; Л., 1940. Т. 1.

3. Жадин В. И. Моллюски пресных вод СССР. М. ; Л., 1952.



4. *Количественные методы экологии и гидробиологии* : сборник научных трудов, посвященный памяти А.И. Баканова / отв. ред. чл.-кор. РАН Г.С. Розенберг. Тольятти, 2005.
5. *Круна Е.Г.* Структура доминирования видов в зоопланктонных сообществах как индикатор экологического состояния водоемов // *Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем* – 2. СПб., 2011. С. 175–180.
6. *Липин А.Н.* Пресные воды и их жизнь. М., 1950.
7. *Лукин Е.И.* Пиявки пресных и солоноватых водоемов // *Фауна СССР*. М. ; Л., 1964. Т. 1.
8. *Макрушин А.В.* Биологический анализ качества вод. Л., 1974.
9. *Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах* // *Зообентос и его продукция*. Л., 1982.
10. *Определитель пресноводных беспозвоночных европейской части СССР*. Л., 1977.
11. *Павловский С.А.* Структура и динамика макрозообентоса Сямозера : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2007.
12. *Панкратова В.Я.* Личинки и куколки комаров подсемейства Chironominae фауны СССР // *Diptera, Chironomidae = Tendipedidae*. Л., 1983.
13. *Панкратова В.Я.* Личинки и куколки комаров подсемейства Orthocladinae фауны СССР // *Diptera, Chironomidae=Tendipedidae*. Л., 1970.
14. *Панкратова В.Я.* Личинки и куколки комаров подсемейства Podonominae и Tanypodinae фауны СССР // *Diptera, Chironomidae=Tendipedidae*. Л., 1977.
15. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Л., 1983.
16. *Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем* / под ред. В. А. Абакумова. СПб., 1993.
17. *Унифицированные методы исследования качества вод* // *Методы биологического анализа вод*. Ч. 3. М., 1976.
18. *Чекановская О.В.* Водные малощетинковые черви фауны СССР. Л., 1962.
19. *Черновский А.А.* Определитель личинок комаров семейства Tendipedidae. М. ; Л., 1949.
20. *Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти, 2003.
21. *Шуйский В.Ф., Петрова Т.А., Максимова Т.В.* Биоиндикация качества водной среды, состояния пресноводных экосистем и их антропогенных изменений // *Сборник научных докладов VII междунар. конф. «Экология и развитие Северо-Запада России»*, Санкт-Петербург, 2–7 авг. 2002 г. СПб., 2002. С. 441–451.
22. *Щербина Г.Х.* Таксономический состав и сапробиологическая значимость донных макробеспозвоночных различных пресноводных экосистем Северо-Запада России. Экология и морфология беспозвоночных континентальных водоемов вод // *Сборник научных работ, посвященный 100-летию со дня рождения Федора Дмитриевича Мордухай-Болтовского* / Ин-т биологии внутренних вод РАН им. Папанина. Махачкала, 2010. С. 426–466.

#### Об авторе

Елена Андреевна Масюткина – асп., Калининградский государственный технический университет.  
E-mail: masyutkinaea@gmail.com

#### About the author

Elena Masyutkina, PhD student, Kaliningrad State Technical University.  
E-mail: masyutkinaea@gmail.com