

УДК 574.52

*Ю.К. ВЕРЕС, А.П. ОСТАПЕНЯ***СОДЕРЖАНИЕ ЛАБИЛЬНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
В ВОДЕ ОЗЕР НАРОЧАНСКОГО РЕГИОНА**

The article is concerned to the establishment of relationships between the contain of labile organic matter in water and the ecosystem trophic status. The investigations were conducted on lakes Naroch, Myastro, Batorino and Bolshiye Shvakshty, which differ in their trophic level. Two independent methodological approaches were used for the data estimation and they have shown rather similar results. It was estimated that labile organic matter makes up a little part of organic matter in investigated waterbodies but its contain is increased with higher level of waterbody trophy while the lability of the matter is decreased. The comparison of the data obtained with the literature one's related to 1979–1980 has shown that the characteristics of labile organic matter have changed despite of the total organic matter contain in the ecosystem.

Органическое вещество (ОВ) является важнейшим структурным и функциональным элементом водных экосистем, материальной основой биотического круговорота. Общий запас органического вещества в водоеме представлен двумя фракциями: взвешенным (ВОВ) и растворенным (РОВ) органическим веществом. Роль этих фракций в трофодинамике водных экосистем существенно различается. РОВ обеспечивает энергетические потребности осмотрфов и играет основную роль в функционировании бактериальной петли в водных экосистемах [1], а ВОВ используется фаготрофами и обеспечивает энергетические потребности планктонных и бентосных сообществ. Обе фракции по своей функциональной активности могут быть разделены на лабильное и стойкое органическое вещество. Лабильное ОВ легко вступает в биотический круговорот, эффективно усваивается водными организмами и играет важнейшую роль в функционировании водных экосистем, в том числе в процессах биологического самоочищения, формирования качества вод и биологической продуктивности водоемов. В связи с этим оценка соотношения между стойким и лабильным органическим веществом в водоемах разного трофического типа представляет большой научный и практический интерес.

В практике гидробиологических исследований для оценки содержания лабильного органического вещества (ЛОВ) используют различные методы. О его количестве судят по результатам мягкого ки-слотного либо щелочного гидролиза, содержанию белка и отношению С:N [2]. Однако наиболее часто количество лабильного органического вещества оценивают экспериментально по изменению

содержания органического углерода, кислорода, углекислого газа либо биомассы бактерий [3]. Для характеристики ЛОВ используется такой показатель, как биохимическое потребление кислорода (БПК), в частности величины БПК₅ либо БПК_{полн}.

В настоящей работе соотношение между стойким и лабильным органическим веществом в озерах разного трофического типа определяли на основании двух независимых подходов. В первом применили стандартный метод определения БПК за разные сроки экспозиции и дальнейший расчет БПК_{полн}, а во втором о количестве ЛОВ судили по изменению общего содержания органического вещества в процессе 20-суточной экспозиции озерной воды.

Материал и методика

Исследования проводили на озерах Нарочь, Мястро, Баторино и Большие Швакшты, различающихся по трофическому статусу (от мезоолиготрофного до высокоэвтрофного) и ряду морфометрических показателей (табл. 1). Водоемы находятся на территории НП «Нарочанский» на северо-западе Беларуси. Нарочь, Мястро и Баторино образуют систему Нарочанских озер, начальным в которой является оз. Баторино, а конечным – оз. Нарочь [4]. Все исследованные озера на протяжении непродолжительного периода времени под воздействием ряда природных и антропогенных факторов существенно изменили свой трофический статус. При этом в озерах Нарочь, Мястро, Баторино статус снизился [5], а в оз. Б. Швакшты повысился [6].

Таблица 1

Некоторые гидроэкологические характеристики исследуемых озер (по [4, 9])

Показатель	Озеро			
	Нарочь	Мястро	Баторино	Б. Швакшты
Площадь водного зеркала, км ²	79,6	13,1	6,3	9,56
Глубина, м:	8,9	5,4	3,0	2,3
максимальная	24,8	11,3	5,5	5,3
Площадь общего водосбора, км ²	279	133,1	92,5	84,6
Длина береговой линии, км	40	20,2	15	13,1
Объем водной массы, млн м ³	710,4	70	18,7	22,3
Хлорофилл, мкг/л	1,13	4,54	8,23	48,70
Содержание органического вещества, мг С/л	5,6	9,3	12,6	20,9
Прозрачность, м	7,2	3,6	1,2	0,70
Трофический статус	Мезоолиготрофное	Мезотрофное	Эвтрофное	Высокоэвтрофное

Для озер Нарочь, Мястро и Баторино оценка содержания ЛОВ в общем пуле ОВ была выполнена в 1980-е гг. и отражала ситуацию того периода [7, 8]. В связи с тем, что в настоящее время озера значительно снизили свой трофический статус, повторное определение содержания ЛОВ в воде Нарочанских озер должно отразить особенности соотношения стойкого и легкоокисляемого ОВ на современном этапе эволюции озерных экосистем. Для озера Б. Швакшты содержание ЛОВ определялось впервые.

В течение вегетационных сезонов 2008–2009 гг. проводили ежемесячный отбор проб в озерах Нарочь, Мястро, Баторино и Б. Швакшты для оценки содержания ЛОВ по показателям БПК. Измерение БПК выполняли стандартными методами, основанными на определении растворенного кислорода до и после инкубации проб в термостате при 20 °С в течение 1, 3, 5 (6), 8 и 10 сут. Концентрацию растворенного кислорода находили по методу Винклера [10]. В подавляющем большинстве опытов процесс БПК достаточно хорошо аппроксимировался кинетическим уравнением первого порядка, которое и использовалось для расчета значений БПК_{полн} и К с помощью пакета «Поиск решения» в табличном редакторе Microsoft Excel.

При определении содержания ЛОВ по изменению общего количества органического вещества в процессе 20-суточной экспозиции пробу воды разделяли на две аликвоты: первая служила для нахождения содержания ОВ в момент постановки эксперимента (контроль), вторую экспонировали в течение 20 сут в темноте при температуре 20 °С. Контрольную аликвоту разливали в химические термостойкие стаканы по 3–4 параллельные пробы, выпаривали на водяной бане и хранили до конца эксперимента при температуре минус 10 °С. Вторую аликвоту в колбе, закрытой парафиновой пленкой, экспонировали в термостате при температуре 20 °С в течение 20 сут. Предполагалось, что за это время все лабильное органическое вещество минерализуется в процессе бактериальной деструкции.

По истечении запланированного времени экспонированную воду разливали по стаканам (3 параллельные пробы) и выпаривали. Содержание органического вещества $S_{\text{общ}}$ определяли методом бихроматного окисления [10] одновременно в контрольной и опытной партиях проб с использованием одинакового контроля и титра. Содержание лабильной фракции $S_{\text{лаб}}$ рассчитывали по разнице между количеством ОВ в начале и в конце опыта. Чтобы получить достоверные различия $S_{\text{общ}}$ до и после экспозиции, для водоемов с низким содержанием органического вещества увеличивали объем пробы. Экспериментально было установлено, что для воды с концентрацией ОВ 20 мг С/л и более (оз. Б. Швакшты) достаточно объема пробы 50 мл, а для других озер количество выпариваемой воды рассчитывали в зависимости от содержания ОВ в исследуемом водоеме: оз. Баторино – 100 мл, оз. Мястро – 150 мл, оз. Нарочь – 200 мл.

Эксперименты по изменению общего количества органического вещества в процессе 20-суточной экспозиции проводили в течение вегетационных сезонов 2009–2010 гг. Результаты определений ЛОВ как методом БПК, так и методом бихроматной окисляемости выражали в величинах углерода (мг С/л), используя для этого пересчетный коэффициент 0,375 мг О/мг С.

Корреляционный анализ данных осуществлялся с использованием программы Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения общего содержания органического вещества (по бихроматной окисляемости) и его лабильной фракции по показателю БПК_{полн} приведены в табл. 2. В исследованных озерах четко прослеживается тенденция к увеличению содержания общего ОВ и его лабильной фракции с увеличением трофности водоема. Так, содержание ОВ изменяется от 5,88 мг С/л в мезоолиготрофном оз. Нарочь до 18,48 мг С/л в высокоэвтрофном оз. Б. Швакшты, а содержание ЛОВ – от 0,62 до 4,17 мг С/л. Во всех озерах общий пул органического вещества в основном представлен стойким органическим веществом. На долю лабильной фракции в разных озерах и в разные сроки наблюдения приходится от 4,7 до 22,4 %. В этот диапазон попадает большинство известных из литературы данных [8, 11]. Для разнотипных озер Нарочь, Мястро, Баторино зависимость между уровнем трофии и относительным содержанием ЛОВ не прослеживалась и в среднем составляла 10,7, 8,7 и 10,0 % соответственно. Однако в высокоэвтрофном оз. Б. Швакшты доля ЛОВ была выше (19,0 %) и значительно отличалась от данного показателя для озер Нарочанской группы.

Таблица 2

Содержание органического вещества и его лабильной фракции (по БПК_{полн}) в воде озер Нарочанской группы и оз. Б. Швакшты в 1979–1980 и 2008–2009 гг.

Озеро	Хлорофилл, мкг/л		ОВ, мг С/л		ЛОВ, мг С/л		ЛОВ/ОВ, %	
	1979–1980 гг.	2008–2009 гг.	1979–1980 гг.	2008–2009 гг.	1979–1980 гг.	2008–2009 гг.	1979–1980 гг.	2008–2009 гг.
Нарочь	5,23	1,14±0,36	5,38	5,88±0,47	0,73	0,62±0,24	14	10,7±4,9
Мястро	24,61	4,96±2,63	8,71	8,99±0,57	1,61	0,78±0,30	18	8,7±3,1
Баторино	64,68	8,98±3,15	14,60	13,24±1,17	2,95	1,45±0,43	21	11,0±3,3
Б. Швакшты	–	50,02±6,80	–	21,56±2,76	–	4,17±0,56	–	19,0±2,4

Примечание. Приведены средние значения либо средние ± SD за указанный период.

В сравнении с 1980-ми гг. [8] общее содержание ОВ в Нарочанских озерах практически не изменилось, тогда как абсолютное и относительное содержание лабильной фракции ОВ заметно снизилось (см. табл. 2).

Уменьшение содержания ЛОВ, по-видимому, объясняется тем, что в процессе деэвтрофирования в озерах изменилось соотношение между растворенным и взвешенным ОВ. Поскольку доля ЛОВ во взвешенном веществе заметно выше, чем в растворенном [8], то снижение относительного содержания взвешенного органического вещества привело к уменьшению доли ЛОВ в общем ОВ в воде Нарочанских озер. Более высокое относительное содержание ЛОВ в воде оз. Б. Швакшты также обусловлено большей долей взвешенного ОВ в общем пуле ОВ.

Использование метода БПК для определения лабильного ОВ по величине БПК_{полн} позволило рассчитать константу скорости потребления кислорода K , сут⁻¹ – важный параметр, характеризующий степень лабильности органического вещества и скорость его включения в биотический круговорот. По полученным на исследованных озерах данным в течение вегетационных сезонов 2008–2009 гг., величины K варьировали в широких пределах, принимая значения от 0,07 до 0,35 сут⁻¹, средние значения

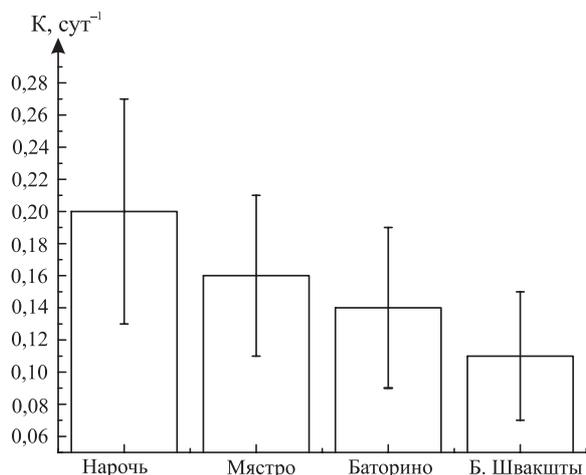


Рис. 1. Константы скорости потребления кислорода (средняя ± SD) в воде озер Нарочанской группы и оз. Б. Швакшты в вегетационные сезоны 2008–2009 гг.

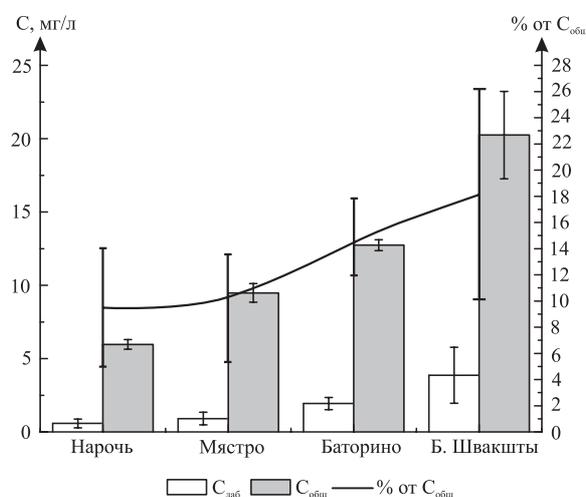


Рис. 2. Содержание общего и лабильного органического вещества в воде озер Нарочанского региона в 2009–2010 гг. (средняя ± SD)

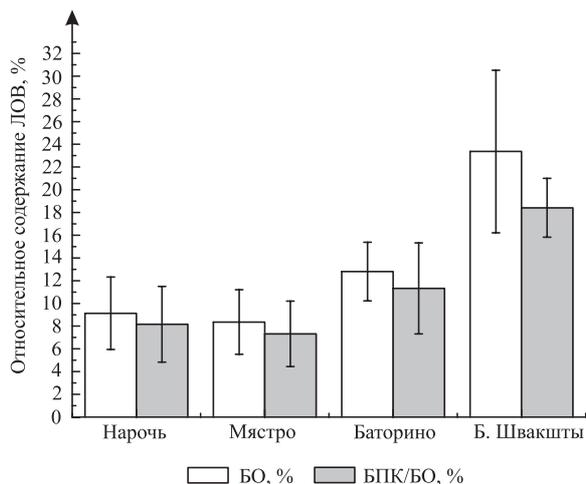


Рис. 3. Средние для вегетационного сезона 2009 г. величины относительного содержания ЛОВ в воде исследованных озер (средняя ± SD), полученные двумя методами (БО по изменению содержания ОВ в процессе экспозиции; BPK/БО по результатам определения BPK_{полн})

показателя снижались в ряду озер Нарочь – Мястро – Баторино – Б. Швакшты (рис. 1). Корреляционный анализ данных выявил статистически значимую обратную связь средней силы между величинами K и концентрацией хлорофилла (коэффициент корреляции Спирмена $R_s = -0,44$ при $p < 0,05$), что подтверждает снижение лабильности органического вещества с увеличением трофического статуса водоема. Впервые зависимость константы скорости потребления кислорода от уровня трофии водоема была показана в работе [8] на материалах, полученных на исследованных нами водоемах в 1980-е гг. Подтверждение этой зависимости, несмотря на серьезные перестройки в функционировании озерных экосистем, произошедшие за истекший период, говорит о ее универсальности.

Определение лабильной фракции органического вещества по изменению концентрации ОВ до и после 20-суточной экспозиции проб воды исследуемых озер проводили в вегетационные сезоны 2009–2010 гг. Результаты исследований представлены на рис. 2.

В целом для полученного этим методом массива данных содержание ЛОВ в воде озер Нарочь, Мястро и Баторино варьировало в пределах от $0,20 \div 2,68$ мг С/л, что составляло $3,4 \div 17,6$ % от общего содержания ОВ. Величины содержания $C_{общ}$ в воде озер составляли от $5,44 \div 13,45$ мг С/л. Содержание ЛОВ в оз. Б. Швакшты, а также его вклад в общий объем ОВ оказались наиболее высокими и составили в среднем $3,87$ мг С/л и $18,4$ % соответственно.

В 2009 г. оба подхода к определению ЛОВ использовали одновременно, что позволило сравнить полученные результаты. Как показано на рис. 3, оба метода дали близкие статистически не различающиеся результаты.

Данные по содержанию ЛОВ дают основание предполагать существование взаимосвязи между уровнем трофии водоема и содержанием лабильной фракции вещества в воде. Корреляционный анализ данных выявил наличие статистически значимой связи между относительным содержанием ЛОВ и концентрацией хлорофилла как показателя трофии водоема ($R_s = 0,85$ при $p < 0,05$). Используются осредненные для каждого из озер материалы за 2008–2010 гг. в двух различных подходах к определению ЛОВ, а также опубликованные материалы за 1979–1980 гг. Установленная зависимость доказывает связь между уровнем трофии и долей легкоокисляемого метаболически активного органического вещества в озерах.

В воде озер разного трофического типа двумя независимыми методами определено абсолютное и относительное содержание лабильного органического вещества. Оба метода дали сходные результаты, что подтверждает возможность их применения в практике

гидробиологических исследований и увеличивает степень доверия к полученным результатам. Показано, что лабильное органическое вещество составляет сравнительно небольшую долю от содержания общего ОВ (от 4,7 до 22,4 %). Абсолютное и относительное содержание лабильного ОВ возрастает с увеличением трофического статуса водоема, однако скорость его включения в биотический круговорот (лабильность) при этом снижается. По сравнению с 1980-ми гг. озера Нарочанской группы претерпели существенные изменения в структурной и функциональной организации экосистем. При этом общее содержание ОВ в озерах осталось на прежнем уровне, тогда как абсолютное и относительное содержание лабильной фракции ОВ снизилось, что, по-видимому, обусловлено изменением соотношения между растворенным и взвешенным ОВ в процессе деэвтрофирования озер.

1. Baines S.B., Pace M.L. // *Limnol. and Oceanogr.* 1991. Vol. 36 (6). P. 1078.
2. Харкевич Н.С., Скопинцев Б.Л. // *Вод. ресурсы.* 1985. Вып. 1. С. 178.
3. Søndergaard M., Middelboe M. // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1995. Vol. 118. P. 283.
4. Власов Б.П., Якушко О.Ф., Гигевич Г.С. и др. *Озера Беларуси: Справ. Мн., 2004.*
5. Остапеня А.П. // *Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы Междунар. науч. конф. Мн., 2007. С. 31.*
6. Остапеня А.П., Жукова Т.В. // *Докл. НАН Беларуси.* 2009. Т. 53. № 3.
7. *Экологическая система Нарочанских озер / Под ред. Г.Г. Винберга. Мн., 1985.*
8. Ostapenia A.P., Parparov A., Verman T. // *Freshwater Biology.* 2009. Vol. 54. P. 1312.
9. *Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясстро, Баторино (2009 год) / Под общ. ред. А.П. Остапени. Мн., 2010.*
10. *Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю. Лурье. М., 1973.*
11. Марголина Г.Л. *Микробиологические процессы деструкции в пресноводных водоемах. М., 1989.*

Поступила в редакцию 29.03.11.

Юлия Константиновна Верес – аспирант НИЛ гидроэкологии. Научный руководитель – А.П. Остапеня.

Александр Павлович Остапеня – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор биологических наук, профессор, заведующий НИЛ гидроэкологии.