

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЭВТРОФНЫХ ВОДОЕМАХ КАРЕЛИИ

© 2022 г. А. В. Леонов^а, *, М. В. Зобкова^б, **

^аИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

^бИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: leonov@ocean.ru

**E-mail: rincalika21@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.02.2022 г.

После доработки 24.04.2022 г.

Принята к публикации 30.05.2022 г.

Проведено исследование по изучению долгосрочных (126 сут) БПК-экспериментов в воде из эвтрофных водных объектов Карелии (озер Крошнозеро, Святозеро, Яндомозеро, Верхнее и реки Шуя). За различные сезоны 2012–2017 гг. с водой из поверхностного горизонта было выполнено 48 экспериментов при 20 и 10°C. Были получены значения кинетических параметров БПК, которые достаточно полно отражают изменения потребления O_2 по стадиям (I, II и L). В результате анализа данных был выявлен ряд общих особенностей, характерных для всех исследованных эвтрофных водных объектов. Во-первых, наблюдается резкое увеличение потребления O_2 от зимы к лету при 20 и 10°C: в среднем – в 3.0 и 4.7 раза соответственно. Во-вторых, в зависимости от сезона изменяется вклад каждой стадии в БПК_{полн}: зимой и осенью наибольший вклад при 20°C оказывает L стадия (53%), весной – II стадия (45%), а летом – I стадия (43%). Такое отличие связано с условиями продуцирования лабильного органического вещества (ОВ) в различные сезоны года. В-третьих, скорость окисления ОВ на L стадии, на которой происходит медленное окисление гумусовых веществ, во все сезоны в несколько раз ниже скорости на I стадии, где быстро окисляются лабильные компоненты ОВ. Только летом скорость на L стадии несколько возросла, что, по-видимому, связано с интенсивным окислением взвешенного ОВ, образующегося в большом количестве в этот период. Полученные взаимосвязи между разными показателями ОВ и кинетическими параметрами БПК в воде из эвтрофных озер отражают спектр сезонных особенностей изменения условий окисления ОВ и характеризуются высокими значениями коэффициентов детерминации ($R^2 = 0.81–1.00$).

Ключевые слова: биохимическое потребление кислорода, константа скорости/скорость потребления кислорода, органическое вещество, качество воды, эвтрофные водоемы

DOI: 10.31857/S0869607122030053

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) в природных водах принято разделять в зависимости от происхождения на автохтонное (образуется в водоемах в основном за счет фитопланктона) и аллохтонное (образуется на водосборе и поступает в природные воды с речным стоком). Состав автохтонного ОВ (ОВ_{авт}) характеризуется биохимически легко окисляемыми соединениями (свободными углеводами и аминокислотами, липида-

ми, белками, мочевиной и другими веществами), а аллохтонного ($ОВ_{алл}$) — трудно-окисляемыми гумусовыми веществами (ГВ) [3]. Следует отметить, что с ростом трофности существенный вклад в общее содержание $ОВ$ вносит взвешенное вещество ($ВВ$), активно продуцируемое в воде в периоды вегетации.

Эвтрофные водоемы характеризуются высокими концентрациями биогенных веществ ($БВ$: соединений N , P , Si), высокой продукцией биомассы фитопланктона и низким качеством воды [2]. При этом биотрансформация $БВ$ и продуцирование биомассы происходят при выраженных колебаниях активности этих процессов по сезонам, что связано с годовой динамикой факторов среды (температура, освещенность, прозрачность среды и содержание в ней $БВ$).

В сезонной динамике общего содержания $ОВ_{авт}$ (растворенного и взвешенного) наименьшие его концентрации приходится на период зимы, когда вегетация планктона низка и нет продуцирования $ОВ$. В большинстве водоемов Карелии пик концентраций $ОВ_{авт}$ приходится на лето — период наибольшей активности фитопланктона [16]. При этом в эвтрофных водоемах концентрация взвешенного $ОВ_{авт}$ существенно возрастает в вегетационный период при малой изменчивости содержания растворенного $ОВ_{авт}$ [6].

На развитие кинетики в продолжительных БПК-экспериментах в воде из эвтрофных водоемов в значительной степени влияют следующие особенности: низкое содержание в придонных водах растворенного O_2 (иногда и его отсутствие), специфичный состав зоо- и фитопланктона (при весеннем цветении в сообществе фитопланктона часто присутствует вид *Microcystis aeruginosa*), наличие характерного антропогенного влияния на водоемы с выраженным поступлением $БВ$ и $ОВ$ с водосборов [2], высокое содержание легкоокисляемых компонентов $ОВ_{авт}$ [17] и, в частности, взвешенное $ОВ$. В результате внешний (или характерный) вид БПК-кривых может существенно изменяться в разные сезоны, что характеризуется значениями кинетических параметров [11].

Поэтому цель данного исследования состояла в оценке особенностей кинетических процессов трансформации $ОВ$ в эвтрофных водоемах. Для этого предстояло установить значения кинетических параметров БПК в воде с учетом основных факторов среды (температурные условия, разные сезоны, состав компонентов $ОВ$); охарактеризовать отличия окисления различных компонентов $ОВ$ на отдельных стадиях развития БПК (I, II и L стадии); выявить взаимосвязи между кинетическими параметрами БПК и показателями компонентов $ОВ$.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в 2012–2017 гг. на пяти эвтрофных водных объектах (озера Крошнозеро, Святозеро, Яндомозеро, Верхнее и р. Шуя), отличающихся морфометрическими характеристиками, размерами и химическим составом (рис. 1). Все выбранные для исследования кинетики БПК эвтрофные водоемы Карелии разнотипны по содержанию $БВ$. В озерах повышена концентрация $P_{общ}$, и от зимы к лету его содержание возрастает при незначительных колебаниях $P_{мин}$. Содержание форм N может сильно отличаться, а концентрация Si особенно зависит от его поступления с водосборов и зимой максимальна в большинстве водоемов [16].

Озеро Крошнозеро (КР) относится к бассейну р. Шуи. Площадь водосборной территории 187,2 км², период водообмена озера составляет 0,9 года, средняя и максимальная глубины 5,7 и 12,6 м соответственно. Антропогенную нагрузку на водоем оказывают сельскохозяйственные угодья [14], а также форелевое хозяйство, расположенное на его акватории. Несмотря на то, что в вегетационный период в воде КР повышены концентрации углеводов, липидов, белков, она характеризуется не очень высокой долей $ОВ_{авт}$ из-за проточности водоема [17].

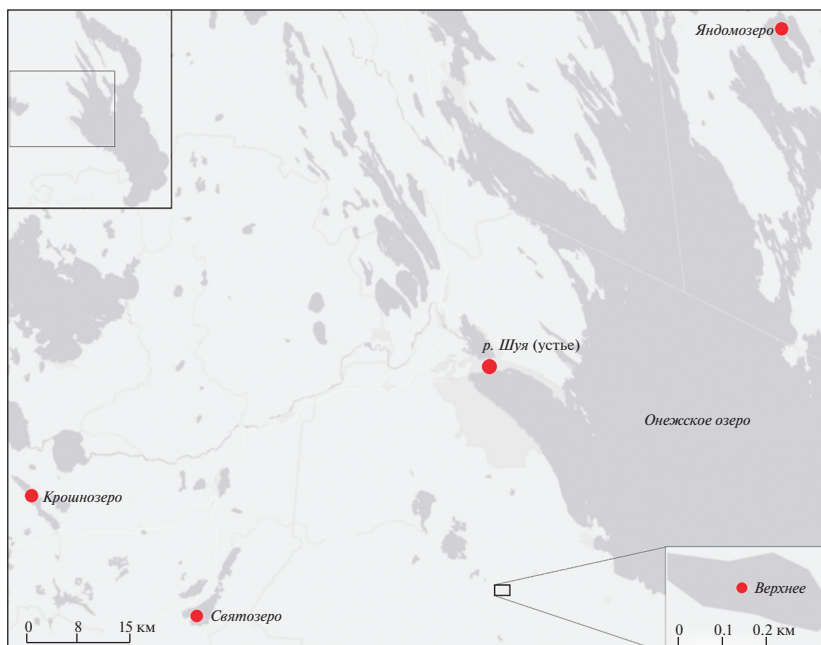


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных водных объектов.

Fig. 1. Schematic map of the sampling sites in water objects.

Озеро Святозеро (СВ) — водоем сельскохозяйственного района [14], находится в бассейне р. Шуя. Площадь водосборной территории 50.5 км^2 , а его зеркала 9.9 км^2 . Водоем мелководный (максимальная глубина 17.2, средняя 7.2 м) и слабопроточный (период водообмена 7.7 лет) с хорошим прогревом воды. В воде СВ отмечены значительные концентрации лабильного ОВ (углеводов, липидов, белков, растворенных аминокислот) и повышенная доля общего $\text{ОВ}_{\text{авт}}$ ($>40\%$ из-за замедленного водообмена [17]). Водоем подвергается интенсивному антропогенному воздействию (населенные пункты, сельское хозяйство, рыбоводство и др.), которое за многолетний период способствовало возрастанию его трофического статуса [7, 16].

Озеро Яндомозеро (ЯН) — мелководное (максимальная и средняя глубины 9 и 4 м соответственно), площадь поверхности 30 км^2 . Предполагалось, что ЯН относится к водоемам мезотрофного типа, однако более детальные сезонные исследования дали информацию, которая позволяет считать озеро эвтрофным [16]. Водоем характеризуют следующие показатели: малый удельный водосбор (2.1) и средний по величине период водообмена (4.2 года). В зимний период в его водах повышено содержание ВВ (до 1.4 мг/л), а в осенний период отмечена наибольшая активность фитопланктона [16].

Озеро Верхнее (ВР) — мелководный водоем, расположенный на водосборе Онежского озера. Рядом с озером расположены дачные кооперативы, которые способствуют выносу БВ и загрязняющих веществ в него. Подробных гидрохимических исследований на озере ранее не проводилось, однако в этом полигумусном водоеме отмечена очень высокая концентрация $\text{ОВ}_{\text{алл}}$ [6].

Река Шуя (РШ) — второй по величине приток Онежского озера (объем стока $3.1 \text{ км}^3/\text{год}$). Устье реки расположено в вершинной части Петрозаводской губы озера, куда с речными водами поступает существенное количество ОВ гумусовой природы

[3]. Река имеет освоенный под сельское хозяйство водосбор. Для водоемов бассейна р. Шуи характерно антропогенное евтрофирование при избыточном поступлении в водоемы БВ от рассредоточенных сельско- и рыбохозяйственных источников.

Вода для экспериментов отбиралась в районах формирования стока из озер Крошнозеро, Святозеро и Яндомозеро зимой-осенью 2012 г. и из центральной части озера Верхнее – в период открытой воды 2014 г. Из устьевой зоны р. Шуи отбор проб осуществлялся во все сезоны 2013 г., а также зимой и весной 2016 и 2017 гг. Пробы воды для БПК-опытов отбирались только из поверхностного горизонта 1 м. Всего было выполнено 48 экспериментов: 25 – при 20°C (по 7 – зимой и весной, 6 – летом и 5 – осенью), и 23 – при 10°C (6 экспериментов зимой, 7 – весной и по 5 – летом и осенью).

Методика постановки и проведения длительных БПК-экспериментов была подробно описана ранее [10]. Полученные в экспериментах мультистадийные БПК-кривые обрабатывались [13] и для каждой выделенной стадии оценивались значения кинетических параметров БПК: k – константа скорости БПК на I стадии, сут^{-1} ; w_1 – константа скорости БПК на II стадии, $(\text{л} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1})$; v_1 , ω_S – соответственно скорости БПК на I и II стадиях, $\text{мг O}_2/(\text{л} \cdot \text{сут})$; $[\text{O}_2]^I$, $[\text{O}_2]^{II}$ – предельные значения БПК соответственно на I и II стадиях, $\text{мг O}_2/\text{л}$; $\omega_S \cdot 126$ – общее потребление O_2 на L стадии, $\text{мг O}_2/\text{л}$; $\text{БПК}_{\text{полн}}$ – БПК полное, то есть суммарное потребление O_2 по выделенным стадиям, $\text{мг O}_2/\text{л}$.

Перед началом эксперимента в пробах воды определяли значения химического потребления кислорода (ХПК) и перманганатной окисляемости (ПО), а также содержание общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и взвешенного вещества (ВВ). Определение органического углерода ($C_{\text{орг}}$) проводилось согласно методике [5], а общего $\text{ОВ}_{\text{авт}}$ и $\text{ОВ}_{\text{алл}}$ сорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе [15].

Значения ряда параметров ОВ оценивались по эмпирическим уравнениям: содержание лабильного $C(C_{\text{лаб}} = 0.3[\text{O}_2]^I)$; условно “стойкого” $C(C_{\text{стаб}} = C_{\text{орг}} - C_{\text{лаб}})$, $C_{\text{орг}}$ в зависимости от общего содержания ОВ (ОВ_2) [1]; содержание $C_{\text{орг}}$ – в случаях, где не велось его аналитическое определение ($C_{\text{орг}} = 0.375 \text{ ХПК}$) [19].

Особенность воды эвтрофных водоемов заключается в высоком содержании биомассы фитопланктона и, следовательно, органического ВВ, особенно в летний период [16]. Поэтому при исследовании воды и ее использовании в БПК-экспериментах необходимо учитывать взвешенную фракцию ОВ ($\text{ОВ}_{\text{взв}}$), характеризующуюся высоким содержанием детрита, который при разложении определяет высокие скорости потребления O_2 на L стадии (значения ω_S могут быть сопоставимыми с v_1 , и не исключаются случаи, когда $\omega_S \geq v_1$ или $\omega_S \gg v_1$). В текущем исследовании содержание $\text{ОВ}_{\text{взв}}$ оценивали по разнице: $\text{ОВ}_{\text{взв}}, \text{мг O}_2/\text{л} = \text{ХПК} - \text{растворенное } \text{ОВ}_{\text{авт}} - \text{ОВ}_{\text{алл}}$ [15].

Статистическую обработку данных вели с помощью программного обеспечения SofaStatistics (www.sofastatistics.com) с пороговым критерием статистической значимости (p) равным 0.01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения показателей ОВ в водах исследованных водных объектов. Среднее и сезонное содержание $P_{\text{общ}}$, ВВ, ОВ и его компонентов отличалось во всех исследованных эвтрофных водных объектах (табл. 1). Концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде всех озер оставались на высоком уровне в течение всего периода наблюдений, при этом отмечалось увеличение $P_{\text{общ}}$ от зимы к лету. Отдельно выделялось СВ, в воде которого при цветении воды летом 2012 г. отмечалось резкое возрастание содержания $P_{\text{общ}}$ до 222 мкг/л. В то же время были повышены значения косвенных показателей ОВ (табл. 1), а на содержание $\text{ОВ}_{\text{взв}}$ приходилось 18.1 мг $\text{O}_2/\text{л}$ (или 68% общего $\text{ОВ}_{\text{авт}}$). Во время цветения резко уве-

Таблица 1. Химические показатели ОВ воды в 2012–2017 гг. (пояснения в тексте)
Table 1. Chemical parameters of water organic matter in 2012–2017 (explanations in the text)

Водный объект, сезон, год	Аналитические измерения								Расчетные значения		
	Р _{общ} , мкг/л	ВВ, мг/л	С _{орг} , мг С/л	ПО	ХПК	ОВ _{авт}	ОВ _{алл}	ОВ _{взв}	С _{лаб}	С _{стаб}	ОВ _Σ , мг/л
	мг О/л								мг С/л		
КР, З, 2012	53	0.6	13.2*	17.1	35.1	10.0	25.1	1.0	0.08	13.12	6.1
КР, В, 2012	78	11.4	13.2*	14.5	35.2	14.3	20.9	7.3	1.08	12.12	6.1
КР, Л, 2012	68	7.0	12.3*	21.5	32.7	16.9	15.8	6.7	0.99	11.31	5.7
КР, О, 2012	59	3.5	11.7*	13.4	31.1	12.9	18.2	2.0	0.67	13.04	5.4
Среднее	64	5.6	12.6	16.6	33.5	13.3	20.0	4.3	—	12.4	5.9
СВ, З, 2012	42	2.2	6.7*	6.3	17.9	8.0	9.9	1.0	0.08	6.62	3.1
СВ, В, 2012	52	2.7	7.2*	5.3	19.1	10.7	8.4	5.7	0.69	6.51	3.4
СВ, Л, 2012	222	9.6	13.2*	9.9	35.3	24.7	10.6	18.1	6.05	7.15	6.1
СВ, О, 2012	51	3.7	7.5*	6.4	19.9	14.3	5.6	4.4	0.85	6.65	3.5
Среднее	92	4.6	8.7	7.0	23.0	14.4	8.6	7.3	—	6.9	4.0
ЯН, З, 2012	16	1.4	7.7*	7.5	20.4	8.7	11.7	1.4	0.14	7.56	3.6
ЯН, В, 2012	20	1.6	10.5*	9.1	21.8	15.2	12.8	8.4	0.53	9.98	4.9
ЯН, Л, 2012	53	6.2	8.2*	7.4	21.9	17.7	4.2	6.4	1.29	6.91	3.8
ЯН, О, 2012	22	3.3	13.7*	17.1	36.6	17.6	19.0	4.7	0.66	13.04	6.4
Среднее	28	3.1	10.0	10.3	25.2	14.8	11.9	5.2	—	9.4	4.7
РШ, З, 2013	35	1.6	17.0	23.7	45.9	7.8	38.1	2.3	0.40	16.60	7.9
РШ, В, 2013	34	9.3	11.8	19.7	33.4	7.0	26.4	0.6	1.02	10.78	5.5
РШ, Л, 2013	65	2.5	15.6	15.1	38.5	14.4	24.1	4.9	2.39	13.21	7.3
РШ, О, 2013	41	6.0	12.9	14.1	30.8	7.7	23.1	2.9	0.45	12.45	6.0
РШ, З, 2016	35	2.0	18.0	21.5	51.3	12.8	38.5	0.9	0.60	17.40	8.4
РШ, В, 2016	37	0.9	16.2	19.7	42.4	7.6	34.8	1.2	0.83	15.37	7.5
РШ, З, 2017	37	2.2	18.6	22.6	49.0	6.9	42.1	2.4	0.83	17.47	8.7
РШ, В, 2017	44	11.5	16.2	21.6	44.9	5.6	39.3	1.2	0.30	15.90	7.5
Среднее	41	4.5	15.8	19.8	42.0	8.0	30.4	2.1	—	14.9	7.3
ВР, В, 2014	47	—	30.3	41.6	61.5	10.2	53.3	0.0	0.45	29.85	14.1
ВР, Л, 2014	66	0.8	26.9	39.3	79.5	10.5	69.0	0.4	0.25	26.65	12.5
ВР, О, 2014	46	1.6	21.3	13.5	70.0	13.1	56.1	2.4	0.47	20.83	9.9
Среднее	53	1.2	26.2	31.5	70.3	11.3	59.5	0.9	—	25.8	12.2

Примечания: * Расчет С_{орг} по эмпирической формуле; обозначения сезонов в табл. 1–2: З – зима, В – весна, Л – лето, О – осень; прочерк – отсутствие данных.

личивались концентрации легкоокисляемых соединений: углеводов – до 11.0 мг/л и липидов – 0.97 мг/л [4]. Это связано с тем, что в летний период в воде СВ активно развиваются сине-зеленые и зеленые водоросли (85% общей численности), в которых содержание углеводов обычно достигает 30–60% в расчете на сухую массу [21].

Содержание ВВ в воде эвтрофных озер выше, чем в мезо- и олиготрофных, что особенно заметно в период открытой воды во время активных продукционных процессов и подтверждается увеличением содержания взвешенной формы ОВ_{авт}, тесной связью ВВ и С_{лаб} (Тест Пирсона: $9.376e^{-3} < 0.01$; $R = -0.541$; $df = 20$). Однако, в озере ВР отме-

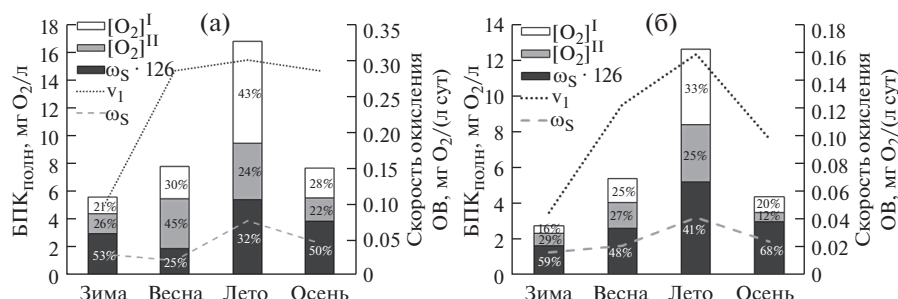


Рис. 2. Вклад каждой стадии (I, II и L) в общее потребление кислорода, а также скорость окисления ОВ на I и L стадиях в различные сезоны при 20 (а) и 10°C (б). Пояснения в тексте.

Fig. 2. Contribution of each stages (I, II, and L) to total oxygen consumption and the rate of organic matter oxidation at I and L stages in different seasons at 20 (a) and 10°C (б). Explanations in the text.

чались наименьшие содержания ВВ и ОВ_{взв} (табл. 1). Это может быть связано с высоким содержанием ОВ_{алл} в воде, которое уменьшает фотический слой и тем самым лимитирует первичную продукцию [19]. Такая тенденция подтверждается статистически: установлено, что с ростом ОВ_{алл} в исследованных объектах снижалось содержание ОВ_{взв} (Тест Пирсона: $6.601e^{-3} < 0.01$; $R = -0.561$; $df = 20$). Исследованные водные объекты отличались по содержанию ОВ_{алл}, минимальные концентрации отмечались в мезогумусном СВ (в среднем 8.6 мг О/л), а максимальные — в полигумусном ВР (в среднем 59.5 мг О/л). Содержание ОВ_{авт} значительно варьировало в течение всего периода наблюдений, за счет изменения взвешенной его формы, минимальные значения которой были отмечены в зимний период, когда продуцирования ОВ практически не происходило.

Особенности кинетики БПК в воде из эвтрофных водных объектов. С помощью БПК-кривых с выраженными двумя-тремя стадиями потребления О₂ были получены значения отдельных кинетических параметров (табл. 2). Обработка данных по кинетике БПК показала ряд общих особенностей, характерных для всех эвтрофных водных объектов. Наблюдается резкое увеличение потребления О₂ от зимы к лету: в среднем — в 3.0 и 4.7 раза соответственно при 20 и 10°C. В зависимости от сезона изменяется вклад каждой стадии в общее потребление О₂ (БПК_{полн}) (рис. 2). Зимой и осенью при разных температурах наибольший вклад в БПК_{полн} (50% и более) оказывает L стадия. В зимний период, когда новообразования ОВ практически не происходит, выявлен минимальный вклад I и II стадий в БПК_{полн}. Весной при 20°C доминирует II стадия (45% от БПК_{полн}). Это связано с активным продуцированием диатомовыми водорослями липидов [6], взаимосвязь которых от потребления О₂ на II стадии была выявлена ранее [11]. В летний период, когда происходит максимальное продуцирование лабильного ОВ, превалирует I стадия, что подтверждается связью, установленной между $[O_2]^I$ и ОВ_{авт} (Тест Пирсона: $5.666e^{-3} < 0.01$; $R = -0.558$; $df = 21$). Суммарное потребление О₂ на I и II стадиях летом при 20 и 10°C достигает соответственно 68 и 59%.

Скорость окисления ОВ на L стадии во все сезоны наблюдений была в несколько раз ниже скорости на I стадии (см. рис. 2). Это связано с тем, что на L стадии происходит медленное окисление ГВ, а на I стадии — сравнительно быстрое окисление лабильных компонентов ОВ. Только летом скорость потребления О₂ на L стадии возрастала при 20°C в среднем до 0.076 мг О₂/(л · сут) и при 10°C — до 0.041 мг О₂/(л · сут).

Таблица 2. Значения кинетических параметров БПК при разных температурах: 20°C — числитель и 10°C — знаменатель (числа в скобках — принятые конечные значения БПК, учитываемые при обработке данных экспериментов; пояснения в тексте)
Table 2. The values of kinetic parameters estimated at different temperatures: the numerator is the 20°C and the denominator is the 10°C (numbers in parentheses are adjusted final experimental BOD values taken into account at processing the experimental data; explanations in the text)

Водный объект, сезон, год	Тип БПК	Кинетические БПК-параметры									
		I стадия (по Е- или А-типу)			Линейная стадия		II стадия		БПК _{полн}		
		[O ₂] ^I , мг O ₂ /л	k или w ₁ , л мг ⁻¹ сут ⁻¹	v ₁ , мг O ₂ (л сут)	ω _S , мг O ₂ (л сут)	ω _S ·126, мг O ₂ /л	[O ₂] ^{II} , мг O ₂ /л	w ₂ , л мг ⁻¹ сут ⁻¹	расчет	опыт	
											мг O ₂ /л
КР, 3, 2012	$\frac{AL}{AL}$	$\frac{0.26}{0.08}$	$\frac{0.233}{0.494}$	$\frac{0.0011}{3.79 \times 10^{-4}}$	$\frac{0.0633}{0.0275}$	$\frac{5.317^*}{2.310^*}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{5.577}{2.390}$	$\frac{5.55}{2.39}$	
КР, В, 2012	$\frac{EA}{EAL}$	$\frac{3.60}{1.36}$	$\frac{0.175}{0.140}$	$\frac{0.6300}{0.1900}$	$\frac{—}{0.0434}$	$\frac{—}{5.468}$	$\frac{4.53}{1.31}$	$\frac{0.365}{0.207}$	$\frac{8.093^*}{8.138}$	$\frac{8.25(8.09)}{8.14}$	
КР, Л, 2012	$\frac{EL}{EL}$	$\frac{3.30}{1.97}$	$\frac{0.111}{0.129}$	$\frac{0.3660}{0.2540}$	$\frac{0.1320}{0.0587}$	$\frac{16.632}{7.396}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{19.93}{9.366}$	$\frac{19.93}{9.36}$	
КР, О, 2012	$\frac{AAL}{AL}$	$\frac{2.59}{1.12}$	$\frac{0.223}{0.298}$	$\frac{0.3120}{0.0535}$	$\frac{0.0212}{0.0256}$	$\frac{2.671}{3.226}$	$\frac{2.94}{—}$	$\frac{0.101}{—}$	$\frac{8.201}{4.346}$	$\frac{8.20}{4.38}$	
СВ, 3, 2012	$\frac{AAL}{AAL}$	$\frac{0.27}{0.21}$	$\frac{0.150}{0.254}$	$\frac{1.02 \times 10^{-3}}{1.14 \times 10^{-3}}$	$\frac{0.0174}{0.0050}$	$\frac{1.462^*}{0.420^*}$	$\frac{2.54}{0.51}$	$\frac{0.098}{0.150}$	$\frac{4.272}{1.140}$	$\frac{4.05(4.27)}{1.14}$	
СВ, В, 2012	$\frac{EAL}{EAL}$	$\frac{2.30}{1.43}$	$\frac{0.130}{0.108}$	$\frac{0.2990}{0.1540}$	$\frac{0.0259}{0.0231}$	$\frac{3.263}{2.911}$	$\frac{2.80}{0.86}$	$\frac{0.093}{0.401}$	$\frac{8.363}{5.201}$	$\frac{8.37}{5.20}$	
СВ, Л, 2012	$\frac{AAL}{EAL}$	$\frac{20.15}{12.52}$	$\frac{0.347}{0.085}$	$\frac{26.22}{1.064}$	$\frac{0.0643}{0.0750}$	$\frac{4.051^{2*}}{9.450}$	$\frac{16.46}{8.78}$	$\frac{0.180}{0.042}$	$\frac{40.66}{30.75}$	$\frac{42.0(40.7)}{30.75}$	
СВ, О, 2012	$\frac{AAL}{EAL}$	$\frac{2.84}{1.60}$	$\frac{0.255}{0.143}$	$\frac{0.4090}{0.2290}$	$\frac{0.0335}{0.0150}$	$\frac{4.221}{1.890}$	$\frac{1.47}{1.12}$	$\frac{0.100}{0.108}$	$\frac{8.531}{4.610}$	$\frac{8.54}{4.61}$	
ЯН, 3, 2012	$\frac{AL}{AL}$	$\frac{0.46}{0.47}$	$\frac{0.157}{0.220}$	$\frac{0.0953}{0.00566}$	$\frac{0.0348}{0.0143}$	$\frac{2.923^*}{1.201^*}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{3.383}{1.671}$	$\frac{3.37}{1.68}$	
ЯН, В, 2012	$\frac{AAL}{AAL}$	$\frac{1.75}{1.13}$	$\frac{0.332}{0.280}$	$\frac{0.1960}{0.0339}$	$\frac{0.0264}{0.0173}$	$\frac{3.326}{2.179}$	$\frac{1.42}{0.76}$	$\frac{0.490}{0.176}$	$\frac{6.562}{4.073}$	$\frac{6.39(6.56)}{3.91(4.07)}$	

Таблица 2. Окончание

Водный объект, сезон, год	Тип БПК	Кинетические БПК-параметры									
		I стадия (по Е- или А-типу)			Линейная стадия			II стадия		БПК _{полн}	
		$[O_2]^I$, мг O_2 /л	k или w_1 , л $мг^{-1}$ $сут^{-1}$	v_1 , $\frac{мг O_2}{л \text{ сут}}$	ω_S , $\frac{мг O_2}{л \text{ сут}}$	$\omega_S \cdot 126$, мг O_2 /л	$[O_2]^{II}$, мг O_2 /л	w_2 , л $мг^{-1}$ $сут^{-1}$	расчет	опыт	мг O_2 /л
ЯН, Л, 2012	$\frac{AA}{EAL}$	$\frac{4.30}{1.23}$	$\frac{0.223}{0.111}$	$\frac{0.9480}{0.137}$	$\frac{0.0257}{0.0257}$	$\frac{3.238}{3.238}$	$\frac{3.89}{1.40}$	$\frac{0.052}{0.116}$	$\frac{8.186}{5.868}$	$\frac{8.31(8.19)}{5.85}$	
ЯН, О, 2012	$\frac{EAL}{EAL}$	$\frac{2.20}{0.70}$	$\frac{0.105}{0.136}$	$\frac{0.2310}{0.0952}$	$\frac{0.0330}{0.0169}$	$\frac{4.158}{2.129}$	$\frac{1.50}{0.94}$	$\frac{0.092}{0.082}$	$\frac{7.858}{3.769}$	$\frac{7.67(7.86)}{3.77}$	
ВР, В, 2014	$\frac{EL}{AAL}$	$\frac{1.51}{1.25}$	$\frac{0.195}{0.269}$	$\frac{0.2940}{0.0716}$	$\frac{0.0871}{0.0266}$	$\frac{6.097^{3*}}{3.352}$	$\frac{—}{1.11}$	$\frac{—}{0.165}$	$\frac{7.607}{5.712}$	$\frac{7.61}{5.71}$	
ВР, Л, 2014	$\frac{AL}{AAL}$	$\frac{0.85}{1.76}$	$\frac{0.724}{0.390}$	$\frac{0.5010}{0.0657}$	$\frac{0.1852}{0.0200}$	$\frac{6.482^{4*}}{2.520}$	$\frac{—}{2.37}$	$\frac{—}{0.037}$	$\frac{7.327}{6.650}$	$\frac{7.32}{6.65}$	
ВР, О, 2014	$\frac{AL}{AL}$	$\frac{1.57}{0.39}$	$\frac{0.381}{0.357}$	$\frac{0.2060}{1.04 \times 10^{-3}}$	$\frac{0.1107}{0.0361}$	$\frac{5.424^{5*}}{4.549}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{6.994}{4.939}$	$\frac{6.95}{4.94}$	
РШ, З, 2016	$\frac{AAL}{EAL}$	$\frac{2.00}{0.68}$	$\frac{0.352}{0.189}$	$\frac{0.0330}{0.1290}$	$\frac{0.0327}{0.0201}$	$\frac{4.120}{2.533}$	$\frac{1.90}{0.75}$	$\frac{0.170}{0.224}$	$\frac{8.020}{3.963}$	$\frac{7.99}{3.94(3.96)}$	
РШ, В, 2016	$\frac{EAL}{AAL}$	$\frac{2.75}{0.90}$	$\frac{0.083}{0.430}$	$\frac{0.2280}{0.1560}$	$\frac{0.0066}{0.0071}$	$\frac{0.828}{0.646^{6*}}$	$\frac{4.51}{1.92}$	$\frac{0.116}{0.123}$	$\frac{8.088}{3.466}$	$\frac{8.06}{3.54(3.47)}$	
РШ, З, 2017	$\frac{EA}{EAL}$	$\frac{2.75}{0.66}$	$\frac{0.125}{0.175}$	$\frac{0.3440}{0.1160}$	$\frac{—}{0.0143}$	$\frac{—}{1.301^{6*}}$	$\frac{1.419}{1.49}$	$\frac{0.106}{0.127}$	$\frac{4.169^{5*}}{3.451}$	$\frac{4.17}{3.54}$	
РШ, В, 2017	$\frac{AA}{AA}$	$\frac{1.00}{1.65}$	$\frac{0.420}{0.276}$	$\frac{0.00773}{0.0688}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{6.98}{3.44}$	$\frac{0.076}{0.081}$	$\frac{7.980}{5.090}$	$\frac{7.96}{5.22(5.06)}$	

Примечания: * период 84 сут; ² период 63 сут; ³ период 70 сут; ⁴ период 35 сут; ⁵ период 49 сут; ⁶ период 91 сут; прочерк — отсутствие данных.

Это может быть связано с интенсивным окислением не только ГВ, но и взвешенного ОВ [11], образующегося в большом количестве в этот период. Скорость окисления ОВ на I стадии была минимальной в зимней воде, а в летней при 20 и 10°C она увеличивалась соответственно в 3.2 и 3.6 раза. Таким образом, вклад каждой стадии в общее потребление O_2 , а также скорости окисления ОВ на разных стадиях, характеризуют состав и особенности окисления различных компонентов ОВ в разные сезоны года в эвтрофных водоемах.

Принципиальная особенность опытов с водой из эвтрофных водных объектов заключается в различиях скоростей процессов потребления O_2 на разных стадиях БПК и особенно на L стадии. В ходе экспериментов до завершения намеченного их срока, часто фиксируется полное исчерпание растворенного O_2 на I и II стадиях. Такие случаи были отмечены на 35–70-е сут в экспериментах с водой из КР, ЯН, ВР и РШ. Особенности процессов кинетики БПК и их параметров для конкретных исследованных водных объектов приведены ниже в описаниях каждой из пяти серий экспериментов.

Серия 1 — данные экспериментов с водой из озера Крошнозеро. В зимней и осенней воде сохранялся порядок значений констант скорости w_1 , но существенно отличались значения параметров $[O_2]^1$, и v_1 : они были выше осенью как при 20, так и при 10°C (табл. 2, рис. 3). Весной и летом средние значения констант скорости БПК при 20 и 10°C отличались мало, а средние значения параметров $[O_2]^1$ и v_1 были выше в 2.1–2.2 раза в опытах при 20°C (см. табл. 2). Развитие II стадии отмечено в экспериментах весной и осенью, а значения потребления O_2 на II стадии в целом выше, чем на I стадии.

Обнаружены повышенные значения скоростей БПК ω_s на L стадии (см. табл. 2). Весной из-за полного потребления O_2 на I стадии на развитие L стадии его не осталось. Наибольшие скорости потребления O_2 на L стадии отмечены в опытах с летней водой: при 20°C она была в 2.2 раза выше, чем при 10°C. Надо отметить, что в отличие от других озер, где максимальная скорость v_1 приходилась на летний период, в КР она наблюдалась весной, что, по-видимому, связано с особенностями продукционных процессов в данном водоеме.

Таким образом, в экспериментах с водой из КР при 10°C повышенное потребление O_2 отмечено на I стадии летом, а на L стадии — летом и осенью. При 20°C наибольшие значения потребления O_2 выявлены на I стадии весной и летом, на II стадии — весной и осенью, и на L стадии — летом и зимой (см. табл. 2). Высокие значения ω_s при 20°C были установлены в экспериментах при отсутствии II стадии. В опытах при 10°C развитие II стадии отмечено лишь весной, и оценить особенности развития БПК в другие сезоны нельзя.

Серия 2 — данные экспериментов с водой из озера Святозеро. В разные сезоны в воде из СВ при разных температурах выявлены небольшие визуальные отличия в развитии БПК в первые 10–15 сут. Такие особенности развития БПК предполагают высокую окислительную способность имеющихся в воде компонентов ОВ независимо от сезонной их изменчивости.

Зимой кинетику I стадии БПК при 20 и 10°C описывали близкие параметры уравнения А-типа, а значения параметров на II стадии при разных температурах отличались (табл. 2, рис. 4). Весной и осенью при разных температурах значения параметров I стадии БПК были близки, но оставались значительно ниже, чем летом во время цветения воды (см. табл. 2). Скорости потребления O_2 на L стадии при 20 и 10°C увеличивались от зимы к лету и затем постепенно снижались к осени.

В результате были выявлены следующие особые свойства окисления имеющихся в воде СВ компонентов ОВ. На I стадии БПК предельные значения потребления O_2 в зимней воде при 20 и 10°C фактически совпадали, а в вегетационный период при 20°C были почти одинаково пропорционально превышены в 1.6–1.8 раза в сравнении с та-

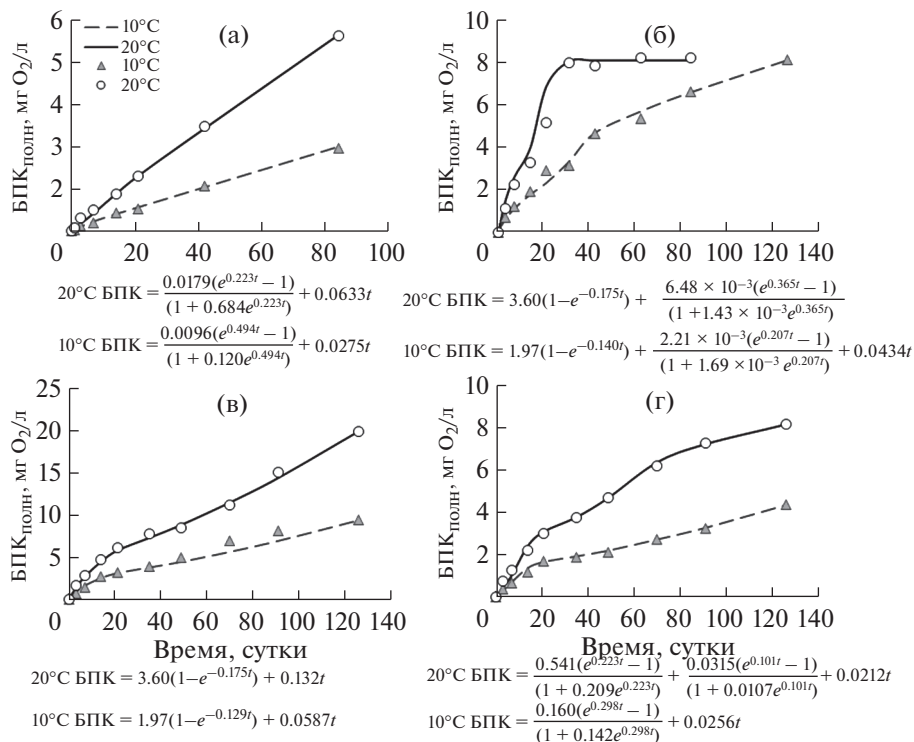


Рис. 3. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10°C с водой из оз. Крошнозеро в 2012 г.: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. Обозначения расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при разных температурах на рис. 3б–г и рис. 4–7 такие же, как на рис. 3а. Под рисунками 3–7 приведены уравнения БПК-кривых.

Fig. 3. BOD-curves in the experiments at 20 and 10°C with water from the lake Kroshnozero in 2012: а – winter, б – spring, в – summer, г – autumn. The designations of the BOD calculation curves and experimental data in Figs. 3б–г and Figs. 4–7 are the same as in Fig. 3а. Under the Fig. 3–7 are different BOD-curve equations.

ковыми при 10°C. По L стадии установлен один порядок скоростей ω_5 при 20 и 10°C весной и летом, и отличия в 3.5 и 2.2 раза зимой и осенью соответственно.

Интенсивное цветение воды в 2012 г., а также повышенное антропогенное воздействие на водоем, очевидно, нашли отражение не только в повышении концентраций БВ, показателей ОВ и ВВ, но и свойств окисляемых компонентов ОВ. Летом в воде СВ отмечено наибольшее общее потребление O_2 , которое существенно выше, чем в других озерах, при этом вклад I и II стадий суммарно составлял 90%. А скорость потребления O_2 на I стадии при 20°C была в 88 и 64 раза выше, чем весной и осенью соответственно.

Серия 3 – данные экспериментов с водой из озера Яндомозеро. Развитие I стадии БПК в зимней и весенней воде при 20 и 10°C отражалось параметрами уравнения А-типа, при этом для зимней воды значения этих параметров были ниже, чем для весенней (рис. 5). Летом при 20°C развитие I стадии БПК отражали параметры уравнения А-типа, а при 10°C – уравнения Е-типа, при этом значения всех параметров были значительно выше, чем в другие сезоны. Скорости БПК на L стадии ω_5 при 20°C в экспериментах с зимней, весенней и осенней водой были близки (в летней воде из-за отсутствия

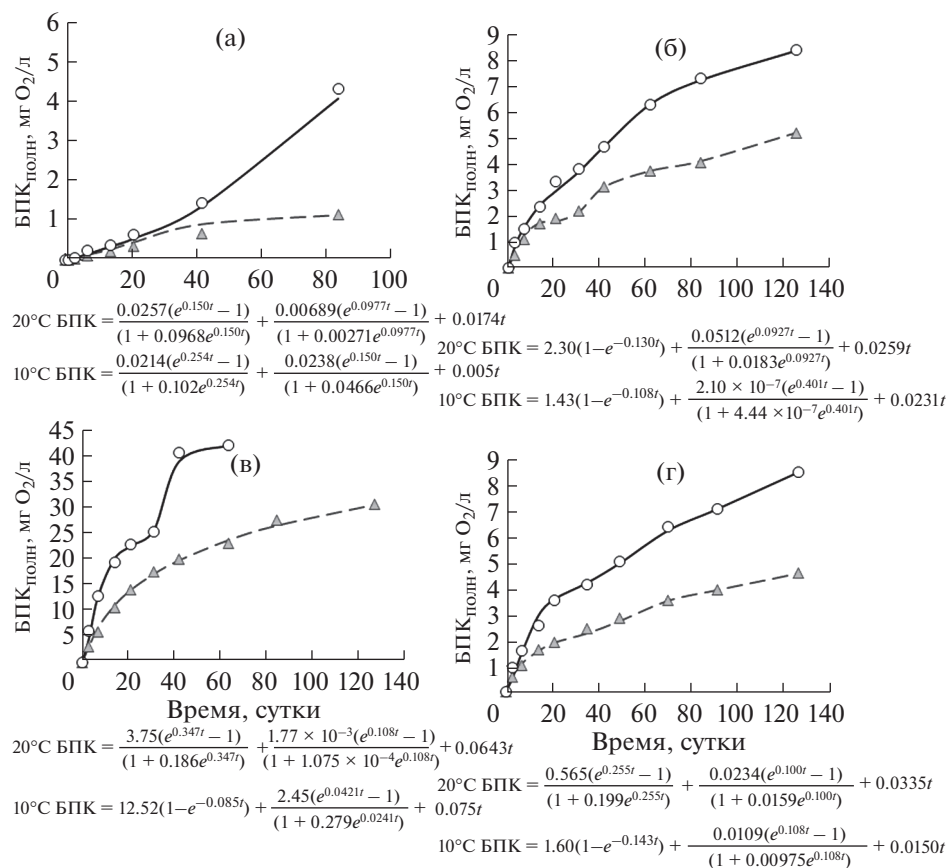


Рис. 4. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10°C с водой из оз. Святозеро в 2012 г.: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень.

Fig. 4. BOD-curves in the experiments at 20 and 10°C with water from the lake Svyatozero in 2012: а – winter, б – spring, в – summer; г – autumn.

O₂ стадия не выражена) и в среднем составляли 0.0314 мг O₂/(л · сут), а при 10°C – 0.0186 мг O₂/(л · сут) во все четыре сезона.

Таким образом, высокое потребление O₂ в воде из озера ЯН отмечено в летней воде при 10°C: на I, II и L стадиях оно составляло соответственно 21, 24 и 55% общего потребления O₂, а при 20°C – 53 и 47% на I и II стадиях соответственно (L стадии зафиксировано не было из-за полного расхода O₂ на других стадиях).

Серия 4 – данные экспериментов с водой из озера Верхнее. При 20°C в 2014 г. в весенней воде из озера ВР развитие I стадии БПК характеризовали уравнения Е-типа, а в летней и осенней воде – уравнения А-типа (рис. 6). Потребление O₂ на L стадии воде ВР отражали скорости, которые летом были выше, чем весной и осенью, в 2.1 и 1.7 раза соответственно. Надо отметить, что скорости ω₅ в воде ВР были наибольшими среди исследованных эвтрофных озер (см. табл. 2). Скорости БПК на L стадии ω₅ при 10°C в весенней, летней и осенней воде были соответственно в 3.3, 9.3 и 3.1 раза ниже скоростей потребления O₂ на L стадии при 20°C.

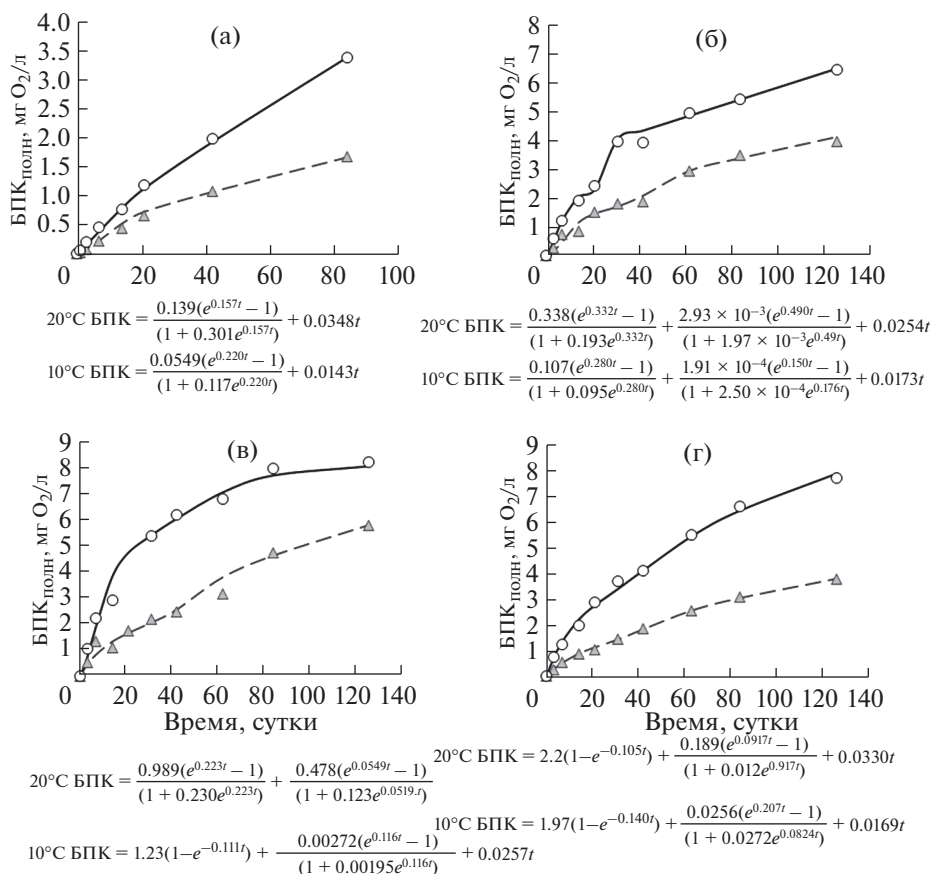


Рис. 5. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10°C с водой из озера Яндомозеро в 2012 г.: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень.

Fig. 5. BOD-curves in the experiments at 20 and 10°C with water from the lake Yandomozero in 2012: а – winter, б – spring, в – summer; г – autumn.

Таким образом, повышенное потребление O_2 на I стадии при 20°C отмечено в весенней и осенней воде, II стадия не зафиксирована, а на L стадии – в летней воде. При 10°C повышенное потребление O_2 на I и II стадиях отмечено летом, а на L стадии – осенью (см. табл. 2). В отличие от других исследованных водных объектов вклад L стадии в общее потребление O_2 оставался неизменно высоким в течение всех сезонов и в среднем составлял 82%, что связано с высоким содержанием в воде ГВ.

Серия 5 – данные экспериментов с водой из реки Шуя. Анализ данных экспериментов с водой из устья РШ в 2013 г. [12] показал, что общее потребление O_2 зимой и осенью составляло соответственно 8.18 и 7.01 мг $\text{O}_2/\text{л}$ (на I стадии – 16.2–21.4%, на II стадии – 35.0–37.0%, на L стадии – 48.8–41.6%), весной – 7.752 мг $\text{O}_2/\text{л}$ (на I и II стадиях – 43.9 и 56.1% соответственно, L стадия не выявлена), и летом – 7.97 мг $\text{O}_2/\text{л}$ (при 100% потреблении на I стадии). Выявлено резкое возрастание роли лабильной фракции в окислении ОВ в летний период, что связано с выраженной высокой трофностью вод р. Шуя.

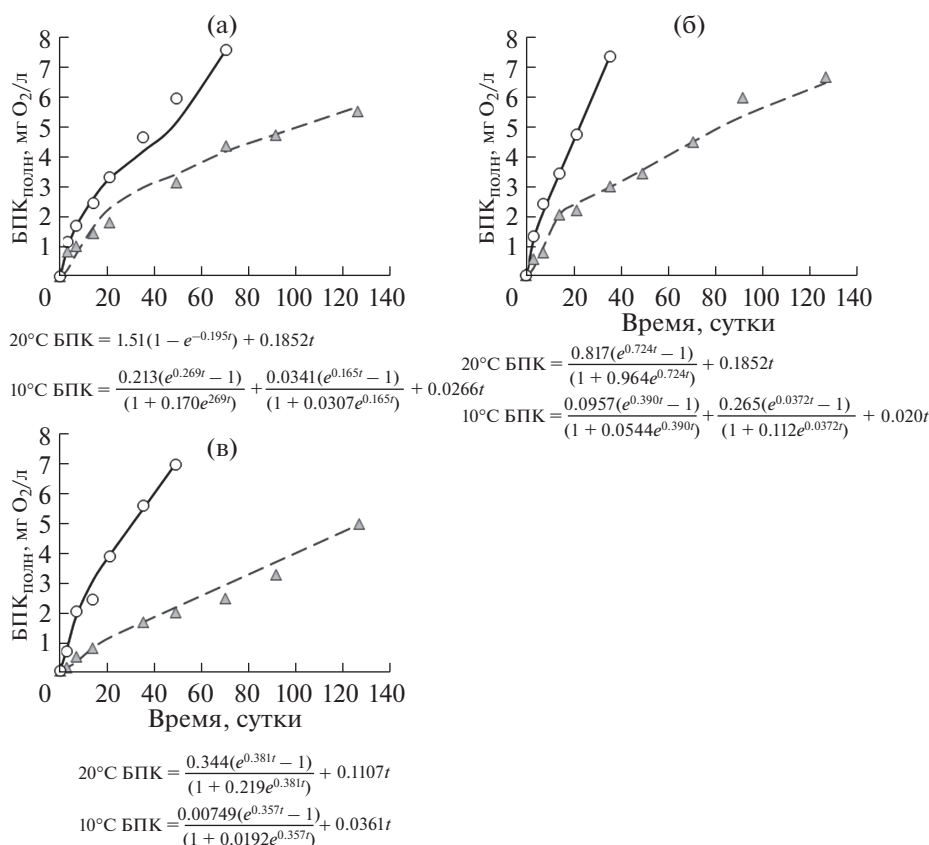


Рис. 6. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10°C с водой из оз. Верхнее в 2014 г.: а – весна, б – лето, в – осень.

Fig. 6. BOD-curves in the experiments at 20 and 10°C with water from the lake Verhnee in 2012: а – spring, б – summer; в – autumn.

В 2016 г. развитие БПК на L стадии при 20 и 10°C в зимней воде характеризовалось гораздо большими скоростями, чем в весенней, что связано с пониженным содержанием O_2 в исследуемой воде к концу эксперимента (рис. 7). В 2017 г. развитие L стадии БПК зимой отмечалось только при 10°C со скоростью $\omega_s = 0.0143$ мг O_2 /(л · сут). Весной при 20°C из-за полного расхода O_2 после 91 сут его потребление прекращалось. В тоже время при наличии в воде кислорода необъяснима остановка его потребления: при 20°C зимой после 50 сут и при 10°C весной после 90 сут (рис. 7). Отсутствие потребления O_2 при его наличии в воде отмечалось в опытах 2013 г. с водой из центрального плеса Онежского озера при 10 и 20°C в зимней воде и при 10°C в весенней (после 49–70 сут) [10]. Подобные случаи требуют тщательного изучения для выяснения причин остановки процесса потребления O_2 в исследуемых водах.

Сопоставление показателей ОВ и параметров кинетики БПК. Ранее проведенный анализ соответствия значений кинетических параметров в пробах воды из разных районов Онежского озера со значениями показателей ОВ выявил взаимосвязи параметров для I, II и L стадий процесса [11]. В текущем исследовании выделенные взаимо-

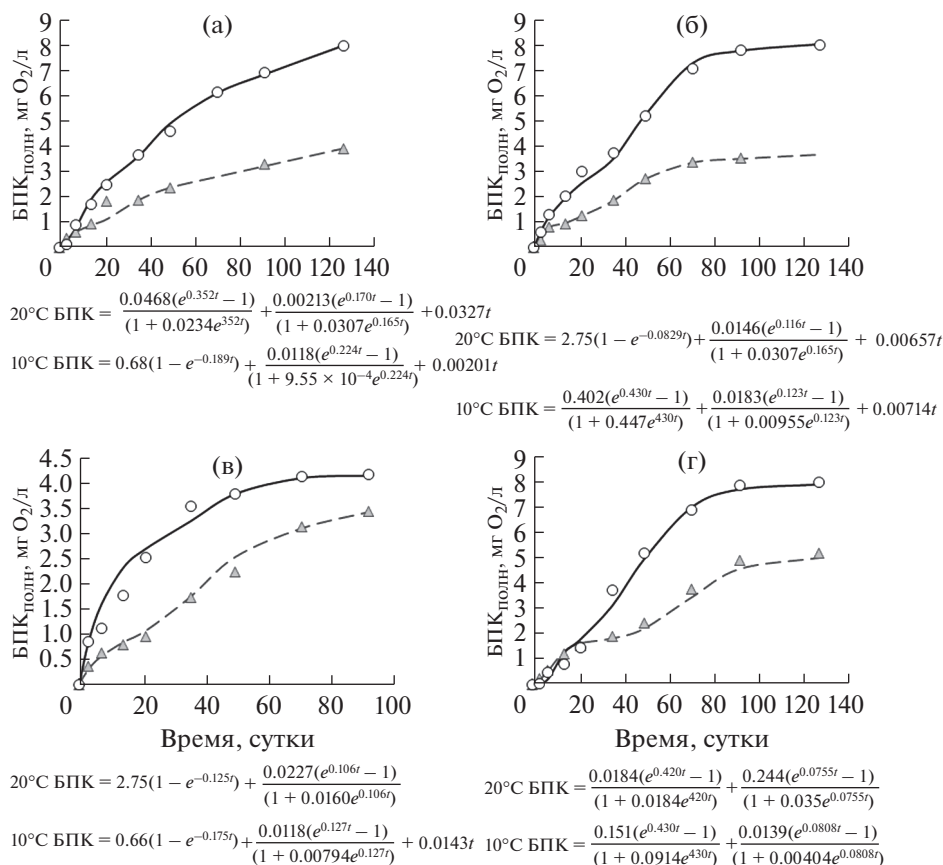


Рис. 7. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10°C с водой из р. Шуя в 2016 г. (а – зима, б – весна) и 2017 г. (в – зима, г – весна).

Fig. 7. BOD-curves in the experiments at 20 and 10°C with water from River Shuya in 2016: (a – winter, б – spring) and in 2017 (в – summer, г – autumn).

связи I–III для эвтрофных водных объектов отличались высокими значениями коэффициентов детерминации $R^2 = 0.81–1.00$ (рис. 8).

Так как вода из эвтрофных водоемов характеризовалась повышенным потреблением O_2 , то ряд экспериментов из-за полного его расходования на I и II стадиях заканчивался до завершения планируемых 126 сут (см. табл. 2). В таких случаях скорости потребления O_2 на L стадии, оцененные на промежуточных этапах развития БПК, пересчитывались на весь период эксперимента ($\omega_5 \times 126$) и далее использовались для сопоставления с показателем ОВ.

В целом каждую группу взаимосвязей I–III характеризовали изменяющиеся по сезонам исходные концентрации форм ОВ и условия их окисления за период экспериментов, отражаемые развитием нескольких стадий окисления. В нижнюю зону всех взаимосвязей попадали данные с наименьшими значениями показателей ОВ и БПК, однако диапазон отличий параметров БПК был ниже, чем показателей ОВ. Верхнюю и центральную зону взаимосвязей I формировали данные только летних сезонов СВ, КР и РШ (период наибольших значений БПК и активной трансформации форм ОВ в

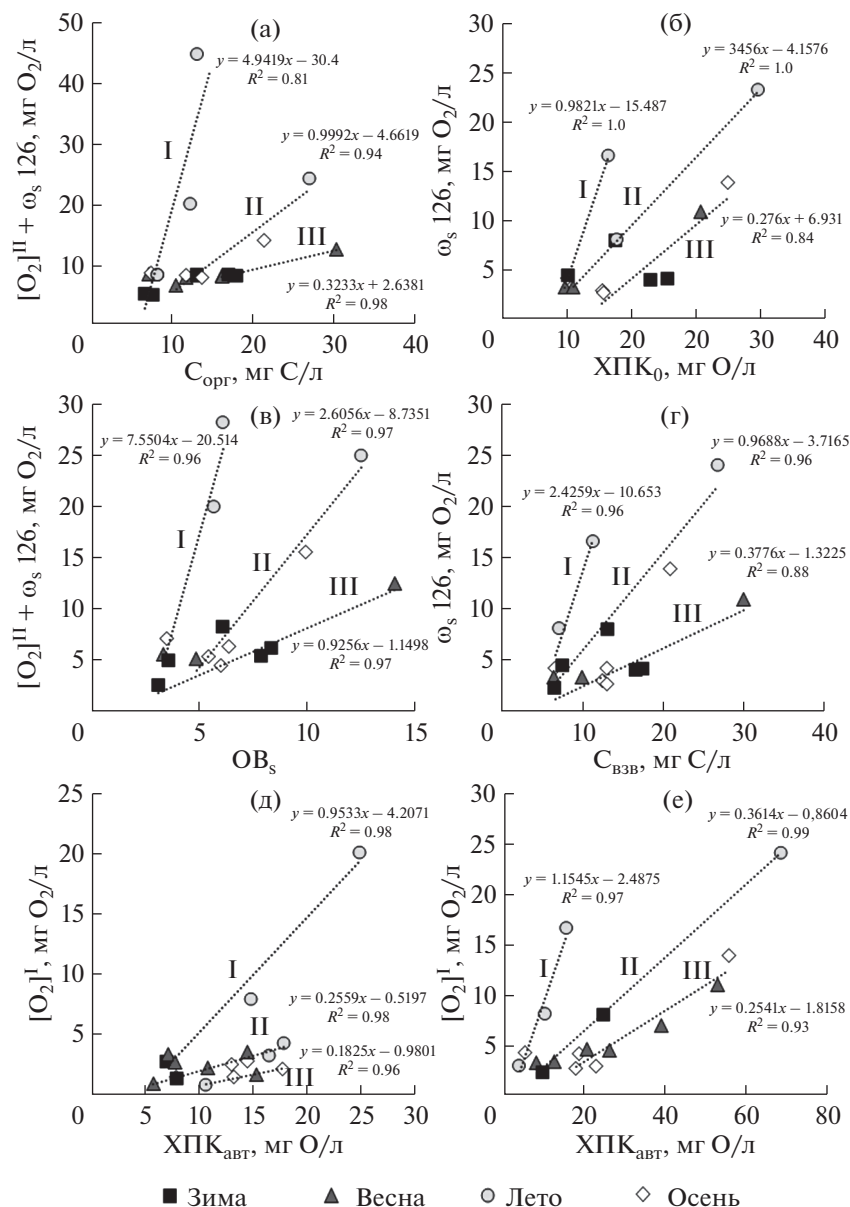


Рис. 8. Соответствие значений показателей OB и кинетических параметров БПК. Пояснения в тексте.

Fig. 8. Correspondence of organic matter concentrations and kinetic BOD parameters. Explanations in the text.

природных водах). Взаимосвязи II определяли данные весенних, летних и осенних сезонов в водоемах ВР, КР и ЯН (в целом при высоких значениях показателей БПК и OB). Взаимосвязи III формировали в основном данные весенних и зимних сезонов (ВР, РШ) и в меньшей степени — осенних сезонов ЯН (пониженные значения показателей БПК и сравнительно высокие показатели OB).

Существенно изменялись значения тангенсов углов наклона к горизонтальным осям кривых взаимосвязей I–III. Между показателями $C_{\text{орг}}$ и БПК_{126} они составили соответственно 4.942, 0.999 и 0.323; между ХПК и $\omega_S \times 126 - 0.982$, 0.346 и 0.276; между ОВ_S и $([\text{O}_2]^I + \omega_S \times 126) - 7.550$, 2.606 и 0.926; между $C_{\text{взв}}$ и $\omega_S \times 126 - 2.426$, 0.969, 0.378; между $\text{ХПК}_{\text{авт}}$ и $[\text{O}_2]^I - 0.953$, 0.256 и 0.183; и между $\text{ХПК}_{\text{алл}}$ и $\omega_S \times 126 - 1.154$, 0.361 и 0.254. О более активном окислении ОВ свидетельствуют высокие значения коэффициентов α (отношение показателя БПК к показателю ОВ) и тангенсы углов наклона взаимосвязей I в сравнении с меньшими их значениями во взаимосвязях II и III. В каждой паре показателей БПК и ОВ при переходе от взаимосвязи I ко II и далее к III, значения показателей БПК и α , как правило, снижались, а ОВ — возрастали. Максимальные значения коэффициента α характеризовали взаимосвязи I между интегральными показателями: БПК_{126} и $C_{\text{орг}}$ ($\alpha = 3.387$) и между общим потреблением O_2 на I-й и L стадиях и содержанием ОВ_S ($\alpha = 4.600$). Высокий угол наклона (2.426) взаимосвязи I между потреблением O_2 на L стадии и содержанием $C_{\text{стаб}}$ отражал условия окисления не только ГВ, но и $\text{ОВ}_{\text{взв}}$ в воде эвтрофных водоемов, особенно в летний период, что подчеркивает важную роль ВВ в кинетике БПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты совместных сезонных исследований содержания разных форм ОВ и их способности к окислению в длительных БПК-экспериментах с водой из разных эвтрофных водных объектов (озера Святозеро, Крошнозеро, Яндомозеро, Верхнее и устьевая зона р. Шуя). Воды всех водоемов испытывают разное антропогенное воздействие, а также имеют состав ОВ разного генезиса, что в итоге отражается на процессе его окисления в течение длительных БПК-экспериментов.

Полученные в исследовании материалы позволяют охарактеризовать по сезонам состояние имеющихся в воде разных форм ОВ , их трансформацию и способность к окислению. По окислению лабильных компонентов ОВ (соотношение $[\text{O}_2]^I/\text{ПО}$) водоемы располагаются в следующей последовательности: СВ $\rightarrow$ ЯН $\rightarrow$ РШ $\rightarrow$ КР $\rightarrow$ ВР по снижению этого соотношения (2.03, 0.58, 0.53, 0.15 и 0.02 соответственно) при отличиях в 100 раз между крайними водоемами в этом ряду. Выявлен ряд общих особенностей, характерных для всех эвтрофных водных объектов: наблюдается резкое увеличение потребления O_2 от зимы к лету; в зависимости от сезона изменяется вклад каждой стадии в $\text{БПК}_{\text{полн}}$ (зимой и осенью наибольший вклад оказывает L стадия, весной — II стадия, а летом — I стадия); скорость окисления ОВ на L стадии во все сезоны несколько раз ниже скорости на I стадии.

Разностороннюю оценку условий окисления компонентов ОВ можно получить по обобщенным данным соответствия разных показателей ОВ кинетическим параметрам БПК. По выбранным парам значений ОВ и БПК построены взаимосвязи I–III, которые отражают спектр сезонных особенностей изменения условий окисления разных ОВ по всем исследованным водоемам и сезонам как на основе общих показателей, так и показателей для отдельных стадий.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Кар НЦ РАН, а в ИО РАН им. П.П. Ширшова в рамках темы № 0128-2021-0016 “Взаимодействие биосфер в Мировом океане”. Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Кар НЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
2. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
3. Ефремова Т.А., Зобкова М.В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в Онежском озере // Тр. Кар. НЦ РАН. 2019. № 9. С. 60–75. <https://doi.org/10.17076/lim1017>
4. Ефремова Т.А., Сабылина А.В., Лозовик П.А. Углеводы и липиды в поверхностных водах Карелии // Вода: Химия и экология. 2014. № 1. С. 11–19.
5. Зобков М.Б., Зобкова М.В. Устройство для определения органического углерода в воде с фотохимическим персульфатным окислением в системе непрерывного газового потока и ИК-Фурье спектрометрическим детектированием // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 8. С. 10–15.
6. Зобкова М.В., Ефремова Т.А., Лозовик П.А., Сабылина А.В. Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 115–120.
7. Каталог озер и рек Карелии / Ред. Н.Н. Филатов, А.В. Литвиненко. Петрозаводск, 2001. 290 с.
8. Леонов А.В. Обобщение, типизация и кинетический анализ кривых потребления кислорода по данным БПК-опытов // Океанология. 1974. Т. 16, вып. 1. С. 82–87.
9. Леонов А.В., Зобкова М.В. Общая характеристика развития БПК в длительных экспериментах с водой из разнотипных водных объектов Карелии // Тр. Кар. НЦ РАН. 2019. № 3. С. 61–79. <https://doi.org/10.17076/lim952>
10. Леонов А.В., Зобкова М.В. Значения кинетических параметров БПК длительных экспериментов (на примере анализа данных с разными интегральными пробами воды из центральной части Онежского озера) // Тр. Кар. НЦ РАН. 2020. № 4. С. 40–61. <https://doi.org/10.17076/lim1164>
11. Леонов А.В., Зобкова М.В. Соответствие значений параметров долгосрочной кинетики БПК концентрациям компонентов органического вещества в воде из разных акваторий Онежского озера // Тр. Кар. НЦ РАН. 2020. № 9. С. 40–64. <https://doi.org/10.17076/lim1287>
12. Леонов А.В., Зобкова М.В. Применение длительных БПК-экспериментов для сезонных исследований окисления компонентов органического вещества в воде из разных районов Онежского озера // Тр. Кар. НЦ РАН. 2021. № 9. С. 37–57. <https://doi.org/10.17076/lim1369>
13. Леонов А.В., Лозовик П.А., Икко О.И. Использование экспериментальных данных по биохимическому потреблению кислорода для корректной оценки состояния водных объектов и качества природных вод // Тр. Кар. НЦ РАН. 2018. № 3. С. 11–30. <https://doi.org/10.17076/lim726>
14. Лозовик П.А., Куликова Т.П., Мартынова Н.Н. Мониторинг водных объектов Карелии в 1992–2000 гг. // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: ИВПС Кар. НЦ РАН, 2003. С. 135–144.
15. Лозовик П.А., Мусатова М.В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.
16. Лозовик П.А., Мусатова М.В., Рыжаков А.В. Автохтонное и аллохтонное органическое вещества в разнотипных озерах Карелии // Вода, химия и экология. 2014. № 4. С. 11–17.
17. Лозовик П.А., Рыжаков А.В., Сабылина А.В. Внутриводоемные процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28.
18. Озера Карелии. Справочник. / Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
19. Скопинцев Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17 (29). 290 с.
20. Creed I.F., Bergström A.K., Trick C.G., Grimm N.B., Hessen D.O., Karlsson J., Kidd K.A., Kritzberg E., McKnight D.M., Freeman E.C., Senar O.E., Andersson A., Ask J., Berggren M., Cherif M., Giesler R., Hotchkiss E.R., Kortelainen P., Palta M.M., Vrede T. & Weyhenmeyer G.A. Global change – driven effects on dissolved organic matter composition: Implications for food webs of northern lakes // Global change biology. 2018. V. 24. № 8. pp. 3692–3714. <https://doi.org/10.1111/gcb.14129>
21. Ittekkot V. Variations of dissolved organic matter during a plankton bloom: qualitative aspects based on sugar and amino acids analyses // Mar. Chem. 1982. V. 11. pp. 143–158. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(82\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(82)90038-X)

Characterization of the Kinetic Processes of Organic Matter Transformation in Eutrophic Lakes of Karelia**A. V. Leonov^{1, *}, and M. V. Zobkova^{2, **}**¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*²*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia***E-mail: leonov@ocean.ru****E-mail: rincalika21@yandex.ru*

A long-term study of the BOD (biochemical oxygen demand) development in water from five eutrophic water bodies of Karelia (lakes Kroshnozero, Svyatozero, Yandomozero, Verkhnee, and the Shuya River) was carried out. For various seasons 2012–2017, 48 experiments were conducted at 20 and 10°C with samples taken from the surface horizon. The kinetic parameters of BOD were obtained, which quite fully reflect the changes in oxygen consumption by stages (I, II, and L) at the experiments. As a result of data analysis, several common features typical to all studied eutrophic water bodies were identified. Firstly, an intensive increase in oxygen consumption was found out from winter to summer at 20 and 10°C (mean 3.0 and 4.7 times respectively). Secondly, depending on the season, the contribution of each stage to BOD_{total} varied: in winter and autumn, the maximal contribution was from the L stage at 20°C (53%), in spring – the II stage (45%), and in summer – the I stage (43%). This difference occurs due to the conditions of labile organic matter production in different seasons of the year. Thirdly, the rate of organic matter oxidation at the L stage characterized by slow humic substances oxidation was several times lower in all seasons than the rate at the I stage, where the labile components of organic matter are rapidly oxidized. Only in summer, the rate at the L stage was slightly increased because of intensive oxidation of suspended organic matter which is produced in large quantities during this period. The obtained correlations between different indicators of organic matter and the kinetic BOD parameters in water from eutrophic lakes characterize the difference of seasonal features of changes in organic matter oxidation conditions and have high values of the determination coefficients ($R^2 = 0.81–1.00$).

Keywords: biochemical oxygen demand, rate constant, rate of oxygen consumption, organic matter, water quality, eutrophic water bodies

REFERENCES

1. Bul'on V.V. Pervichnaya produkcija planktona vnutrennih vodoemov. L.: Nauka, 1983. 150 s.
2. Dacenko Yu.S. E'vtrofirovaniye vodohranilishh. Gidrologo-gidrohimiicheskie aspekty. M.: GEOS, 2007. 252 s.
3. Efremova T.A., Zobkova M.V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshhestva v Onezhskom ozere // Tr. Kar. NCz RAN. 2019. № 9. С. 60–75. <https://doi.org/10.17076/lim1017>
4. Efremova T.A., Sabylina A.V., Lozovik P.A. Uglevody i lipidy v poverhnostnykh vodah Karelii // Voda: himiya i ekologiya. 2014. № 1. S. 11–19.
5. Zobkov M.B., Zobkova M.V. Ustrojstvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotohimicheskim persul'fatnym okisleniem v sisteme nepreryvnogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskimi detektirovaniem // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2015. № 8. S. 10–15.
6. Zobkova M.V., Efremova T.A., Lozovik P.A., Sabylina A.V. Organicheskoe veshhestvo i ego komponenty v poverhnostnykh vodah gumidnoy zony // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2015. № 12. S. 115–120.
7. Katalog ozer i rek Karelii / Red. N.N. Filatov, A.V. Litvinenko. Petrozavodsk, 2001. 290 s.
8. Leonov A.V. Obobshchenie, tipizaciya i kineticheskij analiz krivykh potrebleniya kisloroda po dannym BPK-opytov // Okeanologiya. 1974. T. 16, vyp. 1. S. 82–87.
9. Leonov A.V., Zobkova M.V. Obshchaya harakteristika razvitiya BPK v dlitel'nykh eksperimentah s vodoy iz raznotipnykh vodnykh ob'ektov Karelii // Tr. Kar. NCz RAN. 2019. № 3. S. 61–79. <https://doi.org/10.17076/lim952>

10. Leonov A.V., Zobkova M.V. Znacheniya kineticheskikh parametrov BPK dlitel'nykh eksperimentov (na primere analiza dannykh s razny'mi integral'nymi probami vody iz central'noy chasti Onezhskogo ozera) // Tr. Kar. NCz RAN. 2020. № 4. S. 40–61. <https://doi.org/10.17076/lim1164>
11. Leonov A.V., Zobkova M.V. Sootvetstvie znachenij parametrov dolgosrochnoy kinetiki BPK koncentraciyam komponentov organicheskogo veshhestva v vode iz raznykh akvatorij Onezhskogo ozera // Tr. Kar. NCz RAN. 2020. № 9. S. 40–64. <https://doi.org/10.17076/lim1287>
12. Leonov A.V., Zobkova M.V. Primenenie dlitel'nykh BPK-eksperimentov dlya sezonnykh issledovaniy okisleniya komponentov organicheskogo veshhestva v vode iz raznykh rajonov Onezhskogo ozera // Tr. Kar. NCz RAN. 2021. № 9. S. 37–57. doi: 10.17076/lim1369
13. Leonov A.V., Lozovik P.A., Ikko O.I. Ispol'zovanie eksperimental'nykh dannykh po biokhimicheskomu potrebleniyu kisloroda dlya korrektnoy ocenki sostoyaniya vodnykh ob'ektov i kachestva prirodnkh vod // Tr. Kar. NCz RAN. 2018. № 3. S. 11–30. <https://doi.org/10.17076/lim726>
14. Lozovik P.A., Kulikova T.P., Martynova N.N. Monitoring vodnykh ob'ektov Karelii v 1992–2000 gg. // Gidroekologicheskie problemy Karelii i ispol'zovanie vodnykh resursov. Petrozavodsk: IVPS Kar. NCz RAN, 2003. S. 135–144.
15. Lozovik P.A., Musatova M.V. Metodika razdeleniya organicheskogo veshhestva prirodnkh vod adsorbciy na dietilaminoetilcelluloze na avtohtonnyy i allohtonnyy sostavlyayushhie // Vestnik MGOU. Ser. Estestvenny'e nauki. 2013. № 3. S. 63–68.
16. Lozovik P.A., Musatova M.V., Ryzhakov A.V. Avtohtonnoe i allohtonnoe organicheskoe veshhestva v raznotipnykh ozerakh Karelii // Voda, himiya i ekologiya. 2014. № 4. S. 11–17.
17. Lozovik P.A., Ryzhakov A.V., Sabylina A.V. Vnutrivodoemnye processy transformacii, krugovorota i obrazovaniya veshhestv v prirodnkh vodah // Tr. KarNCz RAN. 2011. № 4. S. 21–28.
18. Oзера Karelii. Spravochnik. / Pod red. N.N. Filatova, V.I. Kuhareva. Petrozavodsk: KarNCz RAN, 2013. 464 s.
19. Skopincev B.A. Organicheskoe veshhestvo v prirodnkh vodah (vodnyj gumus) // Tr. GOIN. 1950. Vy'p. 17 (29). 290 s.
20. Creed I.F., Bergström A.K., Trick C.G., Grimm N.B., Hessen D.O., Karlsson J., Kidd K.A., Kritzberg E., McKnight D.M., Freeman E.C., Senar O.E., Andersson A., Ask J., Berggren M., Cherif M., Giesler R., Hotchkiss E.R., Kortelainen P., Palta M.M., Vrede T. & Weyhenmeyer, G.A. Global change-driven effects on dissolved organic matter composition: Implications for food webs of northern lakes // Global change biology. 2018. V. 24. № 8. pp. 3692–3714. <https://doi.org/10.1111/gcb.14129>
21. Ittekkot V. Variations of dissolved organic matter during a plankton bloom: qualitative aspects based on sugar and amino acids analyses // Mar. Chem.. 1982. V. 11. pp. 143–158. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(82\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(82)90038-X)