

УДК 556.114.7: 546.21: 543.632. 14

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МЕЗОТРОФНЫХ ВОДОЕМАХ КАРЕЛИИ

© 2025 г. **А. В. Леонов^{а,*}**, **М. В. Зобкова^{б,**}**

^аИнститут океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

^бИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр Российской академии наук”, г. Петрозаводск

*E-mail: leonov@ocean.ru

**E-mail: rincalika21@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

После доработки 26.02.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

В 2012–2013 гг. проведены исследования кинетики биохимического потребления кислорода (БПК) и состава органического вещества (ОВ) на пяти мезотрофных озерах Карелии: Салонъярви, Вегарусъярви, Валгомозеро, Сямозеро и Шотозеро. Эксперименты по БПК продолжительностью до 126 суток (при 20 и 10°C) выполняли во все сезоны года. В результате были получены уравнения и значения кинетических параметров БПК, характеризующих сезонные изменения потребления O_2 на окисление ОВ в две-три стадии (I-я, II-я и L-линейная). В результате анализа данных был выявлен ряд общих особенностей, характерных для всех исследованных мезотрофных водных объектов. Во все сезоны скорость окисления ОВ на L-стадии была значительно ниже, чем на I-й. Вклад каждой стадии в общее потребление кислорода был неравномерным: наибольший — (более 50%) во все сезоны, кроме летнего (33%), оказывала L-стадия, меньший — I-я и II-я стадии. Летом из-за активного продуцирования легкоокисляемого ОВ суммарное потребление O_2 на I-й и II-й стадиях достигало 67% от БПК_{полн}, что было сопоставимо с эвтрофными водоемами. Скорость окисления ОВ на I-й стадии увеличивалась от зимы к лету в 4.0 раза и затем постепенно снижалась к осени, а на L-стадии была во все сезоны в несколько раз ниже, чем на I-й. Полученные взаимосвязи между разными показателями ОВ и кинетическими параметрами БПК в воде из мезотрофных озер отражают спектр сезонных особенностей изменения условий окисления ОВ. Отмечено снижение окисления лабильных компонентов ОВ в ряду озер: Валгомозеро → Сямозеро → Шотозеро → Салонъярви и Вегарусъярви, что подтверждается связью с содержанием автохтонного ОВ.

Ключевые слова: биохимическое потребление кислорода, скорость потребления кислорода, автохтонное и аллохтонное органическое вещество, качество воды, озера гумидной зоны

DOI: 10.31857/S0869607125010076, EDN: LIAYCI

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) природных вод является неотъемлемой частью глобального цикла углерода. В зависимости от источника происхождения ОВ принято подразделять на две крупные группы: автохтонное ОВ, образующееся в самом

водоеме, представленное легкоокисляемыми соединениями (углеводы, липиды, белки и др.), и аллохтонное, поступающее с водосборной территории и состоящее из трудноокисляемых высокоокрашенных гумусовых веществ. Качественный и количественный состав ОВ, а также процессы его новообразования, трансформации и деструкции в водных объектах зависят от многих факторов, включая гидрологические, гидрохимические, климатические особенности, характер водосборной территории и т.д. В составе органического вещества большинства водных объектов Карелии преобладает аллохтонное ОВ, а в его составе — гумусовые вещества [7]. Повышенное содержание автохтонного ОВ отмечается только в озерах с замедленным водообменом, а также в некоторых эвтрофных водоемах [18].

Биогенные элементы вносят существенный вклад в процессы новообразования растворенного и взвешенного автохтонного ОВ в озерах [3; 25]. В поверхностных водах Карелии фосфор является основным лимитирующим биогенным элементом. В незагрязненных водных объектах содержание минерального Р ($P_{\text{мин}}$) незначительно [15], а основной вклад в общий фосфор ($P_{\text{общ}}$) вносит его органическая форма в составе как автохтонного, так и аллохтонного ОВ [7]. Также для озер Карелии отмечено характерное увеличение концентрации $P_{\text{общ}}$ от зимы к лету при небольших сезонных колебаниях концентраций $P_{\text{мин}}$ [20].

Эксперименты по кинетике биохимического потребления кислорода (БПК) могут дать полезную информацию о закономерностях окисления ОВ в природных водах. Однако в ранее опубликованных исследованиях БПК-тесты проводились в течение 20–60 суток или даже меньше, что позволяло оценить только общие параметры трансформации ОВ, характеризующие в основном окисление только лабильных компонентов ОВ [22–24]. В то же время длительные эксперименты по кинетике БПК (126 суток), осуществляемые на разнотипных водных объектах Карелии с 2012 г., позволили провести более детальное изучение этого процесса: выделить и охарактеризовать особенности различных типов развития БПК, подобрать оптимальный подход к их анализу [10] и охарактеризовать трансформацию ОВ различного генезиса [11–14]. В результате были выделены три стадии окисления ОВ: первая (I-я) протекает в первые несколько суток эксперимента и связана с окислением в первую очередь углеводов, вторая (II-я) — белков и липидов, L-стадия — самая продолжительная, на которой окисляются гумусовые вещества [13]. С помощью разработанного подхода были исследованы кинетические параметры трансформации ОВ в эвтрофных водоемах Карелии [14]. В результате было установлено, что суммарный вклад I-й и II-й стадий в общее потребление кислорода в период открытой воды составлял более 50%, что связано с активным продуцированием лабильного ОВ в эти сезоны года. Также исследования показали, что скорость окисления ОВ на L-стадии, на которой происходит медленное окисление гумусовых веществ, во все сезоны в несколько раз ниже скорости на I-й стадии, где быстро окисляются лабильные компоненты ОВ [14]. Это является весьма закономерным, поскольку константа скорости трансформации аллохтонного ОВ в 10 раз меньше, чем автохтонного [7].

Поэтому в продолжение исследования кинетических параметров окисления ОВ в разнотипных водных объектах гумидной зоны на текущем этапе предстояло провести оценку особенностей процессов трансформации ОВ в мезотрофных водоемах, а также сравнить их с ранее полученными результатами для эвтрофных озер. Для этого предстояло установить значения кинетических параметров БПК в воде с учетом основных факторов среды (температурные условия, разные сезоны, состав ком-

понентов ОВ); охарактеризовать отличия окисления различных компонентов ОВ на отдельных стадиях развития БПК (I-я, II-я и L-стадия); выявить взаимосвязи между кинетическими параметрами БПК и показателями компонентов ОВ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования в 2012–2013 гг. проводили на пяти мезотрофных озерах Вегарусъярви, Салонъярви, Валгомозеро, Сямозеро, Шотозеро, отличающихся по морфометрическим и гидрологическим характеристикам (табл. 1). Все водные объекты, кроме Валгомозеро, расположены на водосборе реки Шуи: Вегарусъярви и Салонъярви — в верхнем течении, а Сямозеро и Шотозеро — в среднем. Озеро Валгомозеро находится в северной части Заонежского п-ва (рис. 1).

Таблица 1. Морфометрические и некоторые гидрологические характеристики озер [19]

Table 1. Morphometric and some hydrological characteristics of lakes [19]

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Площадь водосбора, км ²	Средняя глубина, м	Объем водных масс, км ³	Удельный водосбор ($\Delta F_{уд}$)	Условный водообмен (τ), лет
Сямозеро	266.0	1550	6.7	1.790	5.8	3.13
Шотозеро	74.0	5540	3.1	0.228	74.9	0.13
Салонъярви	46.1	1640	2.6	0.120	35.6	0.23
Вегарусъярви	13.8	171	4.4	0.56	12.4	0.96
Валгомозеро	3.4	10.4	8.8	0.030	3.1	6.27

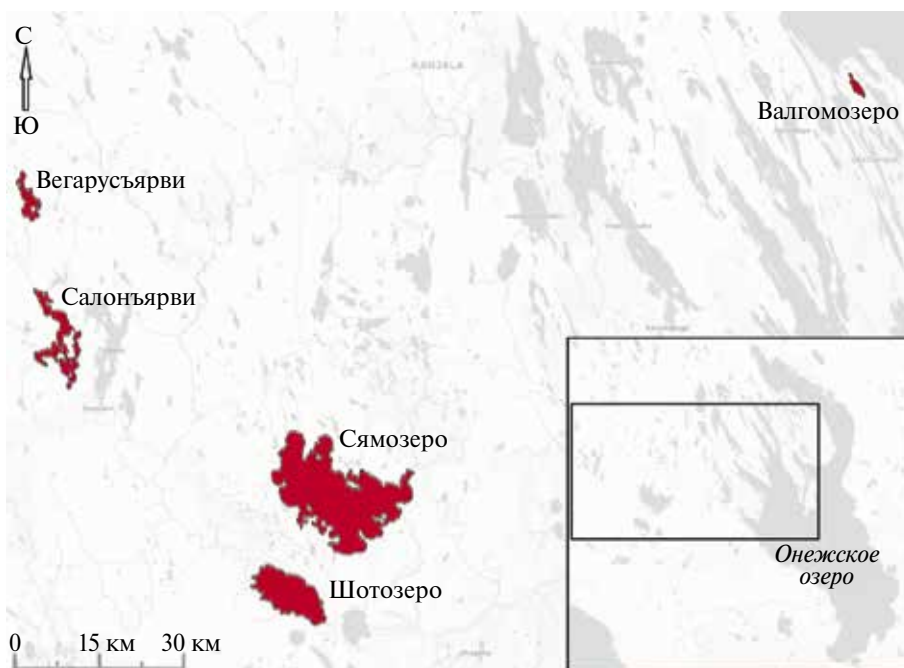


Рис. 1. Карта-схема расположения водных объектов.

Fig 1. Map of the location of water bodies.

Для БПК-экспериментов и анализа содержания разных форм ОВ пробы воды в водоемах отбирались во все сезоны года. При этом в 2012 г. отбор проб осуществлялся в истоках озер Валгомозеро, Вегарусъярви и Салонъярви. В 2013 г. в центре озер Сямозеро и Шотозеро отбирались интегральные пробы, сформированные из воды с трех слоев (поверхность, середина, дно). Это позволило в дальнейшем дать осредненную оценку кинетических особенностей окисления ОВ всего озера.

Всего при исследовании мезотрофных водоемов было выполнено 40 длительных (126 суток) БПК-тестов при 20 и 10°C. Методика постановки и проведения длительных БПК-экспериментов подробно описана в работе [11, 12]. Полученные БПК-кривые с двумя-тремя стадиями окисления ОВ (I-я, II-я, L-стадия) описывались кинетическими уравнениями разного типа [9], подробное описание которых приведено в работе [10]. С помощью данных уравнений оценивались значения параметров БПК: k и w_1 — константы скорости на I-й и II-й стадиях соответственно, сут⁻¹ и л мг⁻¹ сут⁻¹; v_L , ω_S — скорости на I-й и L-стадиях соответственно, мг О₂/(л сут); $[O_2]^I$, $[O_2]^{II}$ — предельные значения БПК на I-й и II-й стадиях соответственно, мг О₂/л; $\omega_S \cdot 126$ — общее потребление О₂ на линейной L стадии, мг О₂/л; БПК_{полн} — БПК полное (суммарное потребление О₂ по выделенным стадиям), мг О₂/л.

Перед началом эксперимента в пробах воды оценивалось содержание органического углерода ($C_{орг}$) согласно методике [6]. Значения химического потребления кислорода (ХПК) и перманганатной окисляемости (ПО), являющихся косвенными показателями содержания ОВ, а также концентрации общего фосфора и взвешенных веществ (ВВ) определяли по стандартизированным методикам [1]. Определение общего автохтонного (ОВ_{авт}) и аллохтонного ОВ (ОВ_{алл}) проводилось сорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе [16]. Содержание взвешенного ОВ (ОВ_{взв}) оценивали по разнице ХПК в исходной и фильтрованной воде. Значения ряда параметров ОВ оценивались по эмпирическим уравнениям: содержание лабильного С ($C_{лаб} = 0.3 \times [O_2]^I$); условно “стойкого” С ($C_{стаб} = C_{орг} - C_{лаб}$), $C_{орг}$ в зависимости от общего содержания ОВ (ОВ_Σ) [2]; содержание $C_{орг}$ при отсутствии прямого аналитического определения — $C_{орг} = 0.375 \text{ХПК}$ [21]. Статистическую обработку данных осуществляли 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 воде исследованных водных объектов

Значения показателей ОВ, оцененных аналитически и по эмпирическим уравнениям, а также $P_{общ}$ имели некоторые отличия в воде мезотрофных водоемов (табл. 2). Содержание фосфора общего было схожим во всех исследованных озерах, а его сезонная динамика характеризовалась увеличением концентрации от зимы к лету. Содержание ВВ в мезотрофных озерах было ниже, чем в эвтрофных [14]. Максимальные значения были отмечены в оз. Шотозеро, что, по-видимому, связано с тем, что через озеро протекает р. Шуя, с водами которой может поступить большое количество ВВ. Их содержание возрастает в период открытой воды, что связано с активным протеканием продукционных процессов и подтверждается статистически значимой связью между ВВ и $C_{лаб}$ (тест Пирсона: $9.376 \text{e}-3 < 0.01$; $R = -0.541$; $df = 20$).

В связи с тем, что водосбор реки Шуи заболочен примерно на 20% [4], и особенно ее верхнее течение, озера Вегарусъярви, Салонъярви и Шотозеро, расположенные на ее водосборе, являются высокогумусными, только Сямозеро относится к мезогумусным водоемам. Озеро Валгомозеро классифицируется как олигогумус-

Таблица 2. Химические показатели ОВ воды в 2012–2013 гг.**Table 2.** Chemical parameters of organic matter in 2012–2013

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							
СЛ, 2012, З	16	2.2	19.2*	27.7	51.2	7.7	43.5	0	0.24	19.0	8.93
СЛ, 2012, В	19	8.7	13.9*	23.1	37.0	7.8	29.2	0.8	0.47	13.4	6.46
СЛ, 2012, Л	32	2.0	15.6*	19.0	41.5	10.1	31.4	6.1	0.83	14.8	7.26
СЛ, 2012, О	18	0.8	23.6*	33.7	62.9	6.7	56.2	0	0.24	23.4	11.0
Среднее	21	3.4	18.1*	25.9	48.2	7.9	40.1	3.5	0.44	17.7	8.41
ВГ, 2012, З	13	1.2	17.0*	17.2	45.3	7.4	37.9	11.9	0.11	16.9	7.91
ВГ, 2012, В	15	2.0	13.0*	20.6	34.7	4.7	30.0	1.2	0.54	12.5	6.05
ВГ, 2012, Л	18	1.2	14.5*	16.0	38.7	8.9	29.8	2.0	0.36	14.1	6.74
ВГ, 2012, О	14	1.3	15.1*	21.8	40.2	8.6	31.6	0	0.30	14.8	7.02
Среднее	15	1.4	14.9*	18.9	39.7	7.4	32.3	5.0	0.33	14.6	6.93
ВЛ, 2012, З	13	1.2	5.5*	4.8	14.6	7.0	7.6	2.4	0.19	5.3	2.56
ВЛ, 2012, В	25	0.9	8.1*	7.8	21.6	9.0	12.6	1.4	0.77	7.3	3.77
ВЛ, 2012, Л	16	0.9	9.5*	9.6	25.2	17.8	7.4	5.4	0.74	8.8	4.42
ВЛ, 2012, О	29	1.8	7.6*	8.4	20.3	14.0	6.3	2.0	0.89	6.7	3.53
Среднее	21	1.2	7.7*	7.7	20.4	12.0	8.5	2.8	0.65	7.0	3.57
СМ, 2013, З	12	0.2	9.5	10.4	25.2	9.0	16.2	1.1	0.21	9.3	4.42
СМ, 2013, В	28	4.4	7.7	10.3	22.8	10.8	12.0	0.4	0.27	7.4	3.58
СМ, 2013, Л	33	6.6	9.9	10.4	22.6	10.6	12.0	2.2	0.51	9.4	4.61
СМ, 2013, О	22	2.3	8.3	10.3	23.6	10.0	13.6	1.8	0.38	7.9	3.86
Среднее	24	3,4	8.9	9.8	23.6	10.1	13.5	1.4	0.34	8.5	4.12
ШТ, 2013, З	20	0.3	21.2	8.8	63.3	8.2	55.1	1.1	0.60	20.6	9.86
ШТ, 2013, В	20	4.0	15.7	9.8	40.1	9.3	30.8	2.5	0.68	15.0	7.30
ШТ, 2013, Л	36	8.8	14.1	29.1	35.5	10.6	24.9	1.5	0.91	13.2	6.56
ШТ, 2013, О	33	6.6	14.4	21.9	33.6	9.5	24.1	0.5	0.35	14.1	6.70
Среднее	27	4.9	16.4	23.0	43.1	9.4	33.7	1.4	0.63	15.7	7.61

Примечание: * — расчет С_{орг} по эмпирической формуле; здесь и в таблице 3 указаны сезоны и озера: З, В, Л, О — зима, весна, лето, осень соответственно, СЛ, ВГ, ВЛ, СМ, ШТ — Салонъярви, Вегарусъярви, Валгомозеро, Сямозеро, Шотозеро; прочерк — отсутствие данных.

ное [19]. Поэтому для исследованных водоемов выявлена разница в содержании ОВ. В озерах Вегарусъярви, Салонъярви и Шотозеро отмечались высокие значения ХПК, ПО, С_{орг}, а также высокое содержание аллохтонного ОВ (табл. 2). Поскольку

оз. Валгомозеро классифицируется как олигогумусное [19], в нем были установлены минимальные значения этих показателей, но максимальное содержание автохтонного ОВ. Сезонная динамика содержания автохтонного и аллохтонного ОВ выражена довольно слабо, можно лишь отметить незначительное снижение $ОВ_{алл}$ в летний период и увеличение $ОВ_{авт}$ в период открытой воды.

Особенности кинетики БПК в воде из мезотрофных водных объектов

Выявление характерных особенностей развития БПК в длительных экспериментах, включая анализ типов БПК-кривых, а также наличие или отсутствие II-й и L-стадий процесса в воде озер отражает сложный состав ОВ разных водоемов и его сезонную динамику. В воде из мезотрофных озер выявлены отличия по количеству стадий процесса потребления кислорода: при 20°C развитие БПК в две и три стадии отмечено в 40 и 60% случаев, а при 10°C — в 65 и 35% случаев соответственно. В 20 экспериментах при 20°C II-я и L-стадии были зафиксированы по 16 раз каждая, а при 10°C II-я стадия — только 8 раз (табл. 3). Отсутствие II-й или L-стадий потребления кислорода отмечалось в различных озерах в разные сезоны года и было связано с полным расходом O_2 на предыдущих стадиях.

В результате обработки данных БПК-кривых с выраженными двумя-тремя стадиями потребления O_2 (рис. 2–6), полученными в ходе проведения длительных экспериментов с пробами воды из мезотрофных озер Карелии, были рассчитаны значения отдельных кинетических параметров (табл. 3). Отличительной особенностью этой серии экспериментов были близкие значения потребления O_2 при 20 и 10°C в первые семь суток экспонирования проб воды, что выявлено при разных режимах отбора проб воды.

Серия 1. Данные экспериментов с водой из оз. Салонъярви

Кинетику I-й стадии БПК в экспериментах с зимней и весенней водой при 20°C и с весенней при 10°C описывали параметры уравнения Е-типа (рис. 2). При этом значения констант скорости БПК, k , были одного порядка (в среднем 0.112 сут^{-1}), а значения параметров $[O_2]'$ и v_1 весной при 20°C — выше параметров, оцененных зимой, в 1.9 и 2.1 раза соответственно (табл. 3). Летом и осенью развитие I-й стадии БПК описывали параметры уравнения А-типа, при этом были выявлены сравнительно близкие значения w_1 . Летом также отмечались максимальные значения $[O_2]'$ — $2.75 \text{ мг } O_2/\text{л}$ и v_1 — 0.5330 сут^{-1} , что вполне закономерно и указывает на активное протекание продукционных процессов в этот период.

Развитие II-й стадии БПК при 20°C в летней и осенней воде описывали значения сильно отличающихся параметров (w_2 — 0.081 и $0.226 \text{ л мг}^{-1} \text{ сут}^{-1}$, $[O_2]''$ — 5.17 и $0.42 \text{ мг } O_2/\text{л}$), что свидетельствует о разных режимах окисления компонентов ОВ. При 10°C кинетика II-й стадии БПК в осенней воде отражена значениями параметров (w_2 — $0.100 \text{ л мг}^{-1} \text{ сут}^{-1}$, $[O_2]''$ — $0.25 \text{ мг } O_2/\text{л}$), которые в целом ниже полученных при 20°C.

Минимальная скорость ω_s на L-стадии БПК при 20 и 10°C отмечалась зимой, а весной и осенью они были близки и составляли в среднем при 20°C — 0.0763 , а при 10°C — $0.262 \text{ мг } O_2/(\text{л сут})$ соответственно. В летней воде скорость ω_s при 20°C не была определена из-за полного расхода O_2 на I-й и II-й стадиях. Таким образом, в указанные периоды скорости ω_s при 20°C были выше в 2.2–3.1 раза в сравнении с оцененными скоростями при 10°C.

Серия 2. Данные экспериментов с водой из оз. Вегарусъярви

Кинетику БПК при 10 и 20°C в различные сезоны отражали уравнения Е- и А-типа (рис. 3). Весной и летом значения $[O_2]'$ на I-й стадии потребления кислорода были

Таблица 3. Значения кинетических параметров БПК при разных температурах 20°C — числитель и 10°C — знаменатель**Table 3.** The values of kinetic parameters estimated at different temperatures: the numerator is the 20°C and the denominator is the 10°C

Озеро, год, сезон	Тип БПК	Кинетические БПК-параметры								
		I-я стадия (по E- или A-типу)			Линейная стадия		II-я стадия		БПК _{подн}	
		[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	
СЛ, 2012, 3	EL	0.81	0.106	0.0862	0.0551	4.628*	-	-	5.441	5.44
	AL	0.24	0.417	0.0032	0.0248	2.083*	-	-	2.323	2.32
СЛ, 2012, В	EL	1.58	0.115	0.1820	0.0754	6.334*	-	-	7.912	7.91
	EL	0.95	0.115	0.1090	0.0273	3.440	-	-	4.39	4.40
СЛ, 2012, Л	AA	2.75	0.234	0.5330	-	-	5.17	0.081	7.920	7.92
	AL	0.82	0.445	0.0014	0.0313	3.944	-	-	4.764	4.76
СЛ, 2012, О	AAL	0.79	0.282	0.0117	0.0772	6.485*	0.42	0.226	7.695	7.70
	AAL	0.11	0.332	0.0005	0.0250	3.150	0.25	0.100	3.510	3.51
ВГ, 2012, 3	EL	0.37	0.194	0.0724	0.0221	1.856*	-	-	2.229	2.23
	AL	0.06	1.117	0.0002	0.0089	0.747*	-	-	0.807	0.81
ВГ, 2012, В	AAL	1.80	0.259	0.1530	0.0363	4.574	1.69	0.137	8.062	8.06
	EL	0.67	0.143	0.0958	0.0251	3.163	-	-	3.833	3.82
ВГ, 2012, Л	AAL	1.21	0.336	0.0626	0.0477	6.010	0.51	0.608	7.730	7.73
	AL	0.23	0.294	0.0013	0.0248	3.125	-	-	3.355	3.35
ВГ, 2012, О	AAL	1.01	0.235	0.0264	0.0448	5.645	0.65	0.225	7.305	7.30
	EL	0.28	0.111	0.0311	0.0196	2.470	-	-	2.750	2.75
ВЛ, 2012, 3	AL	0.65	0.378	0.0129	0.0276	2.318*	-	-	2.969	2.94
	AAL	0.38	0.584	0.0008	0.0129	1.084*	0.21	0.217	1.671	1.67
ВЛ, 2012, В	AAL	2.90	0.286	0.3320	0.0302	3.805	0.89	0.190	7.595	7.58
	AAL	0.87	0.398	0.0841	0.0219	2.759	0.90	0.311	4.533	4.54
ВЛ, 2012, Л	EAL	2.47	0.134	0.3310	0.0311	3.919	1.05	0.112	7.439	7.45
	EAL	0.80	0.134	0.1070	0.0174	2.192	1.04	0.074	4.032	4.03
ВЛ, 2012, О	AAL	2.97	0.308	0.2850	0.0252	3.175	1.00	0.145	7.148	7.15
	EAL	0.70	0.120	0.0840	0.0148	1.865	2.07	0.065	4.635	4.64
СМ, 2013, 3	EAL	0.69	0.115	0.0794	0.0293	3.692	0.38	0.198	4.762	4.77
	EAL	0.35	0.120	0.0420	0.0157	1.978	0.29	0.368	2.619	2.62
СМ, 2013, В	AAL	0.90	0.443	0.0155	0.0421	5.305	0.66	0.258	6.864	6.84
	AAL	0.33	0.492	0.0082	0.0159	2.003	0.81	0.198	3.143	3.14
СМ, 2013, Л	EAL	1.70	0.120	0.2040	0.0164	2.066	1.91	0.047	5.678	5.68
	AAL	0.47	0.321	0.0284	0.0199	2.507	0.80	0.311	3.777	3.78
СМ, 2013, О	AAL	1.25	0.375	0.0722	0.0352	4.435	0.81	0.191	6.495	6.50
	AL	0.72	0.533	0.0109	0.0200	2.520	-	-	3.240	3.24
ШТ, 2013, 3	EA	2.00	0.092	0.1844	-	-	5.58	0.066	7.570	7.58
	EL	0.13	0.148	0.0192	0.0342	4.309	-	-	4.439	4.44
ШТ, 2013, В	EA	2.25	0.088	0.1970	-	-	5.65	0.055	7.902	7.90
	AL	0.22	0.333	0.0015	0.0301	3.793	-	-	4.013	4.02
ШТ, 2013, Л	AA	3.03	0.278	0.5900	-	-	5.07	0.079	8.100	8.12
	AL	0.96	0.186	0.0505	0.0330	4.158	-	-	5.118	5.14
ШТ, 2013, О	AAL	1.30	0.325	0.2450	0.0452	5.695	0.95	0.168	7.943	7.95
	AL	0.56	0.367	0.0484	0.0244	3.074	-	-	3.638	3.62

Примечание: * — период 84 сут; типы БПК-кривых — экспоненциально-автокаталитический (EA), полиавтокаталитический (AA), экспоненциально-линейный (EL), автокаталитически-линейный (AL), экспоненциально-автокаталитически-линейный (EAL) и полиавтокаталитически-линейный (AAL); прочерк — отсутствие данных [9].

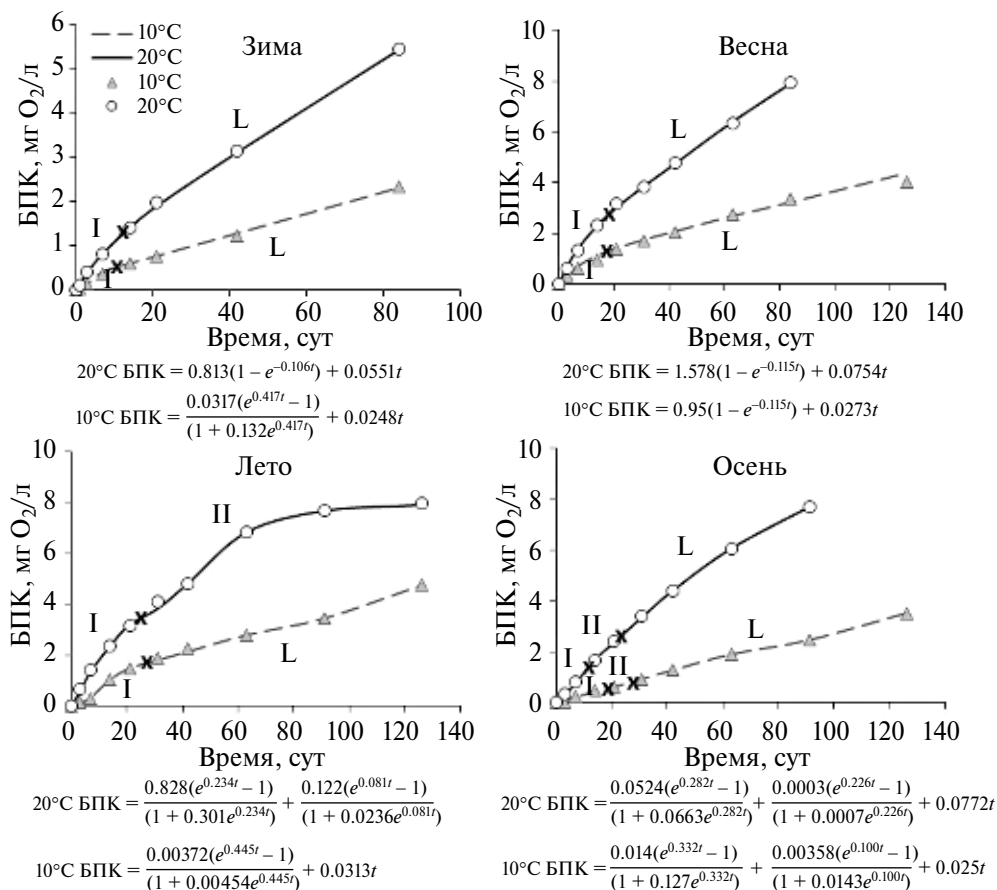


Рис. 2. Развитие БПК в экспериментах с водой из оз. Салонъярви в 2012 г. Обозначение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 20 и 10°C 2б–г и рис. 3–6 такое же, как на рис. 2а. На рис. 2–6 черными крестиками обозначены границы стадий окисления ОВ (I, II, L). Под рис. 2–6 приведены уравнения БПК-кривых.

Fig. 2. BOD-curves in the experiments with water from lake Salonyarvi in 2012. The designation of the BOD calculation curves and experimental data at 20 and 10°C in fragments 2б–г and Fig. 3–6 is the same as in fragment 2а. Black crosses in Fig. 2–6 — boundary of first, second and L stages (I, II, L) of organic matter oxidation. Under the Fig. 2–6 — different BOD-curve equations.

выше, чем зимой и осенью, что, по-видимому, связано с различным составом ОВ в эти сезоны. Значения параметров БПК отражали отличия свойств окисляющихся компонентов ОВ в весенней воде, в то же время с летней и осенней водой отличия были не столь значимы (значения параметров I-й стадии БПК достаточно близки). При температурах 20 и 10°C наибольшие значения параметров БПК отмечены весной (табл. 3).

Кинетика I-й стадии БПК при 10°C была отражена в зимней и летней воде отличающимися значениями параметров (табл. 3), которые свидетельствуют о существенных различиях состава ОВ в эти сезоны. Это особенно проявляется зимой, так как окисление ОВ выражено существенно слабее, чем летом. При переходе от зимы к весне происходит смена типа уравнений в описании кинетики I-й стадии БПК

(табл. 3). Это может быть связано с тем, что существенная доля образованного весной (и частично летом) лабильного ОВ окислялась в весенне-летний период. Поэтому эксперимент при 20°C с осенней водой начинался с существенно меньшего запаса лабильного ОВ, хотя при этом БПК-кривая описывалась тем же типом уравнения, что и летом. А вот при 10°C при переходе от лета к осени тип уравнения менялся (от А- к Е-типу).

Тенденция развития БПК при 10°C может быть иной: темпы окисления ОВ при меньшей температуре, как правило, существенно ниже, что приводит к сохранению осенью определенного запаса компонентов ОВ, который при переходе от лета к осени обнаружит свое присутствие переходом от уравнения А- к Е-типу или более активным расходом O_2 на окисление ОВ. Именно поэтому независимо от описания кинетики БПК разными функциями скорости развития I-й стадии БПК осенью при 20 и 10°C сопоставимы (v_1 — 0.0264 и 0.0311 мг O_2 /(л сут) соответственно).

Развитие II-й стадии БПК при 20°C отражено параметрами уравнения А-типа. Летом и осенью хорошо видна близость значений параметров $[O_2]''$, что свидетельствует о схожих свойствах, окисляющихся компонентов ОВ. Примечательны значения скорости ω_s на L-стадии, оцененные в разные сезоны при 20 и 10°C: они понижены зимой (0.0221 и 0.00889 мг O_2 /(л сут) соответственно) и повышены в другие сезоны при небольшой их флуктуации (в среднем 0.0429 и 0.0232 мг O_2 /(л сут) соответственно).

Таким образом эксперименты с водой из оз. Вегарусъярви показали, что значения параметров БПК зимой в целом понижены, а весной повышены в сравнении с другими сезонами. Выявлены разные отношения скоростей v_1 при 20 и 10°C в весенней, летней и осенней воде (соответственно 1.6, 48 и 0.9 раза).

Серия 3. Данные экспериментов с водой из оз. Валгомозеро

Развитие БПК зимой и весной (при 20 и 10°C) и осенью (при 20°C) отражено уравнениями AL- и AAL-типа, а летом (при 20 и 10°C) и осенью (при 10°C) — EAL-типа (рис. 4, табл. 3). В сравнении с зимним экспериментом в весеннем развитии I-й стадии БПК протекало более активно: при 20 и 10°C значение $[O_2]'$ было выше соответственно в 4.5 и 2.3 раза, а v_1 — выше в 26 и 100 раз. Стоит отметить, что летом при равных константах скорости k , значения $[O_2]'$ и v_1 при 20°C в 3.1 раза выше, чем при 10°C. Осенью при 20°C получено итоговое превышение значений $[O_2]'$ и v_1 в 4.2 и 3.4 раза соответственно по сравнению с 10°C.

Развитие II-й стадии БПК фиксировалось зимой при 10°C, а весной при 20 и 10°C. Таким образом, потребление O_2 на II-й стадии в весенней воде при 10°C было выше в 4.3 раза в сравнении с зимней. В то же время весной и летом при 20 и 10°C различий практически не было, значение $[O_2]''$ в среднем составляло 0.90 и 1.05 мг O_2 /л, а осенью при 10°C оно было в 2.1 раза выше, чем при 20°C. Скорости ω_s на L-стадии при 20°C в зимней воде были в 2.1 раза выше скорости при 10°C, в другие сезоны это превышение было одного порядка (в 1.4–1.8 раза), что предполагает окисление на L-стадии в весенней, летней и осенней воде близких по составу и концентрациям компонентов ОВ.

Серия 4. Данные экспериментов с водой из оз. Сямозеро

Развитие БПК при 20 и 10°C отражается зимой уравнениями EAL-типа, а весной — AAL-типа. Кинетика БПК при 20°C летом и осенью описывалась уравнениями EAL- и AAL-типа, а при 10°C — AAL- и AL-типа соответственно (рис. 5, табл. 3). Одинаковые типы кривых, описывающие кинетику БПК при разных температурах, дают возможность количественно оценить развитие окислительных процессов зимой

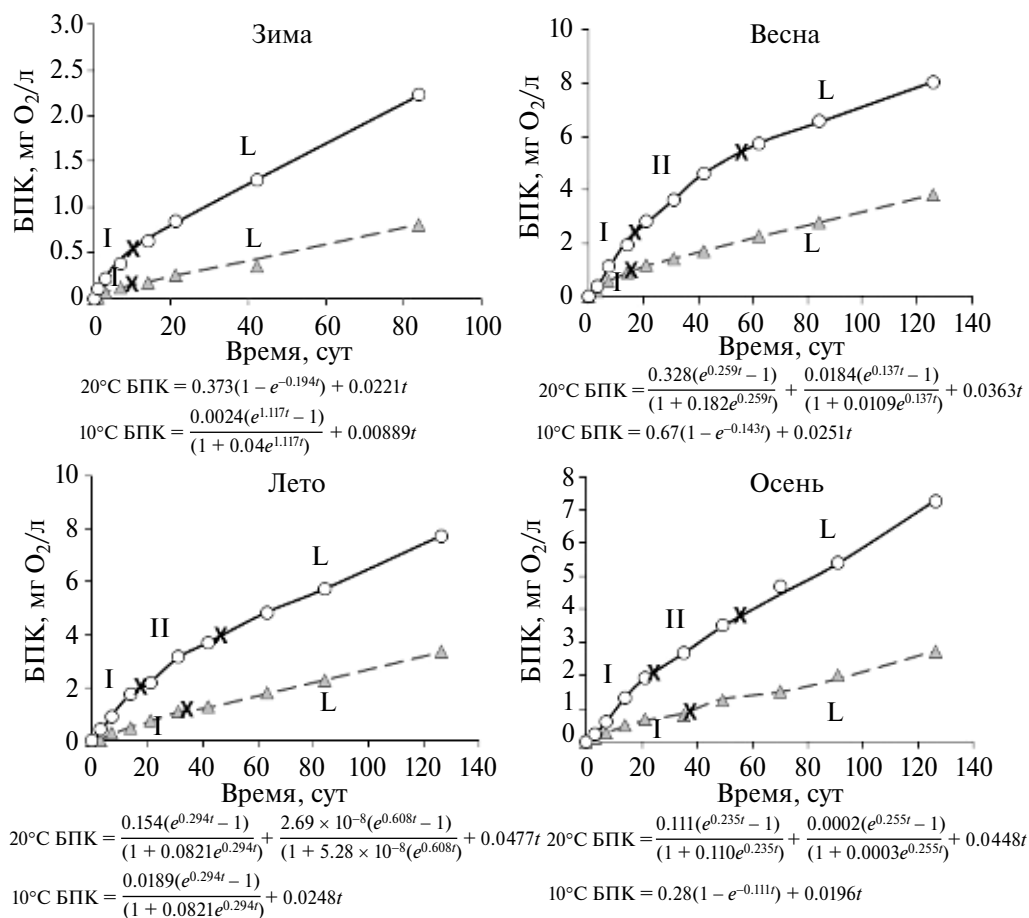


Рис. 3. Развитие БПК в экспериментах с водой из оз. Вегарусъярви в 2012 г.

Fig. 3. BOD-curves in the experiments with water from lake Vegarusyarvi in 2012.

и весной. Близкие значения БПК в начальные сроки экспериментов при 20 и 10°C подтверждают также близкие значения k (табл. 3). Однако значения параметров $[O_2]'$ и v_1 при 20°C были выше соответственно в 2.0 и 1.9 раза, что означает в целом более активное потребление O_2 при 20°C, чем при 10°C. Анализ этих результатов позволяет предположить, что в летней воде присутствует лабильное ОВ, на окисление которого при 20°C на I-й стадии расходуется 1.70 мг O_2 /л, а при 10°C — 0.47 мг O_2 /л (или меньше в 3.6 раза).

Стоит отметить, что на II-й стадии БПК только значения параметров $[O_2]''$ имели небольшие отличия при 20 и 10°C, что характеризует примерно одинаковые концентрации окисляющихся компонентов ОВ зимой. В то же время значения других параметров БПК показывают, что скоростные характеристики процессов окисления ОВ при 20°C выше, чем при 10°C. Развитие II-й стадии весной воспроизводилось близкими значениями параметров (табл. 3), что позволяет предположить, что в этот сезон происходило активное окисление компонентов ОВ на I-й, и на II-й стадиях. Летом было отмечено примерно равное потребление O_2 при 20°C на I-й и II-й стадии-

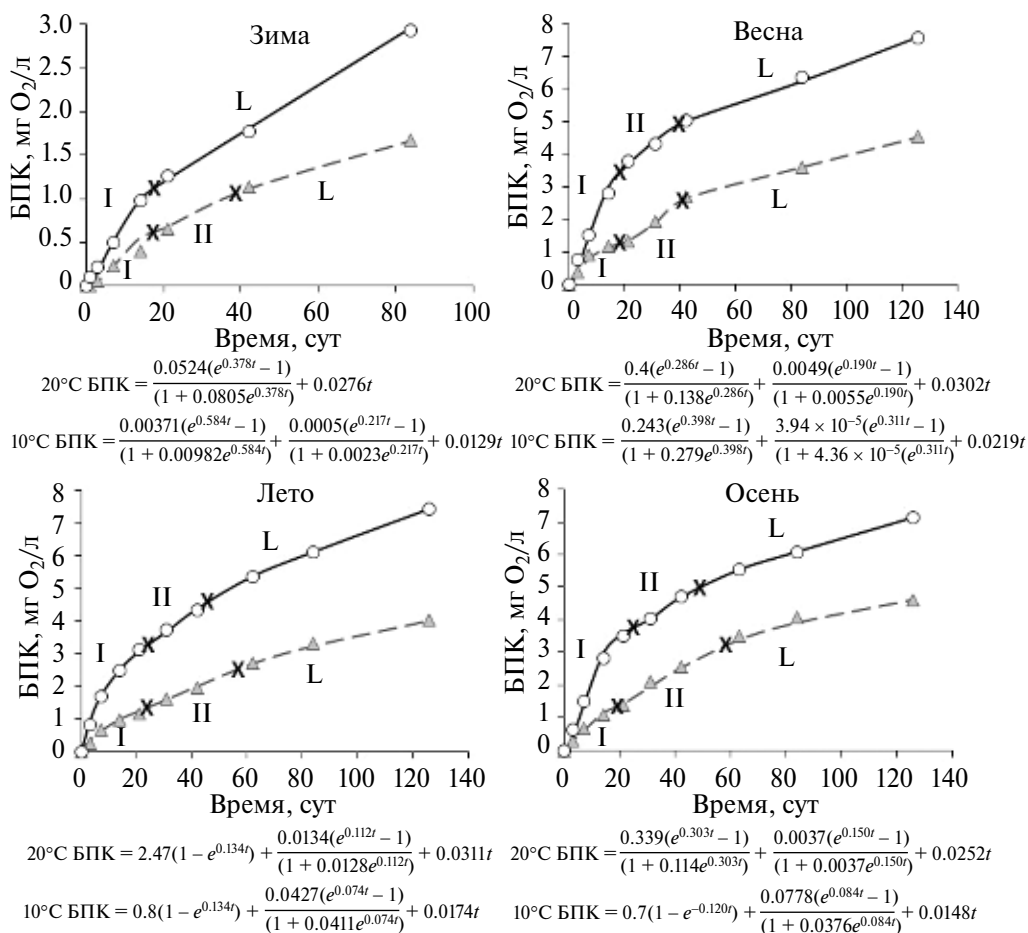


Рис. 4. Развитие БПК в экспериментах с водой из оз. Валгомозеро в 2012 г.

Fig. 4. BOD-curves in the experiments with water from lake Valgomozero in 2012.

ях (соответственно 1.70 и 1.912 мг $\text{O}_2/\text{л}$) и более интенсивное при 10°C на II-й стадии (0.80 мг $\text{O}_2/\text{л}$) в сравнении с потреблением на I-й стадии (0.47 мг $\text{O}_2/\text{л}$). При 20°C скорости ω_s на L-стадии были выше зимой, весной и осенью соответственно в 1.5, 2.7 и 1.8 раза в сравнении с значениями при 10°C (табл. 3). Развитие БПК при 20°C летом выделялось повышенным потреблением O_2 на I-й и II-й стадиях (соответственно 1.70 и 1.912 мг $\text{O}_2/\text{л}$) и пониженной скоростью на L-стадии (0.0164 мг $\text{O}_2/(\text{л} \text{ сут})$).

Серия 5. Данные экспериментов с водой из оз. Шотозеро

Кинетику БПК при 10 и 20°C в различные сезоны отражали уравнения Е- и А-типа (рис. 6, табл. 3). Развитие I-й стадии БПК при 20°C зимой и весной описывали близкие значения параметров, в то же время летом значения параметров $[\text{O}_2]^I$ и v_1 были выше, чем осенью, что также отмечалось и при 10°C . Во всех экспериментах при 20°C обнаруживалось развитие II-й стадии процесса, при этом зимой, весной и летом кинетику БПК характеризовали близкие значения w_2 и $[\text{O}_2]^{II}$, и только для эксперимента с осенней водой значения коэффициентов отличалось.

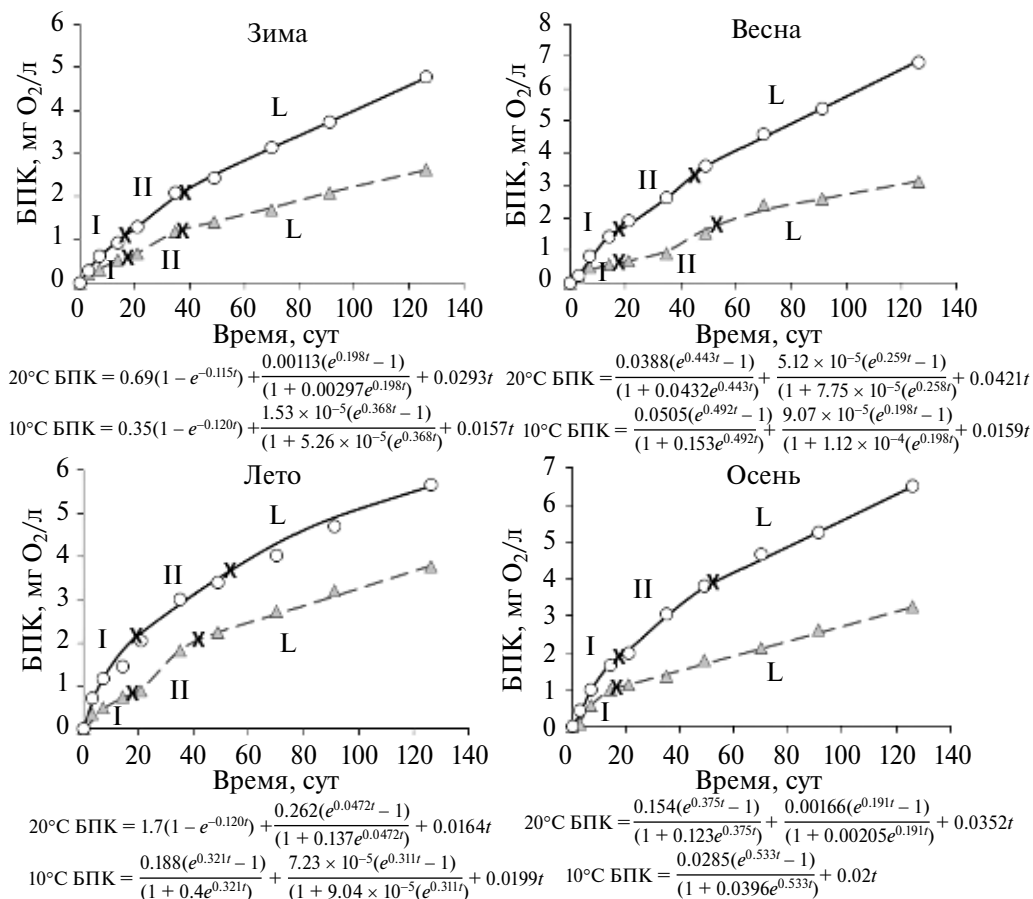


Рис. 5. Развитие BPK в экспериментах с водой из оз. Сямозеро в 2012 г.

Fig. 5. BOD-curves in the experiments with water from lake Syamozero in 2012.

Скорость ω_s на L-стадии при 20°C не фиксировалась во все сезоны, кроме осеннего, по причине полного расходования растворенного O_2 на первых двух стадиях. При 10°C повышенные близкие значения ω_s установлены зимой, весной и летом (табл. 3), а осенью оно было ниже (0.0244 мг O_2 /(л сут)). В воде из оз. Шотозеро соотношение скоростей ω_s на L-стадии при разных температурах можно было оценить только в осенней воде: значение ω_s при 20°C в 1.9 раза выше скорости при 10°C.

Таким образом, проведенный анализ выявил сезонные отличия значений кинетических параметров BPK, связанных, очевидно, с разным поступлением в водоемы компонентов ОВ и последующей их трансформацией в сохраняемых в экспериментах пробах воды при разных температурах.

Общие особенности кинетических параметров для мезотрофных озер

Обработка данных по кинетике BPK показала ряд общих особенностей, характерных для всех исследованных мезотрофных озер Карелии. Так, в период открытой воды при 20°C общее потребление кислорода варьировало в пределах 5.68–8.10 мг O_2 /л (табл. 3), что было ниже, чем в эвтрофных водных объектах, исследованных

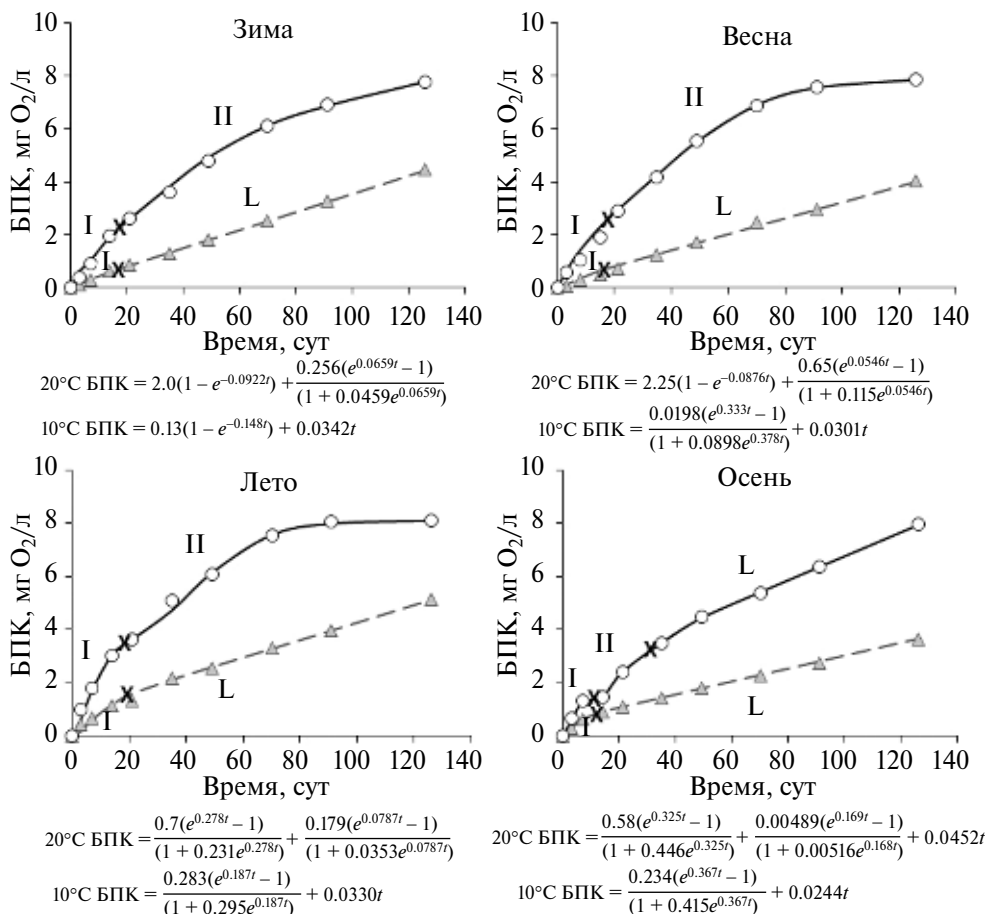


Рис. 6. Развитие BPK в экспериментах с водой из оз. Шотозеро в 2012 г.

Fig. 6. BOD-curves in the experiments with water from lake Shotozero in 2012.

ранее [14, 24], но несколько выше, чем в других мезотрофных озерах, Ладожском [22] и Мястро [23]. Последнее связано с более длительным проведением экспериментов (126 суток) по сравнению с ранее опубликованными работами (20–60 суток).

В исследованных мезотрофных озерах вклад каждой стадии в общее потребление кислорода в различные сезоны был неравномерным. Минимальное общее потребление кислорода отмечалось зимой, в остальные сезоны оно было выше и изменялось в небольших пределах (рис. 7). Наибольший вклад (более 50%) во все сезоны, кроме летнего, оказывала L-стадия, что особенно заметно зимой и связано с отсутствием продуцирования ОВ в данный период. Летом потребление кислорода на L-стадии снижалось в среднем до 33%, что связано с активным продуцированием легко-окисляемого ОВ в этот период. Вклад I-й и II-й стадий в BPK_{полн} мезотрофных озер при 20°C был ниже, чем в эвтрофных [14], только летом суммарное потребление O₂ на этих стадиях достигало 67% от BPK_{полн}, что было сопоставимо с ними.

Скорость окисления ОВ в мезотрофных озерах на L-стадии была во все сезоны в несколько раз ниже, чем на I-й (рис. 7), при этом v_1 была в несколько раз ниже,

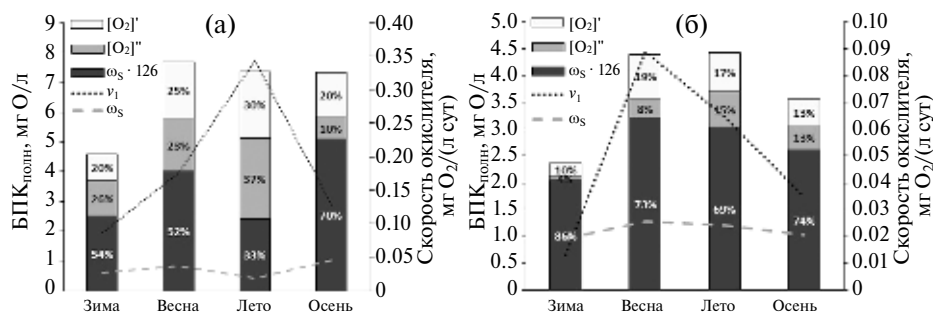


Рис. 7. Вклад каждой стадии (I-й, II-й и L) в общем потреблении кислорода, а также скорость окисления ОВ на I-й и L-стадиях в различные сезоны при 20°C (а) и 10°C (б).

Fig. 7. Contribution of each stage (I, II, and L) to total oxygen consumption and the rate of organic matter oxidation at I and L stages in different season at 20°C (a) and 10°C (b).

чем в эвтрофных водных объектах [14]. Скорость окисления ОВ на I-й стадии увеличивалась от зимы к лету в 4.0 раза и затем постепенно снижалась к осени. В то же время в экспериментах при 10°C во все сезоны превалировала L-стадия, а на остальные приходилось меньше 30% от БПК_{полн}. Таким образом, закономерности вклада каждой стадии в общее потребление O_2 , а также скорости окисления ОВ на разных стадиях характеризуют особенности состава ОВ и его трансформации в разные сезоны года в мезотрофных озерах.

Соответствие показателей ОВ кинетическим параметрам БПК

Соответствие показателей ОВ и БПК было оценено для разных стадий потребления O_2 по значениям $C_{орг}$ и БПК₁₂₆, а также показателей стадий окисления ОВ — на I-й, L-стадии и суммарно на II-й и L-стадиях (рис. 8а–е). Так, по снижению соотношения $[O_2]I/ПО$, характеризующего долю лабильных компонентов ОВ в общем составе ОВ, исследуемые водоемы располагались в следующей последовательности: Валгомозеро (0.29 мг O_2 /мг О) → Сямозеро (0.12) → Шотозеро (0.09) → Салонъярви и Вегарусъярви (по 0.06 мг O_2 /мг О каждое). Это подтверждается по изменению содержания автохтонного ОВ (табл. 2), то есть чем оно выше, тем больше значение $[O_2]I/ПО$.

Выявленные взаимосвязи отражают варианты общих сезонных соответствий значений показателей ОВ оцененному потреблению O_2 по стадиям БПК от наибольших значений, приходящихся на отдельные сезоны периода открытой воды, к характерным их снижениям зимой, отличающимся в разных мезотрофных озерах. Указанные зависимости сохраняют при небольших изменениях свой угол наклона и смещаются вдоль горизонтальной оси (по значениям показателя ОВ) со сменой для каждой зависимости своего диапазона — от максимума в ее верхней части до минимума в нижней. При этом значения потребления O_2 для каждой линии взаимосвязи меняются меньше в рамках общих диапазонов потребления O_2 (от значений в нижней части зависимости до значений в верхней ее части).

Зависимость I (рис. 8а–е) отражает тенденцию снижения значений ОВ и БПК от наибольших их значений весной в Салонъярви через промежуточные значения показателей в озерах Валгомозеро и Сямозеро к пониженным значениям зимой в Валгомозеро. Эти взаимосвязи отражают преимущественно весенний тип совместных изменений показателей ОВ и БПК. Зависимость II (рис. 8а–е) показывает снижение показателей от наибольших их значений в воде летом/осенью для

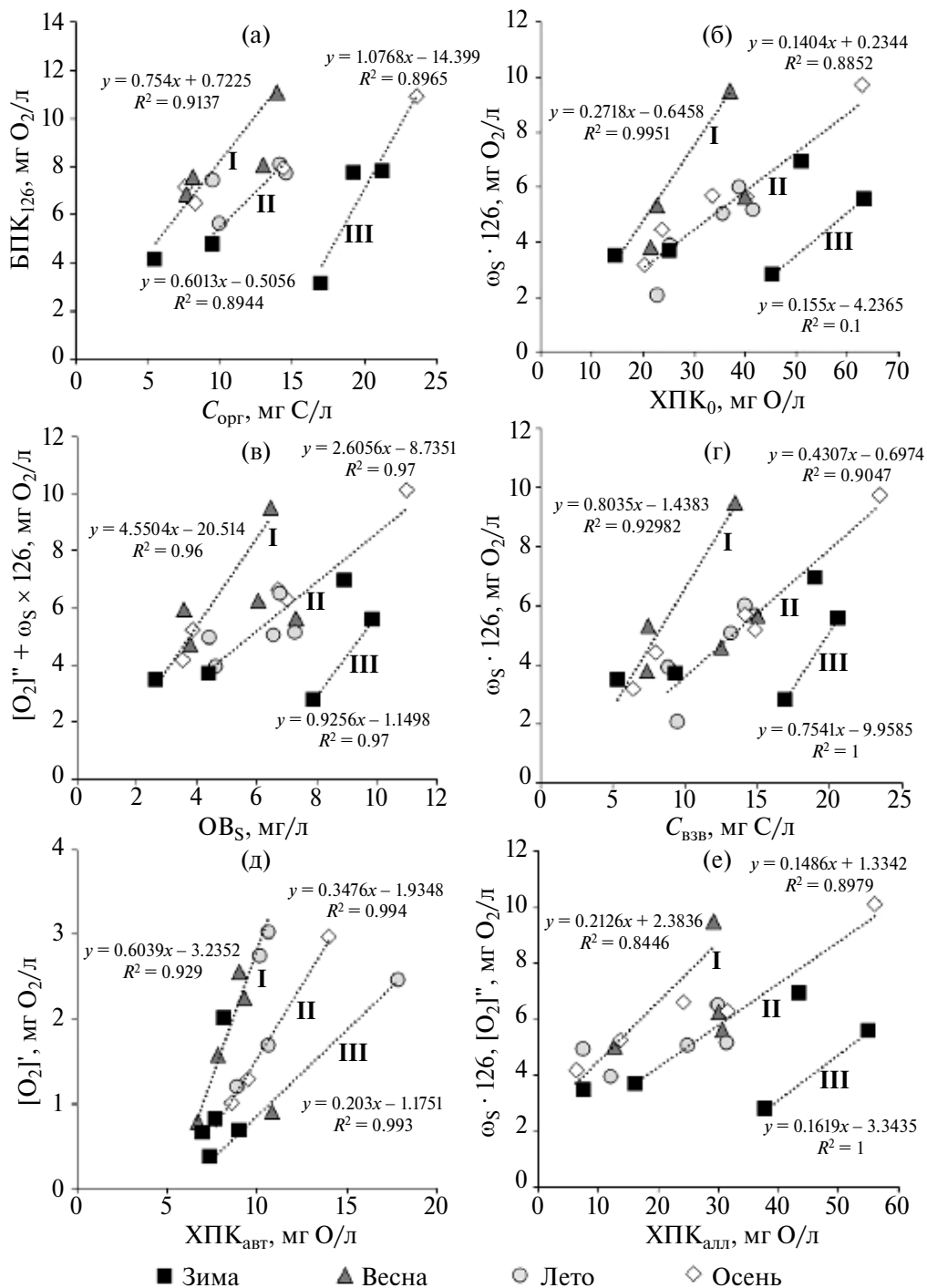


Рис. 8. Соответствие значений показателей ОВ и кинетических параметров БПК.

Fig. 8. Correspondence of organic matter concentrations and kinetic BOD parameters.

оз. Шотозеро и весной/летом для оз. Вегарусъярви через промежуточные значения для разных озер к пониженным значениям зимой в оз. Сямозеро. Зависимость II в большей степени взаимосвязана с летне-осенним типом взаимодействия компонентов ОВ и БПК. Зависимость III (рис. 8а–е) характеризует преимущественно тенденции снижения показателей в зимней воде при повышенных значениях в оз. Шотозеро и пониженных — в оз. Вегарусъярви, дополненных данными для других сезонов с большими значениями показателей ОВ и БПК (оз. Салонъярви для осени и оз. Валгомозеро для лета).

В отличие от рис. 8а–г, е, показатели $\text{ХПК}_{\text{авт}}$ и $[\text{O}_2]^I$ на рис. 8д на зависимостях I–III имеют веерообразное расположение, характерное для разных показателей ОВ и БПК в водах эвтрофных озер [14]. Как и в случае эвтрофных озер, для мезотрофных выявлено расположение данных с повышенными значениями, установленных весной, летом или осенью в верхних частях взаимосвязей I–III и в средних — с меньшими значениями для тех же сезонов. Наивысшие значения показателей $\text{ХПК}_{\text{авт}}$ и $[\text{O}_2]^I$ в верхней части на зависимостях I–III представлены данными для озер Шотозеро (лето) и Валгомозеро (лето, осень). Это связано с тем, что период открытой воды характеризуется активными продукционными процессами, что подтверждается довольно высокими концентрациями лабильных компонентов ОВ: углеводов — осенью [17], а липидов и белков — летом [8, 17]. Минимальные значения отмечались в нижних частях взаимосвязей I–III для данных полученных в зимний сезон для озер Валгомозеро, Салонъярви и Шотозеро. Однако в указанных водоемах в зимней воде диапазоны изменений значений $\text{ХПК}_{\text{авт}}$ и $[\text{O}_2]^I$ существенно меньше (соответственно 7.0–7.7 мг О/л и 0.373–0.813 мг O_2 /л). Большие отличия в значениях показателей ОВ в верхней части зависимостей I–III в сравнении с небольшими в нижней их части придают характерное веерообразное расположение зависимостей I–III на рис. 8д по сравнению с другими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ изменения значений кинетических параметров БПК, полученных при обработке данных длительных экспериментов с водой из мезотрофных озер Карелии (на примере озер Салонъярви, Вегарусъярви, Валгомозеро, Сямозеро и Шотозеро). Полученные данные о содержании и составе ОВ, а также об особенностях его трансформации позволили выявить общие закономерности и сезонные отличия окисления ОВ в воде исследованных водоемов.

Была проведена оценка соответствия полученных значений кинетических параметров БПК различным параметрам содержания ОВ. По окислению лабильных компонентов ОВ (соотношение $[\text{O}_2]^I/\text{ПО}$) водоемы располагались в следующей последовательности: Валгомозеро (0.29 мг O_2 /мг О) → Сямозеро (0.12) → Шотозеро (0.09) → Салонъярви и Вегарусъярви (по 0.06 мг O_2 /мг О каждое), что подтверждается тесной связью с содержанием автохтонного ОВ: чем оно выше, тем больше значение соотношения. Построены взаимосвязи значений ОВ и БПК, которые отражают спектр сезонных особенностей изменения условий окисления разных ОВ по всем исследованным водоемам с учетом как общего потребления кислорода, так и для показателей отдельных стадий.

Выявлен ряд общих особенностей, характерных для всех мезотрофных озер. Наибольший вклад в общее потребление кислорода (более 50%) во все сезоны, кроме летнего, оказывала L-стадия. Это связано с меньшей продукционной способностью такого типа озер и, как следствие, большим содержанием аллохтонного ОВ в них,

чем в эвтрофных водоемах. Скорость окисления ОВ на L-стадии во все сезоны была в несколько раз ниже, чем на I-й стадии, скорость которой увеличивалась от зимы к лету в 4.0 раза и затем постепенно снижалась к осени.

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. Ширинова 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. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
2. Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, Лен. отд., 1983, 150 с.
3. Верес Ю. К., Остапеня А. П. Содержание лабильного органического вещества в воде озер Нарочанского региона // Вестник БГУ. Сер. 2. 2011. № 2. с. 45–49.
4. Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л.: Изд-во Наука, 1973. 243 с.
5. 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>
6. 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.
7. Зобкова М. В. Оценка автохтонной, аллохтонной и антропогенной составляющих органического вещества в поверхностных водах (на примере водных объектов Карелии): автореф. дис. ... канд. хим. наук: 1.5.15. Петрозаводск, 2024, 20 с.
8. 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.
9. Леонов А. В. Обобщение, типизация и кинетический анализ кривых потребления кислорода по данным БПК-опытов // Океанология. 1974. Т. 16. Вып. 1. С. 82–87.
10. Леонов А. В., Зобкова М. В. Общая характеристика развития БПК в длительных экспериментах с водой из водоемов Карелии // Тр. Кар. НЦ РАН. 2019. № 3. С. 61–79.
<https://doi.org/10.17076/lim952>
11. 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. 2020а. № 4. С. 40–61.
<https://doi.org/10.17076/lim1164>
12. 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. 2020б. № 9. С. 40–64.
<https://doi.org/10.17076/lim1287>
13. 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>

14. Леонов А. В., Зобкова М. В. Кинетические параметры БПК и их соответствие содержанию компонентов органического вещества в водах евтрофных водоемов Карелии // Известия русского географического общества, 2022. Т. 154, № 3. С. 28–46.

<https://doi.org/10.31857/S0869607122030053>

15. Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Москва, 2006. 59 с.

16. Лозовик П. А., Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтилаламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.

17. Лозовик П. А., Мусатова М. В., Рыжаков А. В. Автохтонное и аллохтонное органическое вещество в разнотипных озерах Карелии // Вода, химия и экология. 2014. № 4. С. 11–17.

18. Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б., Духовичева, Т. А., Осипова Л. А. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.

19. Озера Карелии. Справочник. / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

20. Рыжаков А. В., Зобкова М. В., Лозовик П. А. Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны // Тр. Кар. НЦ РАН. 2016. № 9. С. 33–45.

21. Скопинцев Б. А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17 (29). 200 с.

22. Трегубова Т. М., Кулиш Т. П. Кинетика биохимического потребления кислорода в воде озера. Антропогенное евтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, Лен. Отд., 1982. С. 106–116.

23. Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Lability of organic carbon in lakes of different trophic status // Freshwater Biol. 2009. Vol. 54. P. 1312–1323.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02183>

24. Sullivan A. B., Snyder D. V., Rounds S. A. Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon // Chem. Geol. 2010. Vol. 269. P. 12–21.

<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.08.007>

25. Zhou Y., Davidson T. A., Yao X., Zhang Y., Jeppesen E., de Souza J. G., Wua H., Shi K., Qin B. How autochthonous dissolved organic matter responds to eutrophication and climate warming: evidence from a cross-continental data analysis and experiments // Earth-Science Reviews. 2018. V. 185. pp. 928–937.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.013>

Characteristics of Kinetic Processes of Organic Matter Transformation in Mesotrophic Lakes of Karelia

A.V. Leonov^{1, *}, M.V. Zobkova^{2, *}

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*E-mail: leonov@ocean.ru

**E-mail: rincalika21@yandex.ru

In 2012–2013, studies of the biochemical oxygen demand (BOD) kinetics and the composition of organic matter (OM) were conducted on five mesotrophic lakes of Karelia — Salonyarvi, Vegarusyarvi, Valkhomozero, Syamozero and Shotozero. BOD experiments lasting up to 126 days (at 20 and 10°C) were performed in all seasons of the year. As a result, equations and values of the kinetic parameters of the BOD were obtained,

characterizing seasonal changes in O_2 consumption for OM oxidation in two or three stages (I, II, and L-linear). As a result of the data analysis, a number of common features characteristic of all the studied mesotrophic water bodies were revealed. In all seasons, the oxidation rate of OM at stage L was significantly lower than at stage I. The contribution of each stage to the total oxygen consumption was uneven: the L-stage had the largest (more than 50%) in all seasons except summer (33%), and the I and II stages had the smallest. In summer, due to the active production of easily oxidable OM, the total consumption of O_2 at the I and II stages reached 67% of the BOD_{total} , which was comparable to eutrophic reservoirs. The OM oxidation rate at the I stage increased 4.0 times from winter to summer and then gradually decreased by autumn, and at the L-stage it was several times lower in all seasons than at the I. The obtained correlations between different indicators of organic matter and kinetic parameters of BOD in water from mesotrophic lakes reflect the spectrum of seasonal features of changes in the organic matter oxidation conditions. Decreasing of the labile organic matter oxidation was observed in the following series of lakes: Valkhomozero → Syamozero → Shotozero → Salonyarvi and Vegarusarvi which was confirmed by correlation with concentration of autochthonous organic matter.

Key words: biochemical oxygen demand, rate of oxygen consumption, autochthonous and allochthonous organic matter, water quality, lakes of humid zone

REFERENCES

1. Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrohimicheskoy praktike / Red. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. SPb.: Nestor-Istoriya, 2017. 272 s.
2. Bul'on V. V. Pervichnaya produkciya planktona vnutrennih vodoemov. L.: Nauka Len. otd., 1983. 150 s.
3. Veres Yu. K., Ostapenya A. P. Soderzhanie labil'nogo organicheskogo veshchestva v vode ozer Narochanskogo regiona // Vestnik BGU. Ser. 2. 2011. № 2. S. 45–49.
4. Gidrohimiya Onezhskogo ozera i ego pritokov. L.: Izd-vo Nauka, 1973. 243 s.
5. Efremova T. A., Zobkova M. V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera // Trudy KarNTs RAN. 2019. № 9. S. 60–75.
<https://doi.org/10.17076/lim1017>
6. 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 spektrometricheskim detektirovaniem // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov 2015. №. 8. S. 10–15.
7. Zobkova M. V. Ocenka avtohtonnoj, allohtonnoj i antropogennoj sostavlyayushchih organicheskogo veshchestva v poverhnostnyh vodah (na primere vodnyh ob'ektov Karelii): avtoref. dis. ... kand. him. nauk: 1.5.15. Petrozavodsk, 2024, 20 s.
8. Zobkova M. V., Efremova T. A., Lozovik P. A., Sabylina A. V. Organicheskoe veshchestvo i ego komponenty v poverhnostnyh vodah gumidnoj zony // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2015. № 12. S. 115–120.
9. Leonov A. V. Obobshchenie, tipizatsiya i kineticheskii analiz krivykh potrebleniya kisloroda po dannym BPK-opytov // Okeanologiya. 1974. Vol. 14. Vyp. 1. S. 82–87.
10. Leonov A. V., Zobkova M. V. Obshchaya karakteristika razvitiya BPK v dlitel'nyh eksperimentah s vodoy iz vodoemov Karelii // Tr. Kar. NC RAN. 2019. № 3. S. 61–79.
<https://doi.org/10.17076/lim952>

11. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Znacheniya kineticheskikh parametrov BPK dlitel'nykh eksperimentov (na primere analiza dannykh s raznymi integral'nymi probami vody iz Onezhskogo ozera) // *Trudy KarNTs RAN.* 2020a. № 4. S. 40–61.
<https://doi.org/10.17076/lim1164>
12. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Sootvetstvie znachenij parametrov dolgosrochnoj kinetiki BPK koncentraciyam komponentov organicheskogo veshchestva v vode iz raznykh akvatorij Onezhskogo ozera // *Trudy KarNTs RAN.* 2020b. № 9. S. 40–64.
<https://doi.org/10.17076/lim1287>
13. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Primenenie dlitel'nykh BPK-eksperimentov dlya sezonnykh issledovanij okisleniya komponentov organicheskogo veshchestva v vode iz raznykh rajonov Onezhskogo ozera // *Tr. Kar. NC RAN.* № 9. 2021. S. 37–57.
<https://doi.org/10.17076/lim1369>
14. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Kineticheskie parametry BPK i ih sootvetstvie sodержaniyu komponentov organicheskogo veshchestva v vodah evtrofnnykh vodoemov Karelii // *Izvestiya russkogo geograficheskogo obshchestva,* 2022. T. 154, № 3. S. 28–46.
<https://doi.org/10.31857/S0869607122030053>
15. *Lozovik P. A.* Gidrogeohimicheskie kriterii sostoyaniya poverhnostnykh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdeystviyu: Avtoref. dis. ... dokt. him. nauk. Moskva, 2006. 59 s.
16. *Lozovik P. A., Musatova M. V.* Metodika razdeleniya organicheskogo veshchestva prirodnykh vod adsorbciy na diehtilaminoehtilcelluloze na avtohtonnyuyu i allohtonnyuyu sostavlyayushchie // *Vestnik MGOU. Seriya Estestvennye nauki.* 2013. no. 3. S. 63–68.
17. *Lozovik P. A., Musatova M. V., Ryzhakov A. V.* Avtohtonnoe i allohtonnoe organicheskoe veshchestva v raznotipnykh ozerakh Karelii // *Voda, himiya i ekologiya.* 2014. № 4. S. 11–17.
18. *Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Duhovicheva, T. A., Osipova L. A.* Allohtonnoe i avtohtonnoe organicheskoe veshchestvo v poverhnostnykh vodah Karelii // *Vodnye resursy.* 2007. T.34, № 2. S. 225–237.
19. *Ozera Karelii. Spravochnik.* / Pod red. N. N. Filatova, V. I. Kuhareva. — Petrozavodsk: KarNC RAN, 2013. 464 s.
20. *Ryzhakov A. V., Zobkova M. V., Lozovik P. A.* Osobennosti sodержaniya i raspredeleniya form fosfora v vodoemakh gumidnoj zony // *Trudy KarNC RAN.* — 2016. — № 9 — S. 33–45.
21. *Skopincev B. A.* Organicheskoe veshchestvo v prirodnykh vodah (vodnyj gumus) // *Tr. GOIN.* 1950. Vyp. 17 (29). 200 s.
22. *Tregubova T. M., Kulish T. P.* Kinetika biohimicheskogo potrebleniya kisloroda v vode ozera. Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera. L.: Nauka, Len. Otd, 1982. S. 106–116.
23. *Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T.* Lability of organic carbon in lakes of different trophic status // *Freshwater Biol.* 2009. Vol. 54. P. 1312–1323.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02183>
24. *Sullivan A. B., Snyder D. V., Rounds S. A.* Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon // *Chem. Geol.* 2010. Vol. 269. P. 12–21.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.08.007>
25. *Zhou Y., Davidson T. A., Yao X., Zhang Y., Jeppesen E., de Souza J. G., Wua H., Shi K., Qin B.* How autochthonous dissolved organic matter responds to eutrophication and climate warming: evidence from a cross-continental data analysis and experiments // *Earth-Science Reviews.* 2018. V. 185. pp. 928–937.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.013>