

УДК 556.114.7: 546.21: 543.632. 14

## СООТВЕТСТВИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДОЛГОСРОЧНОЙ КИНЕТИКИ БПК КОНЦЕНТРАЦИЯМ КОМПОНЕНТОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ИЗ РАЗНЫХ АКВАТОРИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

**А. В. Леонов<sup>1</sup>, М. В. Зобкова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,  
Петрозаводск, Россия

Длительные БПК-эксперименты (до 84–126 сут) и определение концентраций компонентов органического вещества (ОВ) проводились в различные сезоны 2013–2017 гг. в воде Онежского озера. Пробы воды отбирали из акваторий Пухтинской, Кондопожской, Петрозаводской губ, а также из устьевой зоны р. Шуи и в районе Ивановских островов из поверхностного горизонта (0,5 или 1 м) или из разных горизонтов толщи воды (от поверхности до дна). Выполнено одновременно по 16 экспериментов при 20 и 10 °С и по 8 – при 10 и 2 °С (всего 48 экспериментов). Развитие БПК во всех экспериментах отражено кинетическими уравнениями разного типа и соответствующими параметрами, отражающими также и особенности кинетики БПК в среднем по сезонам года на I-й, II-й и линейной стадиях. Средние значения параметров БПК в весенней и летней воде из исследованных акваторий Онежского озера оказались выше в сравнении с их значениями в воде из центральной части озера. Показано, что в водах окраинных акваторий озера на I-й стадии окисления лабильных компонентов ОВ и на линейной стадии окисления условно «стойких» фракций ОВ потребление  $O_2$  в разные сезоны выше соответственно в 2,5–4,2 и в 2 раза в сравнении с центральной частью озера. Это служит дополнительным подтверждением, что воды центральной части озера сохраняют высокое качество. Между различными компонентами ОВ и кинетическими параметрами БПК установлена тесная связь ( $R^2 = 0,60–1,00$ ).

**Ключевые слова:** биохимическое потребление кислорода; константа скорости / скорость потребления кислорода; качество воды; органическое вещество; взаимосвязи между показателями органического вещества и БПК; Онежское озеро.

### **A. V. Leonov, M. V. Zobkova. CORRESPONDENCE BETWEEN THE PARAMETER VALUES OF LONG-TERM BOD KINETICS AND CONCENTRATIONS OF ORGANIC MATTER COMPONENTS IN WATERS FROM DIFFERENT REGIONS OF LAKE ONEGO**

Long-term BOD experiments (up to 84–126 days) were conducted and the concentrations of organic matter compounds were determined in different seasons of 2013–2017 with water taken from different parts of Lake Onego: Pukhta, Kondopoga, Petrozavodsk Bays, as well as the estuarine zone of the River Shuya and the area around Ivanovskie Islands. Water samples were taken either from the surface horizon (0.5 or 1 m) or from

different water column horizons (from the surface to the bottom). In total, 48 experiments were held: 16 experiments were performed simultaneously for 20 and 10 °C, and eight – for 10 and 2 °C, respectively. The development of BOD in all the experiments was modeled by various types of kinetic equations with parameters that also reflect season-averaged characteristics of BOD kinetics in the first, second and linear stages. The average spring and summer values of water BOD parameters in the above-listed regions of Lake Onego were higher than the values in water from the Central region of the lake. It was shown that O<sub>2</sub> consumption in the lake's peripheral water areas at the first stage of oxidation of labile organic components and in the linear stage of oxidation of conventionally "stable" organic fractions in different seasons was, respectively, 2.5–4.2 and 2 times higher compared to the Central part of the lake. This is additional evidence of the high water quality retained in the Central region. Strong correlation was found between different organic matter components and BOD kinetic parameters ( $R^2 = 0.60\text{--}1.00$ ).

**Key words:** biochemical oxygen demand; rate constant / oxygen consumption rate; water quality; organic matter; crosstalk between organic matter and BOD parameters; Lake Onego.

## Введение

Онежское озеро – один из крупнейших водоемов в мире с запасом пресных вод 291,2 км<sup>3</sup>. Площадь его поверхности составляет 9692 км<sup>2</sup>, и 25 % приходится на заливы, губы и прибрежные акватории [Швец, 1977]. Средняя глубина озера 30 м, наибольшая – 129 м, 57 % площади озера составляют глубины 20–60 м и 10 % отводится литорали в пределах изобаты 10 м. Прибрежная береговая зона северной части озера сильно изрезана, включает большое количество заливов, губ, островов, а южная – напротив, имеет слабую расчлененность побережья и включает заболоченные участки. Химический состав воды Онежского озера определяется преимущественно поступлением речных вод с водосбора, атмосферными осадками, подземным и антропогенным стоком [Сабылина и др., 2010]. Естественное качество озерных вод в целом формируется под выраженным антропогенным воздействием, связанным с использованием водных ресурсов, хозяйственной деятельностью на водосборе и сбросом загрязненных (или недостаточно очищенных) сточных вод в природные водные объекты [Экосистема..., 1990].

Источники загрязнения распределены неравномерно в бассейне Онежского озера. Наиболее существенные из них расположены в северной его части, где находятся большие промцентры (города Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск). Заливы и губы подвержены влиянию притоков, воды которых по большей части обогащены гумусовыми веществами (ГВ), железом, компонентами сточных вод из промузлов. В этих водах может быть сильно изменен естественный химический состав компонентов – повышено содержание взве-

шенных веществ, нефтепродуктов, увеличены цветность воды, значения окисляемости и биохимического потребления кислорода (БПК), концентрации  $N_{\text{общ}}$  и  $P_{\text{общ}}$ , а трофический статус вод этих акваторий имеет признаки мезо- и эвтрофного состояния [Экосистема..., 1990].

Результаты анализа кинетических параметров по длительным БПК-опытам позволили установить, что для воды из центрального плеса (ЦП) Онежского озера характерны пониженные значения БПК на I-й и линейной стадиях процесса [Леонов, Зобкова, 2020]. Это служит дополнительным критерием сохранения высокого качества воды в этом районе озера. Данная работа будет сосредоточена на результатах анализа длительных БПК-опытов с водой из разных акваторий Онежского озера, в частности, из мелководной Пухтинской губы (ПХ), Кондопожской губы (КГ), устьевой зоны р. Шуи (РШ), Петрозаводской губы (ПГ) и из района Ивановских островов (ИО). Это позволит оценить качество воды в акваториях, а также сравнить результаты с ранее установленными параметрами для центрального плеса Онежского озера.

Органическое вещество (ОВ) в природных водах подразделяется 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 и со сточными водами). В состав автохтонного ОВ в незагрязненных природных водах включаются биохимически легко окисляемые соединения – такие, как свободные углеводы, липиды, белки, мочевины и другие вещества, а в состав аллохтонного – гумусовые вещества [Ефремова, Зобкова, 2019]. Также необходимо отметить, что в ряде исследований выявлена роль во внутриводоемных продукцион-

но-деструкционных процессах взвешенного ОВ, влияние которого увеличивается с ростом уровня трофии водоема [Ostapenia et al., 2009; Верес, Остапеня, 2011].

В последние годы тест на БПК для долгосрочных исследований практически не применяется, а если и используется, то только для измерения БПК за 5 суток ( $BPK_5$ ). Так как отдельные измерения  $BPK_5$  малоинформативны, то вполне обоснованны критические высказывания о целесообразности его оценки.

В то же время БПК служит одним из критериев оценки содержания в природной воде ОВ, поэтому несомненно интересно сравнить и выявить соответствие друг другу значений концентраций разных форм ОВ и важнейших кинетических параметров, установленных по долгосрочным определениям БПК. Необходимое условие корректности такого сравнения – в каждой выборке должны быть результаты, которые получены при анализе проб воды с полным совпадением даты, места и горизонта отбора пробы воды для БПК-опытов и для аналитических определений концентраций ОВ.

Таким образом, важной целью данного исследования на примере разных акваторий Онежского озера является: 1) проверка перспективности использования долгосрочных тестов БПК для объяснения особенностей мультстадийных окислительных процессов в воде; 2) установление взаимосвязей между различными компонентами ОВ (углеводами, липидами, белками, ГВ), присутствующими в природных водах, и параметрами, полученными по долгосрочным БПК-экспериментам.

## Объекты и методы исследований

Исследуемые районы Онежского озера отличаются друг от друга по различным показателям: расположением, объемом водных масс, глубинами, водообменом с центральной частью озера, химическим составом. Такое отличие может влиять на качество воды и изменение показателей по кинетике БПК в них.

**Пухтинская губа** расположена на юго-западном берегу Онежского озера и отличается активным водообменом с центральным плесом озера. Химический состав губы изменяется в зависимости от времени года, особенно это заметно в весенний период при возникновении термобара, который препятствует водообмену с озерными водами. Это приводит к тому, что в губу поступают и аккумулируются в ней воды РШ и более мелких притоков с заболоченных территорий, богатые ОВ аллохтонного происхождения, склоновые паводковые

воды [Бояринов, Петров, 1991], а также теплые сточные воды Петрозаводского промузла. Поэтому весной возрастают значения показателей ОВ: так, в 2013 г. цветность составляла 45–65 град., перманганатная окисляемость (ПО) – 12,5–19,6 мг О/л, а содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) – 9,1–14,7 мг С/л [Сабылина, Рыжаков, 2018]. Летом и осенью главное влияние на качество воды в ПХ оказывают озерные водные массы – содержание  $C_{орг}$  в эти сезоны в губе и центре озера практически не различалось [Сабылина, Рыжаков, 2018]. Содержание  $P_{общ}$  также уменьшается от весны к осени, и вода в ПХ относится мезотрофному типу.

**Устье р. Шуи** расположено в вершинной части ПГ. Река является вторым по величине притоком Онежского озера (3,1 км<sup>3</sup>/год), ее сток во многом определяет качество вод и состояние акватории ПГ. С водами РШ поступает существенное количество ГВ, это связано с обилием лесов, болот и озер на ее водосборе. Многолетние наблюдения позволили выявить постепенный рост поступления в озеро ОВ с ее водами: в 1965–1966 гг. среднегодовое содержание  $C_{орг}$  составляло 12,3 мг/л, а в 2007–2008 гг. – 16,8 мг/л [Сабылина, 2016].

**Петрозаводская губа** составляет 1,3 % общей площади Онежского озера, отличается высокой проточностью (период водообмена в ней с учетом внешнего водообмена с озером – 0,13 [Лозовик и др., 2019]) и значительной природной и антропогенной нагрузкой, которая в целом выше, чем для КГ [Сабылина, 2015]. Современный мезотрофный мезогумусный статус вод ПГ формируется при смешении озерных, речных и сточных вод [Сабылина и др., 2010], поэтому значения показателей ОВ могут сильно варьировать. Весной в ПГ превалирует ОВ гумусовой природы, что связано с запирианием вод РШ, а летом преобладают озерные воды, это подтверждается меньшим содержанием  $C_{орг}$  и ГВ в ней [Ефремова, Зобкова, 2019]. Кроме того, установлено, что в результате климатических изменений в ПГ с 1990-х гг. возрастают значения показателей содержания ОВ терригенного происхождения [Калинкина и др., 2019; Kalinkina et al., 2020]. Так, цветность увеличилась с 56 до 73 град., содержание Fe – с 0,12 до 0,42 мг/л,  $P_{общ}$  – с 12 до 22 мкг/л и взвешенного вещества – с 1,6 до 3 мг/л [Калинкина и др., 2019].

**Ивановские острова** расположены на выходе из ПГ и образуют естественную преграду между губой и открытой частью озера. Качество воды в этом районе больше соответствует озерной.

**Кондопожская губа** является одним из крупнейших и глубоководных районов озера

и в отличие от Петрозаводской характеризуется меньшей проточностью, период ее водообмена с учетом внешнего водообмена с озером составляет 1,02 [Лозовик и др., 2019]. В вершинную часть губы поступают воды р. Суны (95 % через Кондопожский канал), а также сточные воды Кондопожского промцентра: 90 % – Кондопожского ЦБК (в среднем 53–54 м<sup>3</sup>/год) и 10 % – хозяйственно-бытовые стоки г. Кондопоги [Сабылина, Рыжаков, 2007]. Сточные воды комбината распространяются в средней толще водных масс в виде факела [Сабылина и др., 2010] и локализуются в этой акватории [Лозовик и др., 2003]. Анализ многолетнего ряда наблюдений (1965–2008 гг.) показал, что содержание  $C_{орг}$  и  $P_{общ}$  в воде р. Суны оставалось довольно постоянным и за указанный период в среднем составляло 8,4–10,7 мг/л и 12–13 мкг/л соответственно [Сабылина, 2016]. Речные воды разбавляют сточные воды ЦБК, включающие быстро окисляемые компоненты ОВ (спирты, фурфурол, альдегиды, сахара), а также биохимически трудно окисляемые лигносульфонаты (составляют 50–60 % всей органической массы), смолистые и другие вещества. В зависимости от сезона характер загрязнения вод КГ сточными водами ЦБК разли-

чен. Воды вершинной части КГ отличаются высокими концентрациями ОВ, а в середине и во внешней ее части по качеству и составу они близки к озерным [Сабылина, 2015].

Отбор проб воды для исследования долгосрочной кинетики БПК осуществлялся из разных акваторий Онежского озера в 2013–2017 гг. (рис. 1). Всего выполнено 48 экспериментов (8 при 10 и 2 °С и 16 при 20 и 10 °С). С зимней водой проведено 12 БПК-экспериментов, с весенней – 14, с летней – 10, с осенней – 12. Варианты отбора и составления интегральных проб воды для опытов по БПК, а также их условного подразделения на шесть серий показаны в хронологическом порядке в табл. 1. Необходимо отметить, что для установления зависимостей дополнительно были использованы также данные по кинетике БПК и содержанию ОВ в воде из РШ и ЦП озера (отбор проб на станции С3).

С водой из разных акваторий Онежского озера, испытывающих разное антропогенное воздействие (из мелководной ПХ, крупных акваторий – КГ и ПГ, из устьевой зоны РШ и района ИО), проведены длительные (до 84–126 сут) эксперименты для изучения кинетики БПК с анализом проб воды через 3, 7, 14, 21, 35, 49,

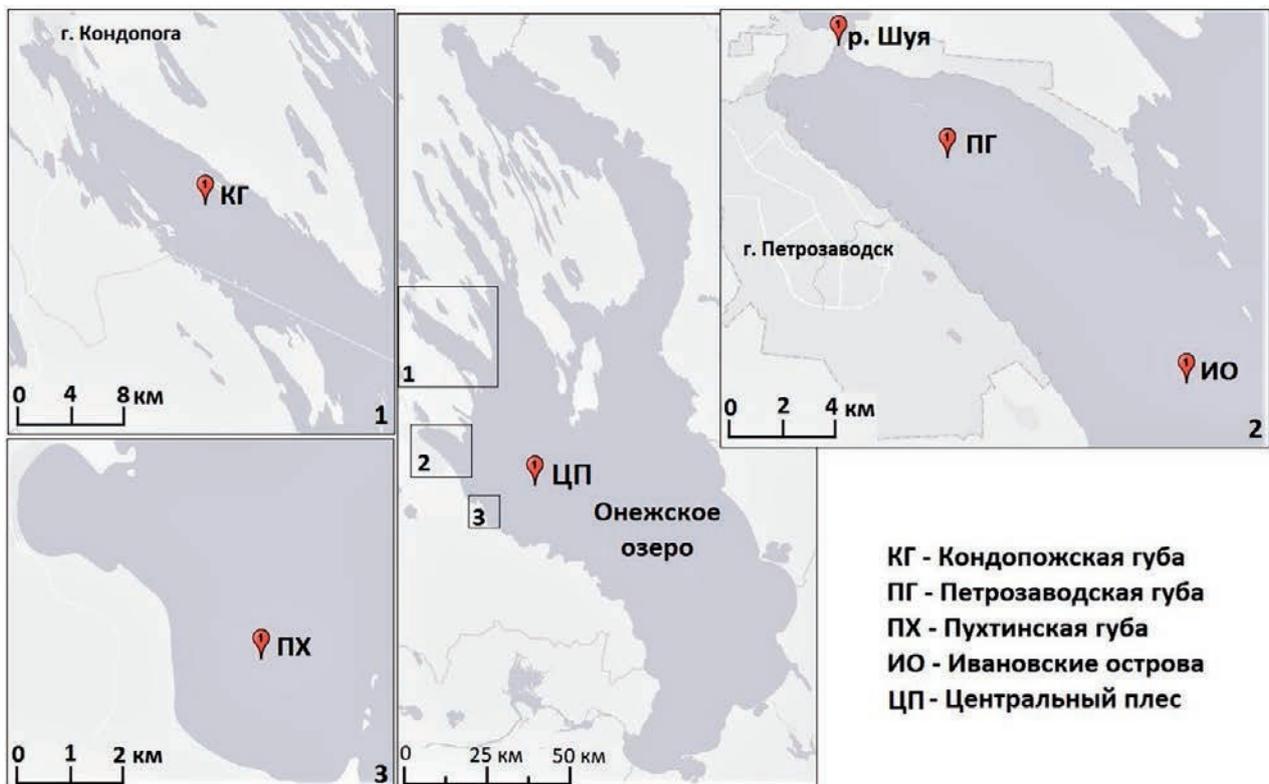


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб в разных акваториях Онежского озера в 2013–2017 гг.

Fig. 1. Schematic map of sampling stations in different areas of Lake Onego in 2013–2017

Таблица 1. Схема отбора проб воды из разных акваторий Онежского озера в разные гидрологические сезоны 2013–2017 гг.

Table 1. Plan of the water sampling from different areas of Lake Onego in 2013–2017

Серия опытов Series of experiments	Акватория озера (станция, глубина, м) Area of the lake (station, depth, m)	Сезон, год Season, year	Тип пробы (горизонт, м) Sample type (horizon, m)
1	Пухтинская губа / Pukhta Bay (GP1; 13,5)	весна–осень spring–autumn 2013	поверхностный surface (0,5)
2	Кондопожская губа Kondopoga Bay (K6; 82,0)	зима winter 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 20,0 + 40,0 + 60,0 + 80,0)
		весна spring 2013	поверхностный surface (1,0)
		лето summer 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 33,0 + 64,0)
		осень autumn 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 40,0 + 80,0)
3	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 28,7)	зима winter 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 14,0 + 28,0)
		весна spring 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 26,0)
		лето summer 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 14,0 + 28,0)
		осень autumn 2013	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 25,0)
4	Ивановские о-ва Ivanovskie Islands (-; 32,0)	зима winter 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 8,0 + 15,0 + 31,0)
		весна–осень spring–autumn 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 15,0 + 31,0)
5	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 29,0)	зима winter 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 10,0 + 24,0)
		весна spring 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 14,0 + 28,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 27,0)	лето summer 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 25,0)
		осень autumn 2015	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 26,0)
6	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 25,0)	зима, весна winter, spring 2016	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 12,0 + 24,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 26,5)	осень autumn 2016	поверхностный surface (1,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 28,0)	зима winter 2017	интегральная, от поверхности до дна integral, from the surface to the bottom (1,0 + 13,0 + 26,0)
	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay (P2; 28,5)	весна spring 2017	поверхностный surface (1,0)

70, 91 и 126 сут. Полученные в экспериментах мультистадийные БПК-кривые обрабатывались, и для каждой выделенной стадии оценивались значения кинетических параметров БПК [Леонов и др., 2018].

Характеристику ОВ в пробах определяли по химическому потреблению кислорода (ХПК) [РД..., 2012] в воде перед началом эксперимента (ХПК<sub>0</sub>), на 49-е сут (ХПК<sub>49</sub>) и по его окончании (ХПК<sub>126</sub>), а также по содержанию С<sub>орг</sub> [Зобков, Зобкова, 2015] и ПО в исходной воде. Ряд параметров ОВ оценивали по эмпирическим уравнениям: содержание лабильного С (С<sub>лаб</sub> = 0,3 · [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup>), стабильного С (С<sub>стаб</sub> = С<sub>орг</sub> - С<sub>лаб</sub>), С<sub>орг</sub> в зависимости от общего содержания ОВ (ОВ<sub>2</sub>) или его доли в условно «стойкой» фракции (ОВ<sub>стаб</sub>) (С<sub>орг</sub><sup>l</sup>, мг С = 2,15 · ОВ мг) [Бульон, 1983]. В этих зависимостях использованы такие же обозначения параметров, как и в данной работе. Кроме того, для сравнения параметров, полученных по кинетике БПК, использованы опубликованные ранее [Ефремова, Зобкова, 2019] данные по концентрации белков, липидов, углеводов и ГВ, установленные для ЦП, ПГ и РШ осенью 2016 г. и зимой–летом 2017 г.

## Результаты и обсуждение

В этой серии экспериментов, как и в ранее обсуждаемых с интегральными пробами воды из центра Онежского озера [Леонов, Зобкова, 2020], получены мультистадийные БПК, в которых развитие потребления O<sub>2</sub> на окисление содержащихся в исследуемых водах компонентов ОВ может быть воспроизведено кинетическими уравнениями разного типа [Леонов, 1974]. Эти типы уравнений и кинетические параметры БПК, оцениваемые при обработке первичных экспериментальных наблюдений, подробно обсуждаются в [Леонов, Зобкова, 2019]. В результате анализа полученных данных для шести серий опытов установлены значения кинетических параметров БПК:  $k$  – константа скорости БПК на I-й стадии, сут<sup>-1</sup>;  $w_1$  – константа скорости БПК на II-й стадии, (л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>);  $v_1$ ,  $\omega_s$  – соответственно скорости БПК на I-й стадии и на линейном участке БПК, мг O<sub>2</sub>/(л·сут); [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup>, [O<sub>2</sub>]<sup>ll</sup> – предельные значения БПК соответственно на I-й и II-й стадиях, мг O<sub>2</sub>/л;  $\omega_s \cdot 126$  – общее потребление O<sub>2</sub> на линейной стадии, мг O<sub>2</sub>/л; БПК<sub>полн</sub> – БПК полное, то есть суммарное потребление O<sub>2</sub> по выделенным стадиям, мг O<sub>2</sub>/л (табл. 2).

Далее рассмотрены значения кинетических параметров БПК, полученные при обработке данных экспериментов с пробами воды

из мелководной и глубоководных акваторий Онежского озера. Основная цель анализа этой информации – выявить отличия в значениях параметров БПК в воде из разных акваторий и горизонтов при температурах 20, 10 и 2 °С, а также в различные сезоны 2013–2017 гг. Расчетные кинетические уравнения для разных типов БПК-кривых в сравнении с экспериментальными данными для обсуждаемых серий экспериментов приведены на рис. 2–7.

### *Серия 1: данные экспериментов с водой из Пухтинской губы (2013 г., весна, лето, осень)*

Эксперименты выполнялись с пробами воды, отобранными в период открытой воды 2013 г. из поверхностного горизонта (табл. 1). Развитие БПК в экспериментах с весенней водой при 20 и 10 °С описывается уравнениями EL-типа, а с летней и осенней водой – уравнениями AL-типа (рис. 2).

Кинетика I-й стадии БПК в весенней и летней воде отражена соответственно уравнениями E- и A-типа, а в формах БПК-кривых при разных температурах есть небольшие отличия (рис. 2). Параметры уравнения E-типа при 20 и 10 °С в весенней воде были близки:  $k$  – 0,115 и 0,111 (в среднем 0,113) сут<sup>-1</sup>, [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup> – 0,80 и 0,75 (0,78) мг O<sub>2</sub>/л и  $v_1$  – 0,0922 и 0,0833 (0,088) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). В то же время скорость БПК на линейной стадии  $\omega_s$  при 20 °С была в 4,1 раза выше, чем при 10 °С.

В целом значения параметров БПК на I-й стадии в летней воде были выше, чем в осенней. Так,  $w_1$  при 20 °С в летней воде составляло 0,579, а в осенней – 0,293 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>, [O<sub>2</sub>]<sup>l</sup> – 1,41 и 0,613 мг O<sub>2</sub>/л соответственно. Однако параметры  $v_1$  и  $\omega_s$  были близки по значениям, которые составили 0,0215 и 0,0345 (в среднем 0,0281) и 0,0212 и 0,0177 (0,0195) мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно. Такая же тенденция сохранялась и при 10 °С: летом значения параметров I-й стадии БПК превышали установленные для осенней воды (табл. 2).

В экспериментах с летней водой значения скоростей БПК были достаточно близки в уравнениях A-типа при 20 и 10 °С:  $v_1$  – 0,0215 и 0,0182 (в среднем 0,0198),  $\omega_s$  – 0,0212 и 0,0194 (0,0203) мг O<sub>2</sub>/(л·сут), а в осенней воде близки параметры  $w_1$  – 0,293 и 0,321 (0,307) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>. Значения других параметров в летней и осенней воде отличались при разных температурах (табл. 2).

Очевидное влияние температуры обнаруживается при сравнении скоростей БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , в экспериментах с весенней

Таблица 2. Сводная таблица кинетических параметров БПК, оцененных для разных акваторий Онежского озера в 2013–2017 гг. (над чертой – данные для экспериментов при 20 °С, под чертой – при 10 °С)

Table 2. Summary table of BOD kinetic parameters evaluated for different areas of Lake Onego in 2013–2017 (above the line – data for experiments at 20 °С, below the line – data for experiments at 10 °С)

Район озера, год, сезон, рисунок (тип отбора пробы**) Part of the lake, year, season, figure (sampling type**)	Кинетические БПК-параметры Kinetic BOD parameters								
	I-я стадия (по E- или A-типу) First stage (E- or A-type)			L-стадия L-stage		II-я стадия Second stage	БПК <sub>полн</sub> BOD <sub>total</sub>		
	Тип БПК BOD type	[O <sub>2</sub> ]', мг O <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /L	k, сут <sup>-1</sup> или w1, л·мг <sup>-1</sup> ·сут <sup>-1</sup> k, day <sup>-1</sup> or w1, L·mg <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup>	v <sub>1</sub> , мг O <sub>2</sub> (л·сут) mg O <sub>2</sub> (L·day)	ω <sub>s</sub> , мг O <sub>2</sub> (л·сут) mg O <sub>2</sub> (L·day)	ω <sub>s</sub> ·126, мг O <sub>2</sub> /л ω <sub>s</sub> ·126, mg O <sub>2</sub> /L	[O <sub>2</sub> ]', мг O <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /L	Расчет Calculated	Опыт Experiment
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КГ, 2013, З Рис. 3, а (2) KG, 2013, W Fig. 3, а (2)	E	0,43	0,148	0,0636	0,0132	1,663	0,44	2,533	2,52
	E	0,28	0,173	0,0484	0,00875	1,103	0,23	1,613	1,61
ПГ, 2013, З Рис. 4, а (2) PB, 2013, W Fig. 4, а (2)	E	0,38	0,131	0,0498	0,0268	3,377	–	3,76	3,76
	E	0,32	0,092	0,0295	0,0115	1,449	–	1,77	1,77
ИО, 2015, З Рис. 5, а (2) Ил, 2015, W Fig. 5, а (2)	E*	0,232	0,119	0,0276	0,00325	0,410	–	0,642	0,65
	E	0,114	0,131	0,0183	0,00690	0,869	–	0,983	1,01
ПГ, 2015, З Рис. 6, а (2) PB, 2015, W Fig. 6, а (2)	A*	0,16	0,309	0,0008	0,00724	0,912	–	0,928	0,92
	E	0,16	0,115	0,0184	0,0076	0,958	–	1,118	1,12
ПГ, 2016, З Рис. 7, а (2) PB, 2016, W Fig. 7, а (2)	E	3,335	0,138	0,4600	0,0228	2,873	1,585	7,793	7,86
	E	0,50	0,091	0,0455	0,0142	1,789	–	2,289	2,29
ПГ, 2017, З Рис. 7, г (2) PB, 2013, W Fig. 7, г (2)	E	0,39	0,138	0,0538	0,0370	4,662	–	5,052	5,05
	E	0,23	0,0968	0,0223	0,0177	2,230	–	2,460	2,46
ПХ, 2013, В Рис. 2, а (1) РкВ, 2013, Sp Fig. 2, а (1)	E	0,80	0,115	0,0920	0,0228	2,873	–	3,673	3,67
	E	0,75	0,111	0,0833	0,0056	0,706	–	1,458	1,46
КГ, 2013, В Рис. 3, б (1) КВ, 2013, Sp Fig. 3, б (1)	E	1,95	0,130	0,2540	0,0368	4,637	–	6,587	6,58
	E	1,80	0,0876	0,1260	–	–	1,76	3,560	3,58
ПГ, 2013, В Рис. 4, б (2) PB, 2013, Sp Fig. 4, б (2)	E	1,50	0,103	0,1550	0,0286	3,604	0,71	5,814	5,81
	E	0,79	0,139	0,1100	0,00935	1,178	0,57	2,538	2,55
ИО, 2015, В Рис. 5, б (2) Ил, 2015, Sp Fig. 5, б (2)	E*	0,313	0,175	0,0548	0,00098	0,123	–	0,436	0,44
	E	0,78	0,0922	0,0748	0,00314	0,396	–	1,176	1,18
ПГ, 2015, В Рис. 6, б (2) PB, 2015, Sp Fig. 6, б (2)	E*	0,42	0,125	0,0525	0,00429	0,541	–	0,961	0,96
	E	0,64	0,115	0,0736	0,0142	1,789	–	2,429	2,43
ПГ, 2016, В Рис. 7, б (2) PB, 2016, Sp Fig. 7, б (2)	E	1,00	0,0988	0,0988	0,0254	3,200	0,847	5,047	5,02
	A	0,85	0,247	0,2100	0,0121	1,543	0,481	2,873	2,88

Окончание табл. 2  
Table 2 (continued)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПГ, 2017, В Рис. 7, д (2) РВ, 2017, Sp Fig. 7, д (2)	<u>Е</u> Е	<u>1,00</u> 0,85	<u>0,120</u> 0,0876	<u>0,1200</u> 0,0745	<u>0,0214</u> 0,00867	<u>2,696</u> 1,092	<u>1,24</u> –	<u>4,936</u> 1,942	<u>4,94</u> 1,94
ПХ, 2013, Л Рис. 2, б (1) РкВ, 2013, Sm Fig. 2, б (1)	<u>А</u> А	<u>1,410</u> 0,785	<u>0,579</u> 0,392	<u>0,0215</u> 0,0182	<u>0,0212</u> 0,0194	<u>2,671</u> 2,444	–	<u>4,081</u> 3,229	<u>4,07</u> 3,23
КГ, 2013, Л Рис. 3, в (2) КВ, 2013, Sm Fig. 3, в (2)	<u>Е</u> Е	<u>0,63</u> 0,43	<u>0,175</u> 0,125	<u>0,1100</u> 0,0537	<u>0,0158</u> 0,0133	<u>1,991</u> 1,676	<u>0,553</u> –	<u>3,174</u> 2,106	<u>3,17</u> 2,10
ПГ, 2013, Л Рис. 4, в (2) РВ, 2013, Sm Fig. 4, в (2)	<u>Е</u> Е	<u>0,22</u> 0,15	<u>0,101</u> 0,101	<u>0,0222</u> 0,0151	<u>0,0178</u> 0,0069	<u>2,243</u> 0,869	<u>0,353</u> 0,324	<u>2,816</u> 1,343	<u>2,81</u> 1,34
ИО, 2015, Л Рис. 5, в (2) Ил, 2015, Sm Fig. 5, в (2)	<u>А*</u> А	<u>0,13</u> 0,65	<u>0,305</u> 0,315	<u>0,0005</u> 0,0113	<u>0,0070</u> 0,00838	<u>0,882</u> 1,056	<u>0,325</u> –	<u>1,337</u> 1,706	<u>1,33</u> 1,71
ПГ, 2015, Л Рис. 6, в (2) РВ, 2015, Sm Fig. 6, в (2)	<u>Е*</u> Е	<u>0,158</u> 0,42	<u>0,129</u> 0,111	<u>0,0204</u> 0,0466	<u>0,00724</u> 0,00514	<u>0,912</u> 0,648	<u>–</u> 0,732	<u>1,070</u> 1,800	<u>1,05</u> 1,80
ПХ, 2013, О Рис. 2, в (1) РкВ, 2013, А Fig. 2, в (1)	<u>А</u> А	<u>0,613</u> 0,409	<u>0,293</u> 0,321	<u>0,0345</u> 0,0034	<u>0,0177</u> 0,00629	<u>2,230</u> 0,793	–	<u>2,843</u> 1,203	<u>2,84</u> 1,20
КГ, 2013, О Рис. 3, г (2) КВ, 2013, А Fig. 3, г (2)	<u>Е</u> Е	<u>0,57</u> 0,30	<u>0,150</u> 0,0922	<u>0,0855</u> 0,0277	<u>0,0138</u> –	<u>1,739</u> –	<u>0,33</u> 0,677	<u>2,639</u> 0,977	<u>2,62</u> 0,97
ПГ, 2013, О Рис. 4, г (2) РВ, 2013, А Fig. 4, г (2)	<u>А</u> А	<u>1,149</u> 0,64	<u>0,225</u> 0,281	<u>0,0657</u> 0,0304	<u>0,0105</u> 0,00857	<u>1,323</u> 1,080	<u>0,72</u> 0,48	<u>3,192</u> 2,200	<u>3,18</u> 2,20
ИО, 2015, О Рис. 5, г (2) Ил, 2015, А Fig. 5, г (2)	<u>А*</u> Е	<u>0,39</u> 0,46	<u>0,347</u> 0,130	<u>0,0005</u> 0,0598	<u>0,00461</u> 0,00692	<u>0,581</u> 0,872	<u>0,310</u> 0,254	<u>1,281</u> 1,586	<u>1,28</u> 1,58
ПГ, 2015, О Рис. 6, г (2) РВ, 2015, А Fig. 6, г (2)	<u>А*</u> А	<u>0,20</u> 0,60	<u>0,334</u> 0,360	<u>0,0023</u> 0,0428	<u>0,0078</u> 0,00835	<u>0,983</u> 1,052	<u>0,547</u> 0,596	<u>1,730</u> 2,248	<u>1,73</u> 2,25
ПГ, 2016, О Рис. 7, в (1) РВ, 2016, А Fig. 7, в (1)	<u>А</u> А	<u>1,691</u> 1,087	<u>0,363</u> 0,339	<u>0,3139</u> 0,1500	<u>0,0247</u> 0,0121	<u>3,112</u> 1,525	–	<u>4,803</u> 2,612	<u>4,80</u> 2,60

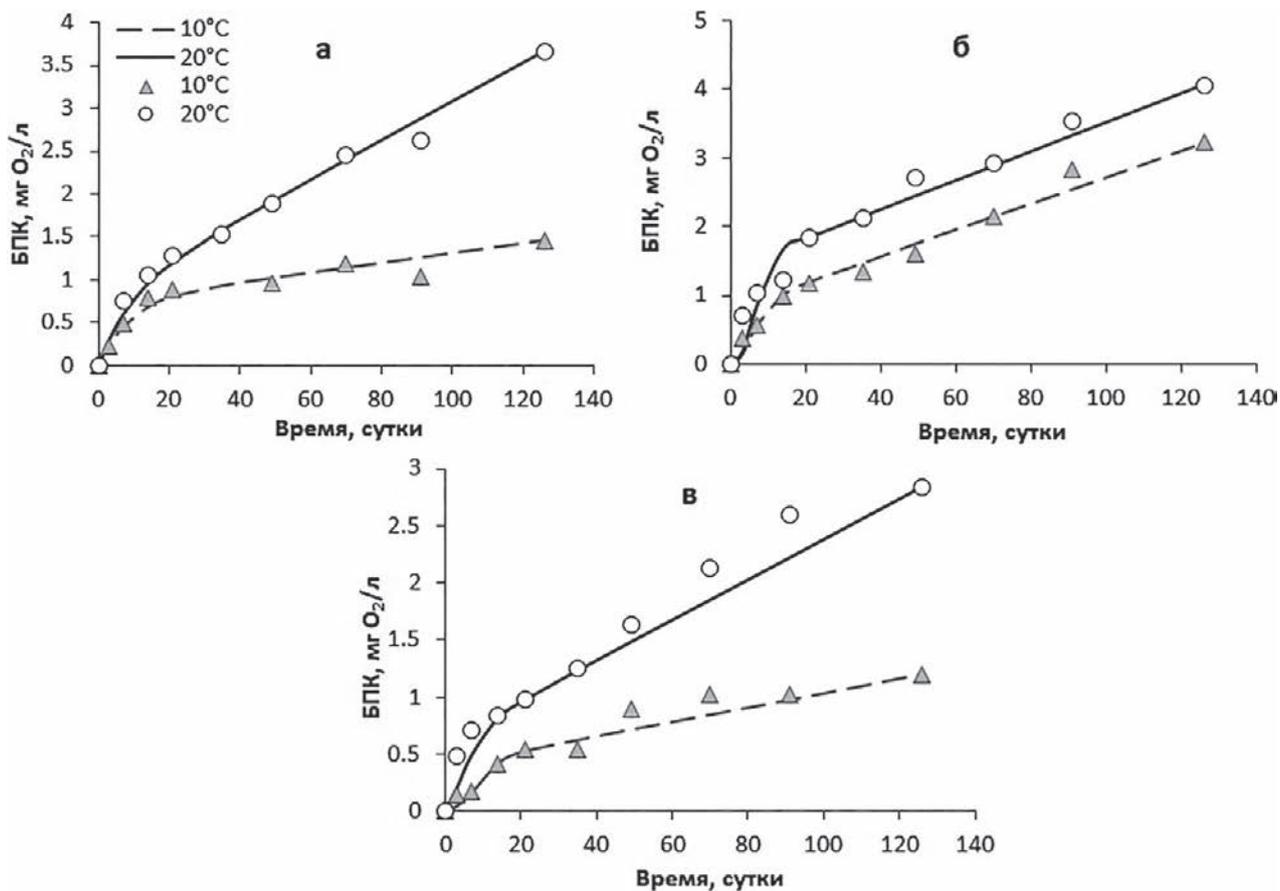
Примечание. \* Эксперимент при 2 °С; \*\* здесь и в табл. 3 указан тип отбора проб воды: (1) – из поверхностного горизонта 0,5 или 1 м, (2) – интегральная, от поверхности до дна; прочерк – отсутствие данных; З, В, Л, О – соответственно зима, весна, лето, осень.

Note. \* Data for experiments at 2 °С; \*\* here and in Table 3 sampling type: (1) – surface 0.5 or 1 m, (2) – integral, from the surface to the bottom; W, Sp, Sm, A – respectively winter, spring, summer, autumn; KB, PB, PkВ, Ил – respectively Kondopoga Bay, Petrozavodsk Bay, Pukhta Bay and Ivanovskie Islands.

и осенней водой: при 20 °С значения составляют соответственно 0,0228 и 0,0177, а при 10 °С – 0,0056 и 0,00629 мг О<sub>2</sub>/(л·сут), что в 4,1 и 2,8 раза ниже. Напротив, в летней воде, как отмечено выше, скорости БПК на линейной стадии достаточно близки при 20 и 10 °С.

Серия 2: данные экспериментов с водой из Кондопожской губы (2013 г., зима, весна, лето, осень)

Вода для БПК-экспериментов при 20 и 10 °С отбиралась из КГ на станции К6 зимой, летом



**а) 20 °C – EL:**  $\text{БПК} = 0,80 (1 - e^{-0,115t}) + 0,0228 t$   
**10 °C – EL:**  $\text{БПК} = 0,75 (1 - e^{-0,111t}) + 0,0056 t$

**б) 20 °C – AL:**  $\text{БПК} = 0,0263 (e^{0,579t} - 1) / (1 + 0,0187e^{0,579t}) + 0,0212 t$   
**10 °C – AL:**  $\text{БПК} = 0,0593 (e^{0,392t} - 1) / (1 + 0,0755e^{0,392t}) + 0,0194 t$

**в) 20 °C – AL:**  $\text{БПК} = 0,192 (e^{0,293t} - 1) / (1 + 0,313e^{0,293t}) + 0,0177 t$   
**10 °C – AL:**  $\text{БПК} = 0,0255 (e^{0,321t} - 1) / (1 + 0,0623e^{0,321t}) + 0,00629 t$

Рис. 2. БПК-кривые в экспериментах 2013 г. при 20 и 10 °C с водой из Пухтинской губы: **а** – весна, **б** – лето; **в** – осень.

Здесь и далее под рисунками – уравнения для разных БПК-кривых; обозначения расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК на фрагментах **б**, **в** и рис. 3, 4, 7 – см. фрагмент **а**

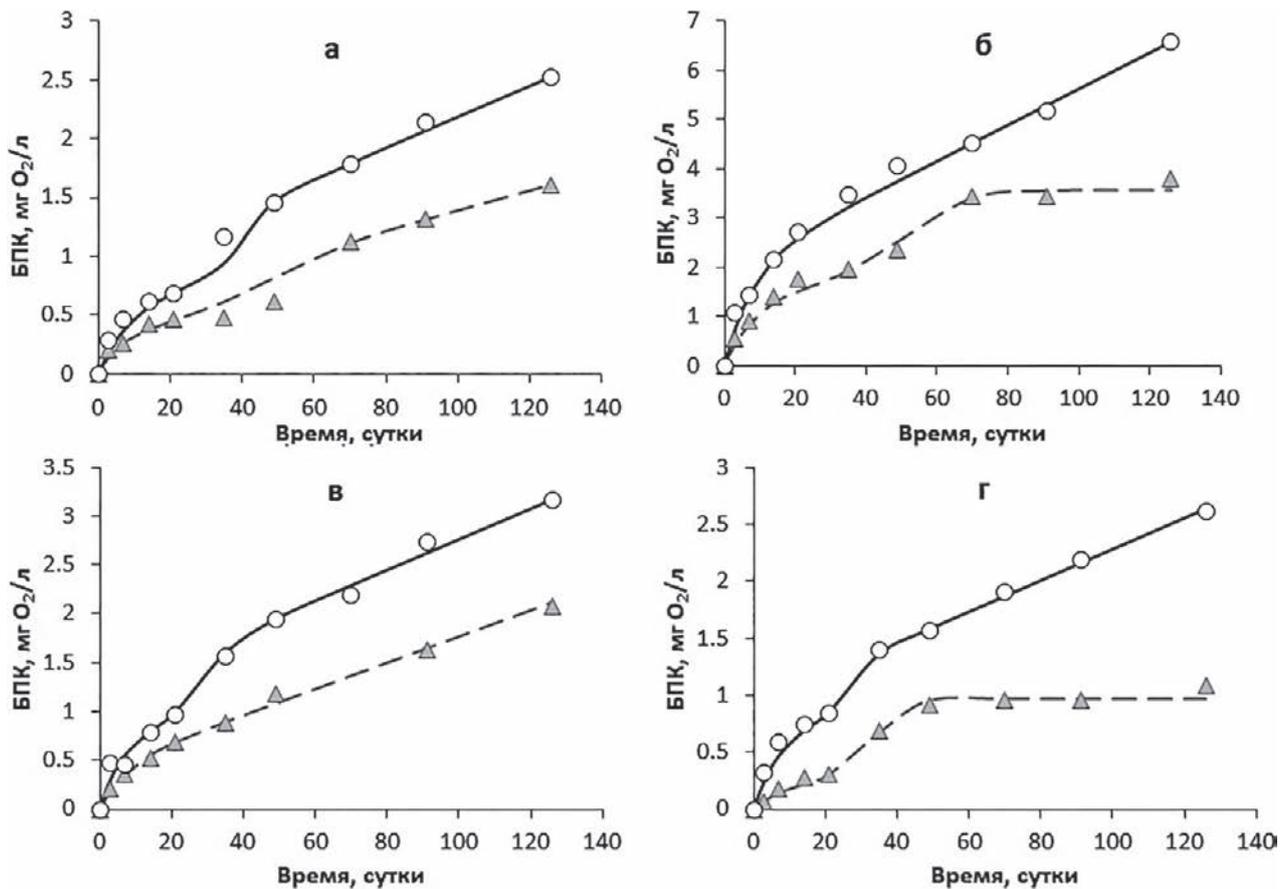
Fig. 2. BOD-curves in the experiments of 2013 at 20 and 10 °C with water from Pukhta Bay: **а** – spring, **б** – summer; **в** – autumn.

Hereinafter below the figures – different BOD-curve equations; designations of BOD calculated curves and experimental data in fragments **б**, **в** and Fig. 3, 4, 7 – see fragment **а**

и осенью в виде интегральной пробы (из разных горизонтов от поверхности до дна), а весной – из горизонта 1 м (табл. 1). Кинетика БПК-экспериментов из КГ (рис. 3) при 20 °C отражена уравнениями EAL-типа в зимней, летней и осенней воде и EL-типа – в весенней воде, а при 10 °C – EAL-типа в зимней воде, EA-типа – в весенней и осенней воде и EL-типа – в летней воде.

При анализе полученных данных установлено, что такие параметры БПК (по E-типу), как  $k$ ,  $[O_2]'$

и  $v_1$ , для различных сезонов при 20 и 10 °C имеют близкие значения (табл. 2). Поэтому средние значения этих параметров могут служить своеобразной характеристикой сезонов года. Так,  $k$  были выше зимой и летом (соответственно 0,161 и 0,150 сут<sup>-1</sup>) и ниже весной и осенью (0,109 и 0,121 сут<sup>-1</sup>). Зимой, летом и осенью выявлены близкие значения  $[O_2]'$  – 0,355–0,530 мг O<sub>2</sub>/л и  $v_1$  – 0,0560–0,0819 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), а весной они были повышены и достигали соответственно 1,875 мг O<sub>2</sub>/л и 0,206 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).



**а)** 20 °С – EAL:  $BPK = 0,43 (1 - e^{-0,148t}) + (0,00537e^{0,130t} - 1) / (1 + 0,0122e^{0,130t}) + 0,0132t$   
 10 °С – EAL:  $BPK = 0,28 (1 - e^{-0,173t}) + (1,293 \cdot 10^{-4} e^{0,150t} - 1) / (1 + 5,623 \cdot 10^{-4} e^{0,150t}) + 0,00875t$

**в)** 20 °С – EAL:  $BPK = 0,63 (1 - e^{-0,175t}) + 4,04 \cdot 10^{-4} (e^{0,239t} - 1) / (1 + 7,31 \cdot 10^{-4} e^{0,239t}) + 0,0158t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,43 (1 - e^{-0,125t}) + 0,0133t$

**б)** 20 °С – EL:  $BPK = 1,95 (1 - e^{-0,130t}) + 0,0368t$   
 10 °С – EA:  $BPK = 1,80 (1 - e^{-0,0876t}) + (0,00312e^{0,123t} - 1) / (1 + 0,00177e^{0,123t})$

**г)** 20 °С – EAL:  $BPK = 0,57 (1 - e^{-0,150t}) + 3,01 \cdot 10^{-7} (e^{0,462t} - 1) / (1 + 9,12 \cdot 10^{-7} e^{0,462t}) + 0,0138t$   
 10 °С – EA:  $BPK = 0,30 (1 - e^{-0,0922t}) + 5,34 \cdot 10^{-4} (e^{0,211t} - 1) / (1 + 7,89 \cdot 10^{-4} e^{0,211t})$

Рис. 3. Развитие БПК в экспериментах 2013 г. при 20 и 10 °С с водой из Кондопожской губы.

Здесь и на рис. 4–6: **а** – зима; **б** – весна, **в** – лето; **г** – осень

Fig. 3. BOD-curves in the experiments of 2013 at 20 and 10 °С with water from Kondopoga Bay.

Here and in Fig. 4–6: **а** – winter, **б** – spring, **в** – summer, **г** – autumn

Развитие II-й стадии БПК (по А-типу) фиксировалось в зимней и осенней воде при 20 и 10 °С, в весенней – только при 10 °С, а в летней – только при 20 °С. Так, при 20 °С отмечены следующие значения кинетических параметров:  $w_2$  – 0,130 и 0,462 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и  $[O_2]''$  – 0,44 и 0,33 мг O<sub>2</sub>/л, а при 10 °С:  $w_2$  – 0,150 и 0,211 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и  $[O_2]''$  – 0,230 и 0,677 мг O<sub>2</sub>/л. Как видно, параметры II-й стадии БПК существенно отличались при разных температурах по сезонам года. В то же время значения предельного БПК были близки на I-й и II-й стадиях при 20 °С в зимней и летней воде, а при 10 °С – в зимней и весенней воде (табл. 2).

Весной значение предельного БПК в воде из горизонта 1 м было повышенным на I-й стадии БПК при 20 и 10 °С (соответственно 1,95 и 1,80 мг O<sub>2</sub>/л), а также на II-й стадии при 10 °С (1,76 мг O<sub>2</sub>/л), что служит доказательством и подтверждением лабильности свежееобразованного в весенний период автохтонного ОВ, на окисление которого расходуются повышенные количества растворенного O<sub>2</sub>. Есть и свои особенности изменения скоростей БПК на линейной стадии: значения  $\omega_s$  в зимней воде отличались при 20 и 10 °С и составили 0,0132 и 0,00875, а в летней были близки – 0,0158 и 0,0133 (в среднем 0,0146) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Весной и осенью при 20 °С скорость БПК достигала

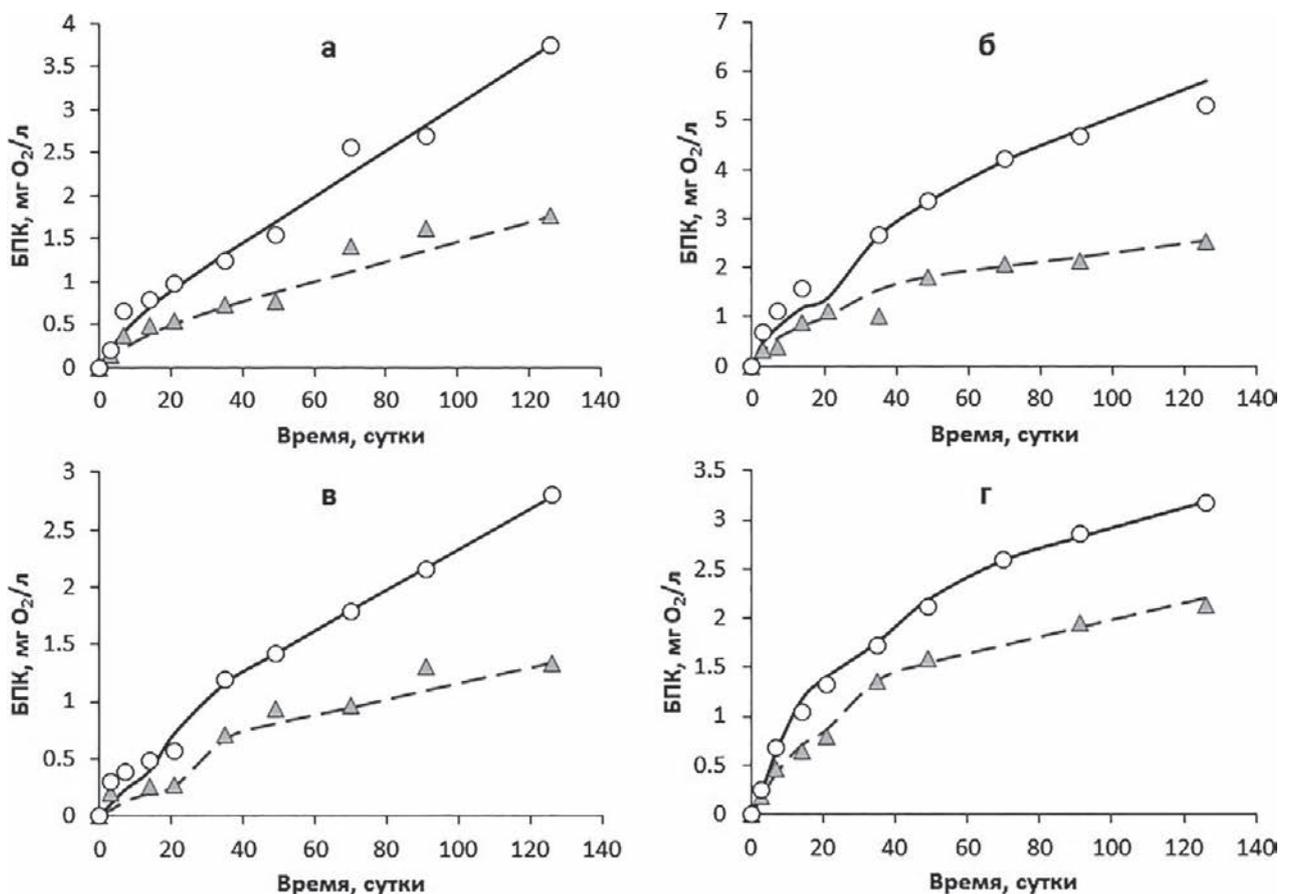
0,0368 и 0,0138 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Таким образом, наибольшая скорость БПК на линейной стадии отмечалась в весенней воде при 20 °С, тогда как в остальных экспериментах значения ω<sub>s</sub> были сопоставимы. Близкие значения скорости БПК при 20 °С в зимней, летней и осенней воде – свидетельство того, что в указанные сезоны интегральная проба воды, составленная из порций воды, отбираемых от поверхности до дна из разных горизонтов, содержит однотипное по свойствам ОВ, скорости окисления которого сопоставимы.

Следует отметить важный факт: весной при 10 °С и наличии в воде растворенного O<sub>2</sub> не зафиксировано его потребления после 70-х сут, а осенью – после 40-х сут (рис. 3). Так как при 10 °С во всех экспериментах с водой из других акваторий отмечалось развитие БПК, то причи-

на остановки развития БПК на линейной стадии должна исследоваться в специальных экспериментах.

*Серия 3: анализ данных экспериментов с водой из Петрозаводской губы (2013 г., зима, весна, лето, осень)*

Вода из ПГ для экспериментов отбиралась на станции Р2 из разных горизонтов от поверхности до дна в виде интегральной пробы (табл. 1). Развитие БПК в воде из ПГ при 20 и 10 °С представлено уравнениями EL-, EAL-, EAL- и AAL-типов соответственно зимой, весной, летом и осенью (рис. 4). При 20 и 10 °С в зимней воде из ПГ I-я стадия БПК развивается по E-типу, а в воде из устья РШ – по A-типу, в остальные сезоны типы уравнений для описа-



**а)** 20 °С – EL: БПК = 0,380 (1 – e<sup>-0,131t</sup>) + 0,0268 t  
 10 °С – EL: БПК = 0,320 (1 – e<sup>-0,0922t</sup>) + 0,0115 t

**в)** 20 °С – EAL: БПК = 0,22 (1 – e<sup>-0,101t</sup>) + 0,000623 (e<sup>0,302t</sup> – 1) / (1 + 0,00177e<sup>0,302t</sup>) + 0,0178 t  
 10 °С – EAL: БПК = 0,15 (1 – e<sup>-0,101t</sup>) + 5,22·10<sup>-8</sup> (e<sup>0,512t</sup> – 1) / (1 + 1,61·10<sup>-7</sup> e<sup>0,512t</sup>) + 0,0069 t

**б)** 20 °С – EAL: БПК = 1,50 (1 – e<sup>-0,103t</sup>) + 0,00391 (e<sup>0,119t</sup> – 1) / (1 + 0,0055e<sup>0,119t</sup>) + 0,0286 t  
 10 °С – EL: БПК = 0,79 (1 – e<sup>-0,139t</sup>) + 0,000576 (e<sup>0,226t</sup> – 1) / (1 + 0,00101e<sup>0,226t</sup>) + 0,00935 t

**г)** 20 °С – AAL: БПК = 0,254 (e<sup>0,225t</sup> – 1) / (1 + 0,221e<sup>0,225t</sup>) + 0,0046 (e<sup>0,124t</sup> – 1) / (1 + 0,00639 e<sup>0,124t</sup>) + 0,0105 t  
 10 °С – AAL: БПК = 0,169 (e<sup>0,281t</sup> – 1) / (1 + 0,264e<sup>0,281t</sup>) + 1,49·10<sup>-4</sup> (e<sup>0,286t</sup> – 1) / (1 + 3,10·10<sup>-4</sup> e<sup>0,286t</sup>) + 0,00857 t

Рис. 4. Развитие БПК в экспериментах 2013 г. при 20 и 10 °С с водой из Петрозаводской губы

Fig. 4. BOD-curves in the experiments of 2013 at 20 and 10 °С with water from Petrozavodsk Bay

ния I-й стадии БПК в этих смежных акваториях совпадали.

В экспериментах с водой при 20 °С БПК в зимней, весенней и летней воде на I-й стадии описано уравнением E-типа. Параметры БПК в зимней и летней воде были близки: значения  $k$  достигали 0,131 и 0,101 (в среднем 0,116) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,38 и 0,22 (0,30) мг O<sub>2</sub>/л, а  $v_1$  – 0,0498 и 0,0222 (0,0360) мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно. Отметим, что значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  весной были соответственно в 5 и 4,3 раза выше средних показателей для зимнего и летнего сезонов (табл. 2, рис. 4).

Также близки были значения параметров БПК зимой и летом при 10 °С. Так, среднее значение  $k$  составило 0,0966 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,24 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0223 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), и в целом они были ниже полученных весной в 1,4; 3,4 и 4,9 раза соответственно. Достаточно сходными были средние значения констант скорости БПК,  $k$ , зимой и летом при разных температурах (табл. 2), а значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  – выше весной (1,15 мг O<sub>2</sub>/л и 0,133 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно) и гораздо ниже летом ( $[O_2]'$  – 0,19 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0187 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)).

Осенью I-я стадия (по A-типу) отражена при 20 и 10 °С параметрами:  $w_1$  – 0,225 и 0,281 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]''$  – 1,149 и 0,64 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0657 и 0,0304 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

Развитие II-й стадии БПК (по A-типу) отмечено при 20 и 10 °С в весенней, летней и осенней воде. Значения параметров БПК при 20 °С меняются в пределах:  $w_2$  – 0,119–0,302 (в среднем 0,215) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]''$  – 0,352–0,72 (0,594) мг O<sub>2</sub>/л. Колебания параметров в экспериментах при 10 °С составляют:  $w_2$  – 0,226–0,512 (в среднем 0,341) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]''$  – 0,324–0,57 (0,458) мг O<sub>2</sub>/л. При 20 °С значения  $w_2$  были ниже, а  $[O_2]''$  – выше, чем при 10 °С.

Общие пределы изменения скорости БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , в разные сезоны 2013 г. составляли: при 20 °С – 0,0105–0,0286 (в среднем 0,0199) и при 10 °С – 0,0056–0,0115 (0,0091) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Повышенные значения  $\omega_s$  фиксировались весной (20 °С) и зимой (10 °С), а пониженные – осенью (20 °С) и летом (10 °С).

В воде смежной акватории, устьевой зоны РШ, за период опыта потребление O<sub>2</sub> было выше, чем в воде из ПГ: при 20 °С в зимней, весенней, летней и осенней воде превышение составило соответственно 2,2; 1,5; 2,8 и 2,2 раза, а при 10 °С – 2,6; 2,3; 7,9 и 1,9 раза. В воде из РШ при 20 °С в ходе эксперимента расходовался практически весь O<sub>2</sub> (7,08–8,20 мг O<sub>2</sub>/л), в весенней и летней воде это отмечено на 70-е и 21-е сут соответственно. При 10 °С весь O<sub>2</sub> расходовался за 126 сут только в летней воде

(10,53 мг O<sub>2</sub>/л), в другие сезоны расход O<sub>2</sub> в опытах составлял 3,80–5,86 мг O<sub>2</sub>/л.

*Серии 4 и 5: данные экспериментов при 10 и 2 °С с водой из акваторий Ивановских островов и Петрозаводской губы (2015 г., зима, весна, лето, осень)*

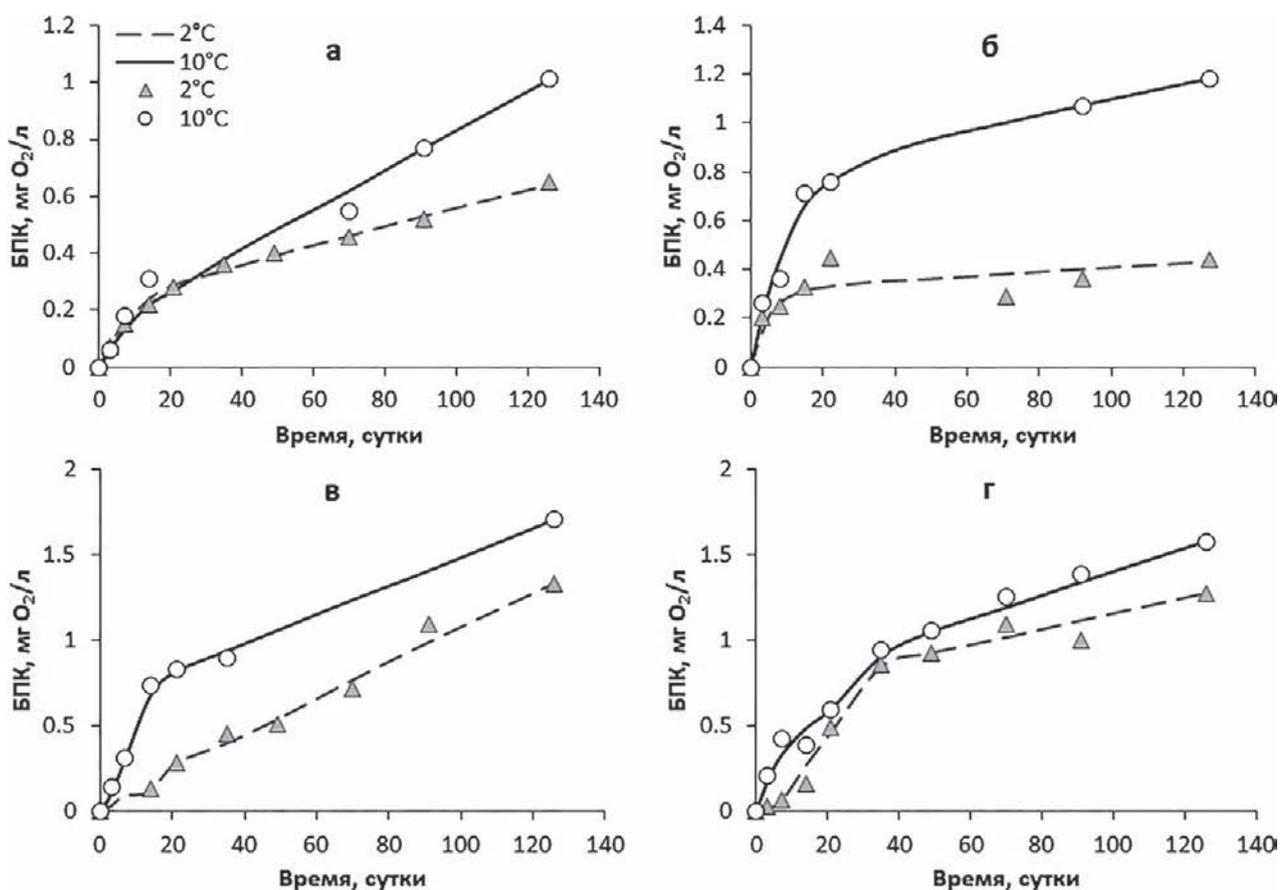
Эксперименты проводились с интегральными пробами, отбираемыми во все сезоны 2015 г. в акваториях ИО и ПГ (ст. P2) из всего столба воды (табл. 1). Полученные в экспериментах БПК-кривые и уравнения, их описывающие, показаны соответственно на рис. 5 и 6.

При 10 °С в зимней и весенней воде из указанных акваторий кинетика БПК представлена уравнениями EL- и AL-типа, а в экспериментах летом и осенью – соответственно уравнениями AL- и EAL-типа в воде из ИО и EAL- и AAL-типа в воде из ПГ. Наложение БПК-кривых друг на друга при 10 и 2 °С с начала экспериментов в зимней и весенней воде из акватории ИО – свидетельство близких свойств имеющегося в воде автотрофного ОВ к окислению при низких температурах (рис. 5, а, б).

Сравнение кинетических параметров показывает, что в воде из ИО при 10 °С развитие I-й стадии БПК (по E-типу) в зимней, весенней и осенней воде характеризуют близкие значения параметров  $k$  и  $v_1$ , которые в среднем составили соответственно 0,118 сут<sup>-1</sup> и 0,050 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

В результате экспериментов установлено, что типы БПК-кривых в разные сезоны в воде из ИО отличаются, поэтому значения предельного БПК I-й стадии  $[O_2]'$  изменялись в диапазоне 0,14–0,78 (в среднем 0,51) мг O<sub>2</sub>/л. В то же время скорости БПК на линейном участке для лета и осени при 10 °С были близки ( $\omega_s$  – 0,00838 и 0,0069, в среднем 0,0074 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)), хотя средняя скорость в 2,4 раза выше скорости, оцененной для весеннего периода.

Развитие I-й стадии БПК (по E-типу) в зимней, весенней и летней воде из ПГ (рис. 6) описывали значения  $k$  в диапазоне 0,111–0,115 (в среднем 0,114) сут<sup>-1</sup>, а в осенней воде (по A-типу)  $w_1$  – 0,360 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>. Значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  для указанных экспериментов были наименьшими в зимней воде (соответственно 0,16 мг O<sub>2</sub>/л и 0,0184 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)), для других сезонов пределы их колебаний составили соответственно 0,42–0,64 мг O<sub>2</sub>/л и 0,0428–0,0736 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Таким образом, в воде из ПГ пониженные значения параметров I-й стадии БПК наблюдались зимой, а повышенные – весной.



**а)** 10 °С – EL:  $BPK = 0,14 (1 - e^{-0,131t}) + 0,0069t$   
 2 °С – EL:  $BPK = 0,232 (1 - e^{-0,119t}) + 0,00325t$   
**в)** 10 °С – AL:  $BPK = 0,0552 (e^{0,315t} - 1) / (1 + 0,0849e^{0,315t}) + 0,00838t$   
 2 °С – AAL:  $BPK = 0,0116 (e^{0,305t} - 1) / (1 + 0,0892e^{0,305t}) + 6,53 \cdot 10^{-4} (e^{0,100t} - 1) / (1 + 0,00201e^{0,100t}) + 0,007t$

**б)** 10 °С – EL:  $BPK = 0,78 (1 - e^{-0,0922t}) + 0,00314t$   
 2 °С – EL:  $BPK = 0,313 (1 - e^{-0,175t}) + 0,00098t$   
**г)** 10 °С – EAL:  $BPK = 0,46 (1 - e^{-0,130t}) + 2,00 \cdot 10^{-4} (e^{0,247t} - 1) / (1 + 7,87 \cdot 10^{-4} e^{0,247t}) + 0,00692t$   
 2 °С – AAL:  $BPK = 0,00394 (e^{0,347t} - 1) / (1 + 0,0101e^{0,347t}) + 1,7910^{-7} (e^{0,510t} - 1) / (1 + 5,7710^{-7} e^{0,510t}) + 0,00461t$

Рис. 5. Развитие BPK в экспериментах 2015 г. при 10 и 2 °С с водой из акватории Ивановских островов.

Обозначения типов кривых BPK и данных опытов на фрагментах б–г и рис. 6 – см. фрагмент а

Fig. 5. BOD-curves in the experiments of 2015 at 10 and 2 °С with water from Ivanovskie Islands.

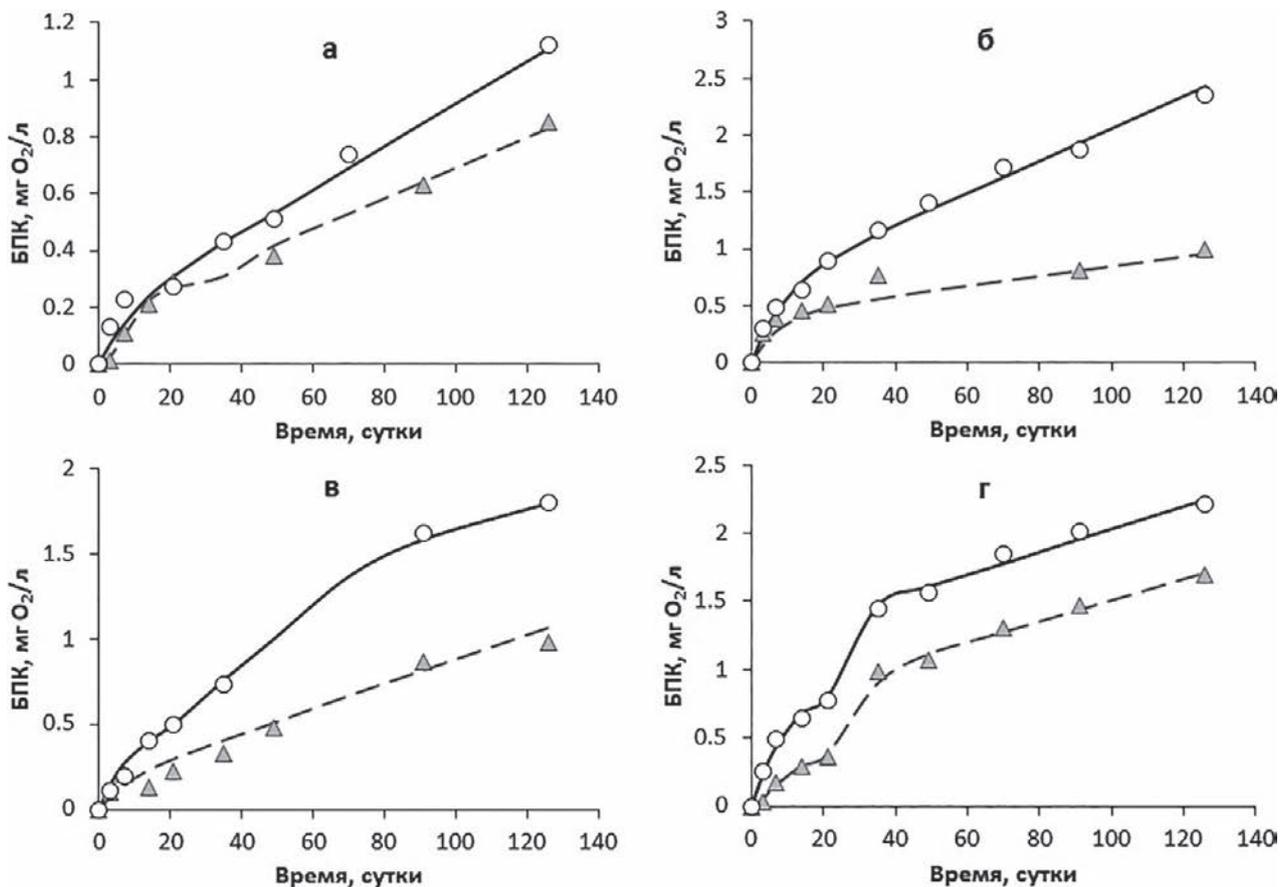
Designations of BOD calculated curves and experimental data in fragments б–г and Fig. 6 – see fragment а

Развитие II-й стадии BPK (по А-типу) в воде из ПГ при 10 °С, отмеченное в летней и осенней воде, характеризуют следующие значения параметров:  $w_2$  – 0,0771 и 0,0428 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,732 и 0,596 мг O<sub>2</sub>/л (рис. 6).

При 2 °С в экспериментах с водой из района ИО уравнение EL-типа отражало кинетику BPK в зимней и весенней воде, AAL-типа – в летней и осенней воде, а в опытах с водой из ПГ уравнения AL- и AAL-типа – в зимней и осенней воде, EL-типа – в весенней и летней воде. Зимой и весной в воде из ИО на I-й стадии (по Е-типу) получены близкие значения кинетических параметров  $k$  и  $v_1$  (в среднем 0,147 сут<sup>-1</sup> и 0,0412 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно), а летом и осенью (по А-типу) –  $w_1$  и  $v_1$  (в среднем 0,326 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и 0,0005 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответ-

ственно). Диапазон изменений предельного BPK,  $[O_2]'$ , на I-й стадии в разные сезоны варьировал в узких пределах 0,13–0,39 (в среднем 0,266) мг O<sub>2</sub>/л, а для II-й стадии в опытах с летней и осенней водой значения  $[O_2]''$  были близки и составляли соответственно 0,325 и 0,310 (в среднем 0,318) мг O<sub>2</sub>/л.

При 2 °С в воде из ПГ I-я стадия BPK (по А-типу) представлена в зимней и осенней воде близкими значениями параметров  $w_1$ ,  $[O_2]'$  и  $v_1$ , а их средние значения составили соответственно 0,322 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>, 0,18 мг O<sub>2</sub>/л и 0,0015 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). В весенней и летней воде развитие I-й стадии (по Е-типу) отражали параметры:  $k$  – 0,125 и 0,129 (в среднем 0,127) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,420 и 0,158 мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0525 и 0,0204 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) (табл. 2, рис. 6). Таким



- а)** 10 °C – EL:  $BPK = 0,16 (1 - e^{-0,115t}) + 0,0076 t$   
 2 °C – EL:  $BPK = 0,0154 (e^{-0,309t} - 1) / (1 + 0,0962e^{-0,309t}) + 0,00724 t$
- в)** 10 °C – EAL:  $BPK = 0,42 (1 - e^{-0,111t}) + 0,0115 (e^{0,0771t} - 1) / (1 + 0,0157 e^{0,0771t}) + 0,00514 t$   
 2 °C – EL:  $BPK = 0,158 (1 - e^{-0,129t}) + 0,00724 t$

- б)** 10 °C – EL:  $BPK = 0,64 (1 - e^{-0,115t}) + 0,0142 t$   
 2 °C – EL:  $BPK = 0,42 (1 - e^{-0,125t}) + 0,00429 t$

- г)** 10 °C – AAL:  $BPK = 0,198 (e^{0,360t} - 1) / (1 + 0,330e^{0,360t}) + 1,09 \cdot 10^{-6} (e^{0,481t} - 1) / (1 + 1,83 \cdot 10^{-6} e^{0,481t}) + 0,00835 t$   
 2 °C – AAL:  $BPK = 0,034 (e^{0,334t} - 1) / (1 + 0,170e^{0,334t}) + 5,53 \cdot 10^{-4} (e^{0,169t} - 1) / (1 + 1,01 \cdot 10^{-3} e^{0,169t}) + 0,0078 t$

Рис. 6. Развитие БПК в экспериментах 2015 г. при 10 и 2 °C с водой из Петрозаводской губы

Fig. 6. BOD-curves in the experiments of 2015 at 10 and 2 °C with water from Petrozavodsk Bay

образом, по результатам обработки близки только значения  $k$  для I-й стадии, а значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  соответственно в 2,7 и 2,6 раза выше в весенней воде. Значение  $[O_2]'$  для I-й стадии в летней воде сопоставимо со значениями в зимней и осенней воде, а в весенней – параметры  $[O_2]'$  и  $v_1$  I-й стадии наибольшие в этой серии экспериментов.

Значения параметров II-й стадии при 2 °C в осенней воде из ПГ не сильно отличались от полученных при 10 °C. Это служит косвенным подтверждением близкой лабильности остаточных компонентов ОВ в осенней воде, продолжающих участвовать в окислении при низких температурах. В воде, взятой из района ИО в разные сезоны, скорости БПК на линейном участке,  $\omega_s$ , меняются зимой, летом и осенью в диапазоне 0,00325–0,00829

(в среднем 0,0054) мг  $O_2$ /(л·сут), а в весенней воде значение  $\omega_s$  было наименьшим (0,00098 мг  $O_2$ /(л·сут)), в 5,4 раза ниже полученного среднего значения для других сезонов (ранее показано, что при 10 °C это отличие составляло 2,4 раза).

Оцененные в экспериментах из ПГ скорости БПК на линейной стадии при 10 и 2 °C были довольно близки и составили в среднем зимой 0,0068, весной – 0,0092, летом – 0,0062 и осенью – 0,0081 мг  $O_2$ /(л·сут), при этом значения почти всегда были выше при 10 °C (исключение – летний период). Наибольшее значение  $\omega_s$  в этой серии при 10 °C отмечено в весенней воде (0,0142 мг  $O_2$ /(л·сут)), а наименьшее – летом (0,00514).

Серия экспериментов 2015 г. при 10 и 2 °C показала, что в весенней воде значения кине-

тических параметров БПК I-й стадии в целом были выше в сравнении с показателями для других сезонов. Также долгосрочные эксперименты по БПК в осенней воде выявили практически одинаковую способность к окислению остаточных концентраций ОВ, еще сохраняющих способность к окислению при низких температурах воды.

*Серия 6: анализ данных экспериментов с водой из Петрозаводской губы (2016 г., зима, весна, осень, и 2017 г., зима, весна)*

Пробы воды для экспериментов отбирались из ПГ на станции Р2 в двух режимах: от поверхности до дна зимой и весной 2016 г. и зимой 2017 г., а также из поверхностного слоя осенью 2016 г. и весной 2017 г. (табл. 1). Эксперименты выполнялись одновременно при 20 и 10 °С (рис. 7).

В экспериментах с водой из ПГ развитие БПК при 20 °С отражено уравнениями: EAL-типа – зима 2016 г. и весна 2016 и 2017 гг., AL-типа – осень 2016 г. и EL-типа – зима 2017 г.; а при 10 °С – уравнениями EL-типа – зима 2016 и 2017 гг. и весна 2017 г.; AL-типа – весна и осень 2016 г.

Сравнение результатов экспериментов зимой 2013, 2016 и 2017 гг. показало для I-й стадии БПК при 20 °С практически одинаковые значения  $k$  (0,131–0,138, в среднем 0,136 сут<sup>-1</sup>), а также отличающиеся значения  $[O_2]'$  (0,38; 3,34 и 0,39 мг O<sub>2</sub>/л) и  $v_1$  (0,0498; 0,4600 и 0,0538 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)) с превышением значений  $[O_2]'$  и  $v_1$  ~ в 10 раз в 2016 г. При 10 °С такие отличия в значениях параметров I-й стадии БПК не фиксировались и, напротив, кинетику БПК описывали близкие по значениям параметры:  $k$  – 0,091–0,097 (в среднем 0,093) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,23–0,50 (0,35) мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0223–0,0455 (0,0324) мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

В экспериментах с весенней водой при 20 °С в 2013, 2016 и 2017 гг. выявлены для I-й стадии близкие значения параметров БПК:  $k$  – 0,0988–0,120 (в среднем 0,107) сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,00–1,50 (1,17) мг O<sub>2</sub>/л,  $v_1$  – 0,0988–0,155 (0,125) мг O<sub>2</sub>/(л·сут). При 10 °С кинетика I-й стадии БПК (по А- и Е-типам) характеризовалась близкими значениями  $[O_2]'$  для указанных выше лет (0,79; 0,815 и 0,85; в среднем 0,82 мг O<sub>2</sub>/л).

В осенней воде в 2016 г. развитие БПК (по А-типу) на I-й стадии при 20 и 10 °С выражалось параметрами:  $w_1$  – 0,363 и 0,339 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,691 и 1,087 мг O<sub>2</sub>/л, а  $v_1$  – 0,314 и 0,150 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

Значения скоростей БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , в экспериментах 2013, 2016 и 2017 гг. при разных температурах инкубации воды оказались сопоставимыми (табл. 2). Так, средние значения  $\omega_s$  при 20 и 10 °С зимой составили 0,0289 и 0,0145, а весной – 0,0251 и 0,0115 мг O<sub>2</sub>/(л·сут) соответственно. В осенней воде при 20 и 10 °С значения  $\omega_s$  в 2016 г. были близки к средним весенним и составили соответственно 0,0247 и 0,0121 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), а в 2013 г. они были гораздо ниже и достигали 0,0105 и 0,00857 мг O<sub>2</sub>/(л·сут).

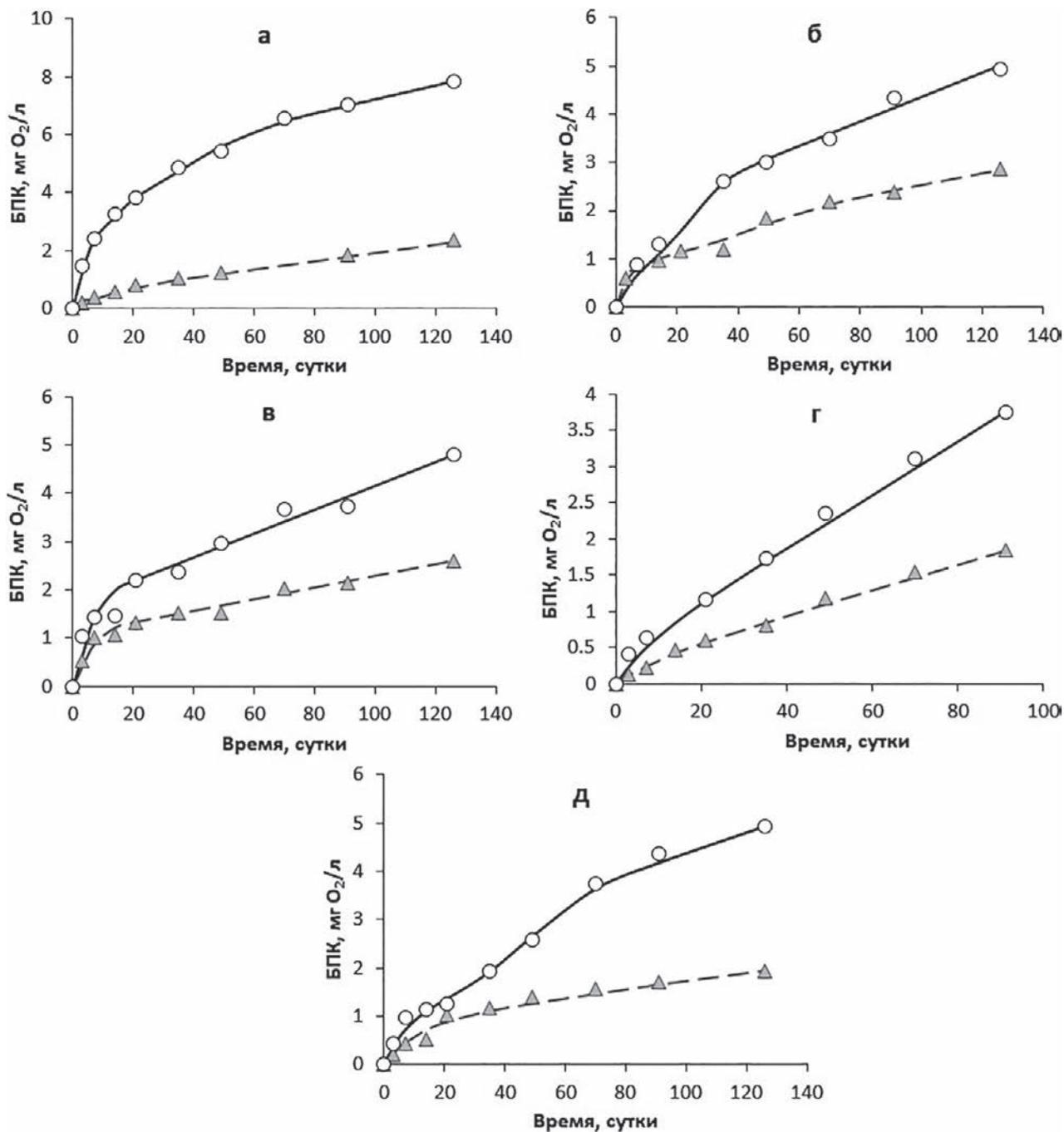
Средние значения  $\omega_s$  для разных лет и сезонов без учета экстремально низких значений в 2013 г. при 20 и 10 °С составили соответственно 0,0265 и 0,0110 мг O<sub>2</sub>/(л·сут), показывая превышение значений  $\omega_s$  при 20 °С в среднем в 2,4 раза.

Следует отметить выявленные противоположные тенденции в изменении параметра  $[O_2]'$  на I-й стадии БПК в водах соседних акваторий (устьевой зоне РШ и ПГ) в зависимости от температуры инкубации воды и в разные сезоны в два смежных года (2016 и 2017 гг.). При 20 °С: в 2016 г. значение  $[O_2]'$  в воде из устья РШ в 1,4 раза выше в весенней воде, а в воде из ПГ, напротив, значение  $[O_2]'$  в 3,3 раза выше в зимней воде; в 2017 г. значение  $[O_2]'$  в воде из устья РШ было в 2,7 раза выше в зимней воде, а в воде из ПГ – в 2 раза выше в весенней воде. При 10 °С тенденции изменения  $[O_2]'$  в устье РШ и ПГ были одинаковы: весной 2016 г. значение  $[O_2]'$  было соответственно в 1,3 и 1,6 раза, а 2017 г. – в 2,0 и 3,7 раза выше, чем зимой.

#### *Сопоставление значений показателей ОВ и параметров кинетики БПК*

Содержание и состав компонентов ОВ в природных водах обычно используются для оценки состояния водной экосистемы, так как они зависят от ряда факторов, среди которых особенно важными являются трофность и гумусность вод, интенсивность продукционно-деструкционных процессов, речного стока и антропогенного влияния на водную среду. За последние годы на разных акваториях Онежского озера выполнено значительное количество измерений общего содержания ОВ. Кроме того, проведена количественная оценка компонентов автохтонного и аллохтонного ОВ, а также установлены соотношения между ними и возможности изменения их концентраций в процессе трансформации в водной среде [Ефремова, Зобкова, 2019].

Параллельно с БПК-экспериментами в 2013, 2016 и 2017 гг. при 20 °С в пробах воды анали-



- а)** 20 °С – EAL:  $BPK = 3,335 (1 - e^{-0,138t}) + 0,0417 (e^{0,0935t} - 1) / (1 + 0,0263 e^{0,0935t}) + 0,0228 t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,500 (1 - e^{-0,091t}) + 0,0142 t$
- б)** 20 °С – EAL:  $BPK = 1,00 (1 - e^{-0,0988t}) + 0,00144 (e^{0,236t} - 1) / (1 + 0,0017 e^{0,236t}) + 0,0254 t$   
 10 °С – EAL:  $BPK = 0,85 (1 - e^{-0,247t}) + 0,0077 (e^{0,0911t} - 1) / (1 + 0,016 e^{0,0911t}) + 0,0121 t$
- в)** 20 °С – AL:  $BPK = 0,511 (e^{0,363t} - 1) / (1 + 0,302 e^{0,363t}) + 0,0247 t$   
 10 °С – AL:  $BPK = 0,408 (e^{0,339t} - 1) / (1 + 0,375 e^{0,339t}) + 0,0121 t$
- г)** 20 °С – EL:  $BPK = 0,39 (1 - e^{-0,138t}) + 0,037 t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,23 (1 - e^{-0,0968t}) + 0,0177 t$
- д)** 20 °С – EAL:  $BPK = 1,00 (1 - e^{-0,120t}) + 0,0033 (e^{0,120t} - 1) / (1 + 0,00266 e^{0,120t}) + 0,0214 t$   
 10 °С – EL:  $BPK = 0,85 (1 - e^{-0,0876t}) + 0,00867 t$

Рис. 7. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10 °С с водой из Петрозаводской губы в 2016 г.: а – зима, б – весна, в – осень и в 2017 г.: г – зима, д – весна

Fig. 7. BOD-curves in the experiments at 20 and 10 °С with water from Petrozavodsk Bay in 2016: а – winter, б – spring, в – autumn; and in 2017: г – winter, д – spring

тически определяли показатели содержания ОВ ( $C_{орг}$ , ПО, ХПК) и по эмпирическим уравнениям вычисляли значения отдельных компонентов ОВ:  $C_{лаб}$ ,  $C_{стаб}$ ,  $ОВ_{\Sigma}$  и  $ОВ_{стаб}$  (табл. 3).

Все измеренные в разные сезоны показатели ОВ оказались повышенными в водах из устья РШ: зимой, весной, летом и осенью средние значения  $C_{орг}$  составили 17,9; 14,7; 15,0 и 12,9 мг С/л, а ПО – 22,6; 20,3; 15,1 и 14,1 мг О/л соответственно. В отдельных акваториях Онежского озера концентрации  $C_{орг}$  в эти же сезоны были ниже, чем в речных водах, и в среднем составили 10,2; 9,9; 7,1 и 8,2 мг С/л, а ПО – 11,7; 9,9; 7,4 и 11,1 мг О/л соответственно. В целом наибольшие значения измеренных параметров ОВ зафиксированы в зимней воде, а наименьшие – в летней. Разность значений  $ХПК_0 - ХПК_{126}$ , которая характеризует потенциал окисления условно «стойкой» фракции ОВ, составила в среднем в зимней, весенней, летней и осенней воде из устья РШ соответственно 11,5; 14,7; 18,4 и 10,9 мг О/л, а по акваториям Онежского озера – 6,7; 12,2; 3,0 и 6,4 мг О/л. Среднее значение  $ХПК_0 - ХПК_{126}$  было максимальным в воде из устья РШ летом, а в разных акваториях Онежского озера – весной.

В воде из разных районов Онежского озера расчетные значения содержания С в лабильной и условно «стойкой» фракциях ОВ в среднем составили соответственно зимой – 0,34 и 9,81, весной – 0,38 и 9,53, летом – 0,15 и 6,92 и осенью – 0,28 и 7,92 мг С/л. В воде из устья РШ средние значения этих компонентов ОВ были намного выше, чем в озере: зимой – 0,61 и 17,26, весной – 0,68 и 14,06, летом – 2,39 и 12,61 и осенью – 0,26 и 12,54 мг С/л. Таким образом, повышено содержание С в лабильной фракции ОВ в акваториях Онежского озера весной (0,38 мг С/л), а в воде из устьевой зоны РШ – летом (2,39 мг С/л). В условно «стойкой» фракции повышение концентраций С для речных и озерных вод отмечалось зимой и составляло 9,81 и 17,26 мг С/л соответственно. В то же время пониженное содержание С в лабильной и условно «стойкой» фракциях зафиксировано в летней воде из Онежского озера (соответственно 0,15 и 6,92 мг С/л), а в воде из устья РШ – осенью (0,36 и 12,54 мг С/л).

Средние расчетные концентрации  $ОВ_{\Sigma}$  и  $ОВ_{стаб}$  в воде из разных акваторий Онежского озера составляли зимой – 4,72 и 4,56, весной – 4,61 и 4,43, летом – 3,28 и 3,22 и осенью – 3,82 и 3,68 мг/л. В воде из устья РШ значения этих показателей зимой – 8,25 и 8,03, весной – 6,85 и 6,54, летом – 6,98 и 5,86 и осенью – 6,00 и 5,83 мг/л. Таким образом, в водах акваторий

Онежского озера и устья РШ зимой расчетные суммарные концентрации  $ОВ_{\Sigma}$  и  $ОВ_{стаб}$  повышены, а летом и осенью понижены.

Надо отметить, что по всем показателям содержания ОВ, в том числе лабильных и условно «стойких» компонентов, наблюдались более высокие значения для воды из устья РШ, чем для озерных вод (табл. 3). Это, по-видимому, связано с тем, что река является мезополигумусным эвтрофным водным объектом.

Для проверки соответствия компонентов ОВ кинетическим параметрам БПК использованы приведенные в работе [Ефремова, Зобкова, 2019] данные по содержанию лабильных компонентов (углеводов, липидов и белков), а также ГВ (сравнительно «стойких» к биохимическому окислению компонентов ОВ) в воде, использованной также и в БПК-опытах. Данные были получены в пробах воды из поверхностного горизонта (1 м) в ЦП Онежского озера и ПГ (осень 2016 г., зима и весна 2017 г.), а также из устьевой зоны РШ (зима, весна 2017 г.).

На рис. 8 показаны полученные зависимости между значениями лабильных компонентов ОВ (углеводов, липидов и белков) и потреблением  $O_2$  на I-й и II-й стадиях (а), между показателями ОВ, характеризующими окисление условно «стойких» ГВ и косвенных показателей ОВ ( $ХПК_0$ ) с общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s \cdot 126$  (б, в), а также между скоростными параметрами изменений значений стойких компонентов ОВ ( $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$ ) и потреблением  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s$ ). По каждой группе взаимодействующих показателей ОВ с кинетическими параметрами БПК получено по три зависимости, характеризующие высокосignификантными значениями коэффициентов детерминации  $R^2$  (рис. 8). Зависимости I и III на рис. 8 (а) формируют показатели ОВ и параметры I-й стадии БПК для разных сезонов и акваторий: в верхней части на этих зависимостях повышены значения показателей для устья РШ (зима 2017 г.), в центральной – средние значения показателей ПГ (осень 2016 г.), а в нижней – пониженные значения для ЦП (зима, весна 2017 г.). Для зависимости II верхнюю часть определяют высокие показатели ОВ и потребления  $O_2$  на II-й стадии, характеризующие акватории устья РШ (зима 2017 г.) и ПГ (весна 2017 г.), а в ее нижней части сосредоточены наименьшие значения показателей акватории ЦП (осень 2016 г.).

На рис. 8 (б) четко прослеживаются три зоны с характерными значениями ГВ: повышенными для устья РШ (33 мг О/л), средними для ПГ (16,8–18,3 мг О/л) и низкими для ЦП (7,2–12,0 мг О/л). Зависимость I при 20 °С вы-

Таблица 3. Сводная таблица показателей ОБ в воде из разных акваторий Онежского озера в 2013, 2016 и 2017 гг.

Table 3. Summary table of organic matter concentrations in water from different areas of Lake Onego in 2013, 2016 and 2017

Сезон Season	Район озера, год (тип отбора пробы) Lake area, year (sampling type)	Аналитические измерения Analytical measurements					По эмпирическим связям Calculated characteristics			
		C <sub>орг'</sub> , мг С/л ТОС, mg/l	ПО, мг О/л COD <sub>Mn'</sub> , mg O/l	ХПК <sub>0</sub> COD <sub>Cr0</sub>	ХПК <sub>49</sub> COD <sub>Cr49</sub>	ХПК <sub>126</sub> COD <sub>Cr126</sub>	C <sub>лаб</sub> C <sub>lab</sub>	C <sub>стаб</sub> C <sub>stab</sub>	ОБ <sub>Σ</sub> OM <sub>Σ</sub>	ОБ <sub>стаб</sub> OM <sub>stab</sub>
				мг О/л mg O/l			мг С/л mg C/l		мг/л mg/l	
Зима Winter	РШ / RS, 2013 (1)	17,0	23,7	45,9	37,4*	33,7	0,41	16,60	7,91	7,72
	ПГ / PB, 2013 (2)	8,6	9,5	21,3	18,8*	18,4	0,11	8,49	4,00	3,95
	КГ / KB, 2013 (2)	7,9	8,5	20,6	-	17,6	0,13	7,77	3,67	3,61
	ПГ / PB, 2016 (2)	12,7	15,4	37,8	-	-	1,00	11,70	5,91	5,44
	РШ / RS, 2016 (1)	18,0	21,5	51,3	-	-	0,60	17,40	8,37	8,09
	ПГ / PB, 2017 (2)	11,4	13,2	29,5	28,0	25,7	0,12	11,28	5,30	5,25
	РШ / RS, 2017 (1)	18,6	22,6	49,0	45,6*	40,6	0,83	17,78	8,65	8,27
Весна Spring	РШ / RS, 2013 (1)	11,8	19,7	33,4	28,5	25,5	0,90	10,90	5,49	5,07
	ПГ / PB, 2013 (2)	10,0	12,7	24,4	22,4	16,5	0,45	9,55	4,65	4,44
	КГ / KB, 2013 (1)	7,8	11,3	24,0	19,3	14,8	0,59	7,22	3,63	3,36
	ПХ / PkВ, 2013 (1)	8,3	8,9	19,8	18,6	11,1	0,24	8,06	3,86	3,75
	ПГ / PB, 2016 (2)	10,7	12,2	29,6	-	-	0,30	10,40	4,98	4,84
	РШ / RS, 2016 (1)	16,2	19,7	42,4	-	-	0,83	15,38	7,54	7,15
	ПГ / PB, 2017 (1)	12,7	16,5	33,8	-	-	0,30	12,40	5,91	5,77
РШ / RS, 2017 (1)	16,2	21,6	44,9	-	-	0,30	15,90	7,53	7,40	
Лето Summer	РШ / RS, 2013 (1)	15,0	15,1	38,5	25,9	20,1	2,39	12,61	6,98	5,86
	ПГ / PB, 2013 (2)	7,3	7,6	15,4	13,7	13,4	0,07	7,23	3,39	3,37
	КГ / KB, 2013 (2)	6,2	8,2	18,3	16,8	12,9	0,19	6,01	2,63	2,80
	ПХ / PkВ, 2013 (1)	7,7	6,4	20,1	20,8	18,5	0,18	7,52	3,58	3,50
Осень Autumn	РШ / RS, 2013 (1)	12,9	14,1	30,8	20,3	19,9	0,36	12,54	6,00	5,83
	ПГ / PB, 2013 (2)	7,2	7,8	17,8	18,7	16,0	0,35	6,86	3,35	3,19
	КГ / KB, 2013 (2)	8,0	8,0	17,4	14,3	14,0	0,17	7,83	3,72	3,64
	ПХ / PkВ, 2013 (1)	6,7	7,8	16,2	13,0	10,3	0,10	6,61	3,12	3,07
	ПГ / PB, 2016 (1)	10,9	13,6	27,8	-	-	0,51	10,39	5,07	4,83

Примечание. РШ – река Шуя; \* соответствует времени t = 70 сут.; прочерк – отсутствие данных.

Note. COD<sub>Cr0</sub>, COD<sub>Cr49</sub>, COD<sub>Cr126</sub> – chemical oxygen demand at 0, 49 and 126 days; COD<sub>Mn</sub> – permanganate oxidizability; TOC – total organic carbon; C<sub>lab</sub> – labile carbonate; C<sub>stab</sub> – stable carbonate; OM<sub>Σ</sub> – organic matter amount; OM<sub>stab</sub> – stable organic matter; RS – River Shuya; \* correspond with time = 70 days. The dash is the absence of data.

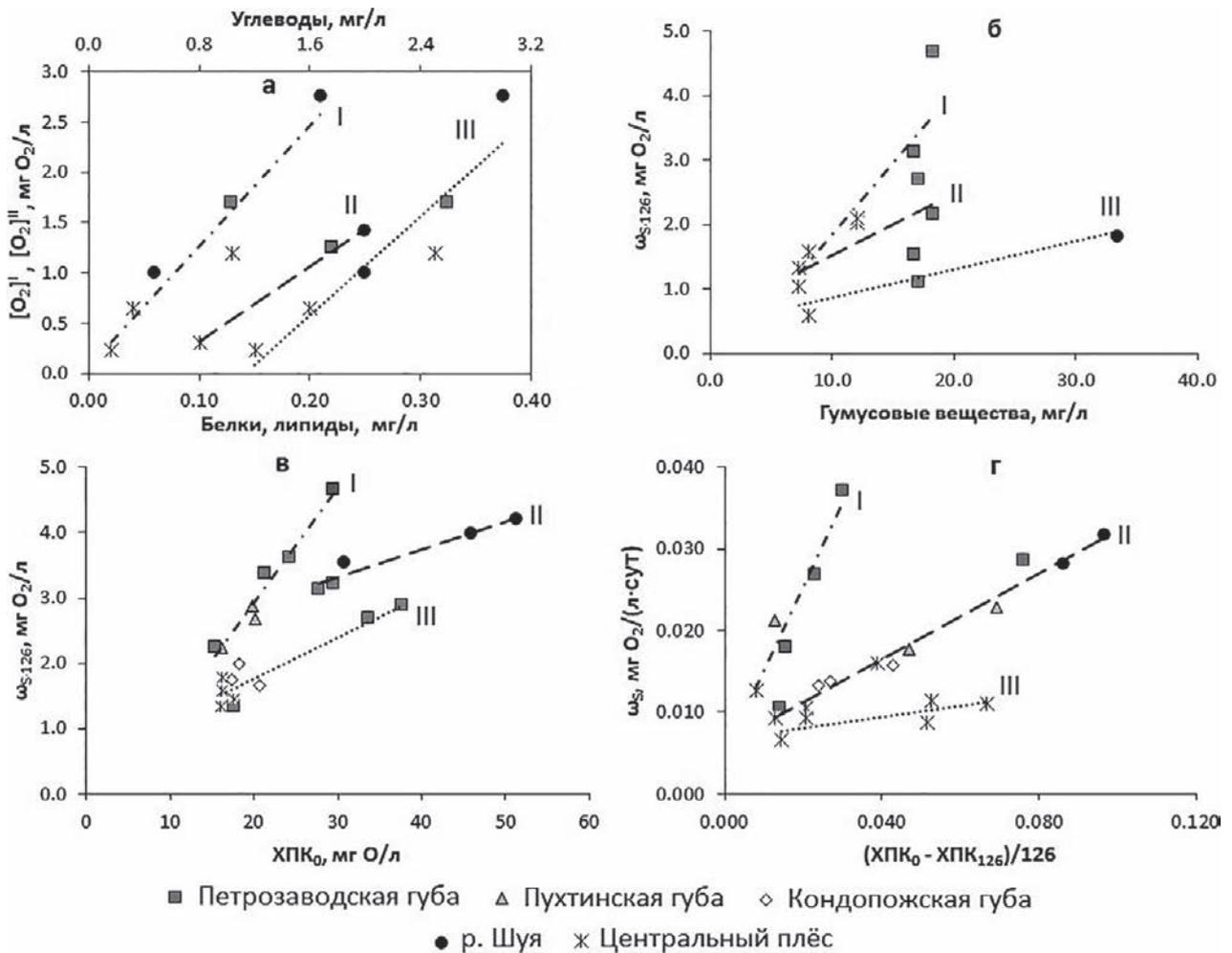


Рис. 8. Соответствие значений показателей ОВ и кинетических параметров БПК.

**а** – зависимости I–III между начальными концентрациями лабильных компонентов ОВ (Б – белки, Л – липиды и У – углеводы) и потреблением  $O_2$  на I-й и II-й стадиях:

- I.  $[O_2]^I$  мг  $O_2$ /л =  $11,941 \cdot [Б] + 0,0834$  ( $R^2 = 0,93$ )
- II.  $[O_2]^II$  мг  $O_2$ /л =  $7,4952 \cdot [Л] - 0,4344$  ( $R^2 = 1,00$ )
- III.  $[O_2]^I$  мг  $O_2$ /л =  $1,2249 \cdot [У] - 1,3753$  ( $R^2 = 0,87$ )

**б** – зависимости I–III между содержанием ГВ и общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126$ ) при разных температурах:

- I. При 20 °C:  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,2201 \cdot [ГВ] - 0,3454$  ( $R^2 = 0,77$ )
- II. При 10 °C (б):  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,0942 \cdot [ГВ] + 0,5859$  ( $R^2 = 0,71$ )
- III. При 10 °C (а):  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,0442 \cdot [ГВ] + 0,4201$  ( $R^2 = 0,79$ )

**в** – зависимости I–III между исходными значениями  $XPK_0$  и общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s \cdot 126$ :

- I.  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,1758 \cdot [XPK_0] - 0,5899$  ( $R^2 = 0,97$ )
- II.  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,043 \cdot [XPK_0] + 2,0191$  ( $R^2 = 0,93$ )
- III.  $\omega_s \cdot 126$  мг  $O_2$ /л =  $0,0625 \cdot [XPK_0] + 0,5212$  ( $R^2 = 0,85$ )

**г** – зависимости I–III между скоростями изменения условно «стойких» компонентов ОВ ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) и потребления  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s$ :

- I.  $\omega_s$ , мг  $O_2$ /(л·сут) =  $1,0211 \cdot ([XPK_0 - XPK_{126}]/126) + 0,0048$  ( $R^2 = 0,93$ )
- II.  $\omega_s$ , мг  $O_2$ /(л·сут) =  $0,2611 \cdot ([XPK_0 - XPK_{126}]/126) + 0,0060$  ( $R^2 = 0,98$ )
- III.  $\omega_s$ , мг  $O_2$ /(л·сут) =  $0,0658 \cdot ([XPK_0 - XPK_{126}]/126) + 0,0068$  ( $R^2 = 0,60$ )

Fig. 8. Correspondence of organic matter concentrations and kinetic BOD parameters: **а** – linear connections I–III between initial labile OM concentrations (Б – proteins, Л – lipids and У – carbohydrates) and  $O_2$  demand at first and second stages; **б** – linear connections I–III between humic substances (ГВ) concentrations and common  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s \cdot 126$ ) at different temperatures; **в** – linear connections I–III between initial  $XPK_0$  values and common  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s \cdot 126$ ); **г** – linear connections I–III between the rate of change conditionally «stable» OM components ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) and  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s$ )

деляется наиболее резким изменением значений показателей ГВ (в пределах 10–20 мг О<sub>2</sub>/л) и общего потребления О<sub>2</sub> на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126$  от 1 до 4,7 мг О<sub>2</sub>/л). При 10 °С фиксируются разные изменения показателей: для зависимости II они менее значимы ( $\omega_s \cdot 126$  в пределах от 1 до 2 мг О<sub>2</sub>/л), а для зависимости III характерны большие изменения концентраций ГВ (до 33 мг О/л) при меньшей изменчивости  $\omega_s \cdot 126$  (от 1 до 1,5 мг О<sub>2</sub>/л).

На рис. 8 (в) четко выявляются три зоны характерных исходных значений ХПК<sub>0</sub>. В зоне 1 в нижней части зависимостей I и III (КГ – лето, осень 2013 г.; ЦП – лето, осень, 2013, 2014 гг.) отмечены наименьшие значения ХПК<sub>0</sub> (16–22 мг О/л) при изменении  $\omega_s \cdot 126$  в пределах 1–3 мг О<sub>2</sub>/л. В зоне 2 значения ХПК<sub>0</sub> составляли 20–40 мг О/л и включали среднюю часть зависимости I (ПГ – зима, весна, 2013 г.), нижнюю часть зависимости II (ПГ – весна, осень 2016 г.; устье РШ – осень 2013 г.) и верхнюю часть зависимости III (ПГ – зима 2016 г., весна 2017 г.) при изменении  $\omega_s \cdot 126$  в диапазоне 2,5–3,5 мг О<sub>2</sub>/л. В зоне 3 значение данного параметра достигало 30–50 мг О/л и включало верхние участки зависимостей I (ПГ – зима 2017 г.) и II (устье РШ – зима 2013, 2016 гг.) при изменении  $\omega_s \cdot 126$  в пределах 4,0–4,7 мг О<sub>2</sub>/л.

На рис. 8 (г) зависимость I построена преимущественно по данным для ПГ (зима 2017 г., зима, весна, лето 2013 г.) и включает диапазоны изменений параметров  $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$  (от 0,01 до 0,03) и  $\omega_s$  (от 0,010 до 0,037). Зависимость II включает результаты анализа вод из горизонта 1,0 м для устья РШ (зима, осень 2013 г.), ПГ, ПХ (весна, осень 2013 г.), КГ (зима, весна, лето 2013 г.), ЦП (весна 2013 г., лето 2014 г., зима 2017 г.), при этом значения  $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$  изменяются в пределах от 0,02 до 0,10, а  $\omega_s$  – от 0,010 до 0,030 мг О<sub>2</sub>/(л·сут). Зависимость III построена по данным анализа воды из ЦП (лето, осень 2013 г., весна, осень 2014 г.) и включает значения  $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$  от 0,02 до 0,07 и  $\omega_s < 0,010$  мг О<sub>2</sub>/(л·сут). Важным обстоятельством, которое следует отметить по зависимостям на рис. 8 (г), является повышение скорости потребления О<sub>2</sub> на линейной стадии с ростом скорости изменения условно «стойких» компонентов ОВ ( $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$ ). Хотя скорость трансформации ГВ, которые относятся к этим компонентам, крайне мала и слабо изменяется в различные сезоны года [Лозовик и др., 2017]. Возможно, это связано с влиянием взвешенного ОВ, которое увеличивается в водоемах с выраженным трофическим статусом

и играет важную роль во время трансформации ОВ [Ostapenia et al., 2009; Верес, Остапеня, 2011].

Общий анализ данных на рис. 8 позволяет выделить следующие закономерности: в зону 1 на рис. 8 (б–г) попадают в основном низкопродуктивные акватории Онежского озера (ЦП и КГ), а иногда ПХ (мелководная губа с хорошим водообменом) и ПГ в летне-осенний период, когда гидрохимические характеристики вод в ПГ и ЦП близки. В промежуточной зоне 2 расположены в основном участки ПГ и ПХ, которые более продуктивны в сравнении с открытыми районами Онежского озера. В третью зону попадают наиболее продуктивные устьевые участки РШ и ПГ в весенний и зимний периоды, когда вода в губе по гидрохимическим показателям близка к воде из устья РШ.

## Заключение

Данные длительных экспериментов получены при исследовании кинетики БПК в пробах воды из разных акваторий Онежского озера: в воде из ПХ, КГ, ПГ и устьевой зоны РШ в 2013, 2016 и 2017 гг. при 20 и 10 °С, а в воде из ПГ и района ИО – в 2015 г. при 10 и 2 °С. Всего проведено 48 экспериментов при разных температурах в различные сезоны года. Полученные в ходе экспериментов параметры довольно точно описывают изменения во времени значений БПК.

При анализе БПК-данных установлено, что значения кинетических параметров, как правило, были выше в экспериментах при более высоких температурах, чем при более низких. Однако в ряде экспериментов обнаружено одинаково активное развитие БПК при разных температурах в период первых 20 сут, и при этом значения параметров БПК в уравнениях оказывались достаточно близкими. Из всех серий экспериментов, выполненных для разных акваторий Онежского озера, получены среднесезонные значения кинетических параметров БПК. Надо отметить, что в этом анализе не использованы данные для устья РШ, которые отличались повышенными значениями параметров БПК (при этом не учитывались повышенные значения параметров, полученные в экспериментах с водой из устья РШ).

В зимних экспериментах при 20 и 10 °С развитие I-й стадии БПК воспроизводилось уравнением E-типа, и только в воде из ПГ при 2 °С в 2015 г. развитие БПК следовало уравнению A-типа. В то же время выявлено, что кинетика БПК (по E-типу) на I-й стадии практически не отличалась при 10 и 2 °С.

Так, значения  $k$  составили 0,117 и 0,119 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,283 и 0,232 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,0274 и 0,0277 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно.

Оцененные по уравнению Е-типа при 20, 10 и 2 °С средние скорости БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , составили соответственно 0,0250; 0,0130 и 0,00325 мг  $O_2$ /(л·сут). Соотношение скоростей БПК на I-й и линейной стадиях при 20 и 10 °С отличалось незначительно (в 2,2–2,1 раза), а при 2 °С достигало 8,5 раза. Эти результаты показывают, что в зимней воде режим окисления компонентов ОВ меняется при разных температурах хранения испытываемой пробы. На линейной стадии за период опыта (126 сут) суммарное значение БПК при 20, 10 и 2 °С составляло соответственно 3,15; 1,52 и 0,41 мг  $O_2$ /л. Таким образом, в сравнении с окислением условно «стойких» компонентов ОВ при 10 °С потребление  $O_2$  при 20 °С было в 2,1 раза выше, а при 2 °С – в 3,7 раза ниже.

Кинетика БПК в весенних экспериментах отражена уравнениями EL-, EA-, EAL-типов. Описание I-й стадии БПК (по Е-типу) при 20 и 10 °С характеризовалось близкими средними значениями параметров  $k$  – 0,113 и 0,126 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,25 и 1,08 мг  $O_2$ /л и  $v_1$  – 0,144 и 0,112 мг  $O_2$ /(л·сут), при 2 °С они отличались ( $k$  – 0,150 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,366 мг  $O_2$ /л и  $v_1$  – 0,0537 мг  $O_2$ /(л·сут)). Кроме этого, выявлена разная тенденция снижения значений параметров БПК при уменьшении температуры: от 20 до 10 °С скорость потребления  $O_2$  на I-й стадии снижалась в 1,3 раза, что свидетельствует о небольших отличиях в лабильности окисляющихся фракций ОВ, а от 10 до 2 °С – в 2,1 раза. Предполагается, что потенциал окисления лабильных компонентов ОВ при снижении температуры от 10 до 2 °С существенно ниже с общим сокращением спектра окисляемых компонентов ОВ.

Потребление  $O_2$  на II-й стадии БПК при 20 и 10 °С составило 0,778 и 0,525 мг  $O_2$ /л, что соответственно в 1,6 и 2 раза ниже потребления  $O_2$  на I-й стадии окисления лабильных компонентов ОВ. В весенней воде средняя скорость потребления  $O_2$  на линейной стадии,  $\omega_s$ , при 20, 10 и 2 °С составляла соответственно 0,0270; 0,00884 и 0,00264 мг  $O_2$ /(л·сут). Таким образом, в сравнении с I-й стадией окисления лабильного ОВ на линейной стадии отмечено более интенсивное снижение скорости потребления  $O_2$  на окисление условно «стойких» фракций ОВ при уменьшении температуры воды от 20 до 10 и далее до 2 °С соответственно в 3,1 и 3,4 раза.

В экспериментах с летними пробами воды кинетика БПК следовала уравне-

ниям AL-, EAL-, EL- и AAL-типов. В результате анализа данных установлено, что при 20 и 10 °С есть отличия в значениях параметров БПК, описывающих кинетику процесса уравнениями А-типа в разные годы. Так, при 20 °С в воде из ПХ значения  $[O_2]'$  достигали 1,41 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,214 мг  $O_2$ /(л·сут); при 10 °С в воде из района ИО средние значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  были ниже и составляли 0,717 мг  $O_2$ /л и 0,0967 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно.

В опытах с водой из КГ и ПГ (по Е-типу) при 20, 10 и 2 °С значения  $k$  составляли 0,138; 0,112 и 0,129 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,425; 0,333 и 0,158 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,0661; 0,0385 и 0,0204 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно. Как видно, при уменьшении температуры хранения исследуемой воды от 20 до 10 и далее до 2 °С наблюдается естественное снижение значений параметров  $[O_2]'$  и  $v_1$ . На II-й стадии потребление  $O_2$  при 20 и 10 °С составило соответственно 0,452 и 0,528 мг  $O_2$ /л, сопоставимые с потреблением  $O_2$  на I-й стадии окисления лабильных компонентов ОВ.

Анализ значений скорости БПК на линейной стадии,  $\omega_s$ , дает основание для предположения о наличии взаимосвязи между скоростями потребления  $O_2$  на I-й и последующей линейной стадии. При развитии I-й стадии по уравнению А-типа скорости БПК на линейной стадии оказались выше, хотя при этом скорости потребления  $O_2$  были ниже, чем при развитии по Е-типу. Такая особенность выявлена при 20 и 10 °С, а при 2 °С скорости БПК на линейной стадии практически не отличались от оцененных при 10 °С. Важное значение имеют и соотношения скоростей потребления  $O_2$  между I-й и линейной стадиями. Так, соотношение скоростей при 20, 10 и 2 °С по Е-типу составляло соответственно 3,9; 4,6 и 2,8, а по А-типу было близким и равнялось 1,0 (при 20 и 10 °С) или < 1,0 (при 2 °С).

Для описания кинетики БПК в осенних опытах использовались уравнения AL-, AAL-, EAL- и EA-типов. В большинстве экспериментов I-я стадия БПК описывалась уравнениями А-типа, а средние значения параметров при 20, 10 и 2 °С составили соответственно  $w_1$  – 0,294; 0,325 и 0,340 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 1,151; 0,684 и 0,295 мг  $O_2$ /л, а  $v_1$  – 0,1380; 0,0566 и 0,0014 мг  $O_2$ /(л·сут). При 20 и 10 °С (по Е-типу) средние параметры  $k$  достигали 0,150 и 0,111 сут<sup>-1</sup>,  $[O_2]'$  – 0,57 и 0,38 мг  $O_2$ /л,  $v_1$  – 0,0885 и 0,0437 мг  $O_2$ /(л·сут) соответственно. Потребление  $O_2$  при 20 и 10 °С на II-й стадии по А-типу составило 0,525 и 0,636 мг  $O_2$ /л, а по Е-типу – 0,330 и 0,465 мг  $O_2$ /л соответственно. Необходимо отметить, что в осенней воде расход  $O_2$  на окисление компонентов ОВ на II-й стадии был сопоставим с потреблением на I-й стадии.

Отличительной особенностью кинетики БПК в осенней воде является более высокая скорость БПК на I-й стадии при описании уравнениями А-типа. Очевидно, что ассортимент компонентов ОВ, участвующих в окислении на I-й стадии, не постоянен в течение года и осенью он сменяется менее лабильными компонентами ОВ, на окисление которых расходуется больший запас растворенного  $O_2$  в сравнении с другими сезонами.

Средние скорости БПК,  $\omega_s$ , на линейной стадии (по А-типу) при 20, 10 и 2 °С составляли соответственно 0,0176; 0,00883 и 0,00621 мг  $O_2$ /(л·сут). При этом значения при 20 и 10 °С были ниже соответственно в 7,8 и 6,4 раза, а при 2 °С – выше в 4,4 раза, чем на I-й стадии. Обратная картина наблюдалась в уравнениях по Е-типу: скорости БПК на I-й стадии при 20 и 10 °С были выше в 6,2 и 6,3 раза, чем на линейной стадии.

В результате анализа данных показано соответствие концентраций лабильных и условно «стойких» к биохимическому окислению компонентов ОВ кинетическим параметрам БПК для различных акваторий Онежского озера. Так, при 20 °С выявлены зависимости между значениями предельного потребления  $O_2$  и концентрациями белков и углеводов ( $R^2 = 0,87-0,93$ ) на I-й и липидами ( $R^2 = 1,00$ ) на II-й стадиях БПК. Получены зависимости между концентрациями ГВ и суммарным потреблением  $O_2$  на линейной стадии при 20 °С ( $R^2 = 0,77$ ) и 10 °С ( $R^2 = 0,71-0,79$ ). Установлено по три вида линейной зависимости между значениями  $XPK_0$  и общим потреблением  $O_2$  ( $\omega_s \cdot 126$ , мг  $O_2$ /л) на линейной стадии БПК за 126 сут ( $R^2 = 0,85-0,97$ ), которые характеризуют потенциалы окислительных процессов в воде. По три зависимости обнаружено между параметрами, связывающими изменения значений ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) и  $\omega_s$ , которые характеризуют условия окисления в разные сезоны условно «стойких» фракций ОВ ( $R^2 = 0,60-0,99$ ).

Подводя итог, необходимо отметить, что на примере выполненных долгосрочных измерений БПК совместно с определениями показателей содержания в исследуемых водах различных фракций ОВ получены весомые доказательства перспективности использования теста БПК для объяснения особенностей мультистадийных окислительных процессов в воде из разных акваторий Онежского озера (относительно чистых вод ЦП и акваторий, подверженных антропогенному воздействию, – ПГ, КГ, ПХ). Присутствие в природных водах разных по составу и количеству компонентов ОВ отражается на фиксируемых в долгосрочных экспе-

риментах типах БПК-кривых. С помощью формально-кинетического анализа для каждого БПК-эксперимента оценены кинетические параметры по отдельным стадиям процесса. Получено подтверждение, что воды ЦП сохраняют высокое качество, по сравнению с другими акваториями, при этом отличия наиболее значимы в весенний период, когда в воде наиболее активны продукционные процессы.

В дальнейшем планируется представить информацию о специфике развития окислительных процессов и установить взаимосвязи кинетических показателей БПК с концентрациями разных фракций ОВ для разнотипных водоемов Карелии, включая малые озера различной трофности и разные акватории Ладожского озера. Кроме того, одной из важнейших задач для дальнейших исследований представляется установление влияния взвешенного ОВ на процессы БПК, расходуемого на окисление разных компонентов ОВ в водоемах с различным трофическим статусом.

*Финансовое обеспечение исследований в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН (Петрозаводск) осуществлялось из средств федерального бюджета в рамках государственного задания КарНЦ РАН, а в ИО РАН им. П. П. Ширшова (Москва) – в рамках темы № 0128-2019-0011 «Взаимодействие биосфер в Мировом океане».*

*Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».*

## Литература

- Бояринов П. М., Петров М. И. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
- Верес Ю. К., Остапеня А. П. Содержание лабильного органического вещества в воде озер Нарочанского региона // Вестник БГУ. Сер. 2. 2011. № 2. С. 45–49.
- Ефремова Т. А., Зобкова М. В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в воде Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 9. С. 60–75. doi: 10.17076/lim1017
- 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.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. №. 1. С. 62–72. doi: 10.31857/S2587-55662019162-72

Леонов А. В. Обобщение, типизация и кинетический анализ кривых потребления кислорода по данным БПК-опытов // Океанология. 1974. Т. XIV, вып. 1. С. 82–87.

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 // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 3. С. 11–30. doi: 10.17076/lim726

Леонов А. В., Зобкова М. В. Общая характеристика развития БПК в длительных экспериментах с водой из водоемов Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 3. С. 61–79. doi: 10.17076/lim952

Леонов А. В., Зобкова М. В. Значения кинетических параметров БПК длительных экспериментов (на примере анализа данных с разными интегральными пробами воды из Онежского озера) // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 40–61. doi: 10.17076/lim1164

Лозовик П. А., Зобкова М. В., Рыжаков А. В., Зобков М. Б., Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Ефремова Т. В. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный составы // ДАН. 2017. Т. 477, № 6. С. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, №. 1. С. 88–98. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

РД 52.24.421-2012. Химическое потребление кислорода в водах. Методика измерений скляночным методом. Ростов-на-Дону: Госгидромет, 2012. 19 с.

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: КарНЦ РАН, 2003. С. 135–144.

Сабылина А. В. Химический состав губ Онежского озера, подверженных антропогенному загрязнению // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 77–88.

Сабылина А. В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Труды КарНЦ РАН. 2016. №. 9. С. 68–77. doi: 10.17076/lim307

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Онежское озеро и его притоки. Химический состав воды озера // Состояние водных объектов Республики Карелия по результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 29–40.

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Гидрохимическая характеристика литоральной зоны Онежского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 179–187. doi: 10.7868/S0321059618020074

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, №. 6. С. 717–729.

Швец Л. Д. Гидрологическая изученность Онежского озера и его бассейна // Исследования режима и расчеты водного баланса озер-водохранилищ Карелии. Л.: Наука, 1977. Вып. 2. С. 3–24.

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia // J. Great Lakes Res. 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 850–861. doi: 10.1016/j.jglr.2020.02.008

Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Lability of organic carbon in lakes of different trophic status // Freshwat. Biol. 2009. Vol. 54. P. 1312–1323. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02183.x

Поступила в редакцию 13.07.2020

## References

Boyarinov P. M., Petrov M. P. Protsessy formirovaniya termicheskogo rezhima glubokikh presnovodnykh vodoemov [Formation processes of thermal regime in deep freshwater bodies]. Leningrad: Nauka, 1991. 175 p.

Bul'on V. V. Pervichnaya produktsiya planktona vnutrennikh vodoemov [Primary plankton production of inland waters]. Leningrad: Nauka, 1983. 150 p.

Efremova T. A., Zobkova M. V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera [Concentration, distribution and ratio of the main organic matter components in Lake Onego water]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 9. P. 60–75. doi: 10.17076/lim1017

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения [Lake Onego ecosystem and its change trends]. Leningrad: Nauka, 1990. 264 p.

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Izmeneniya gidrokhimicheskogo rezhima Onezhskogo ozera s nachala 1990-kh godov [Changes in the hydrochemical regime of Lake Onego since the early 1990s]. Izv. RAN. Ser. geogr. [Proceed. PAS. Geographical Ser.]. 2019. No. 1. P. 62–72. doi: 10.31857/S2587-55662019162-72

Leonov A. V. Obobshchenie, tipizatsiya i kineticheskii analiz krivykh potrebleniya kisloroda po dannym BPK-opytov [The generalization, typification, and kinetic analysis of the curves of oxygen consumption according

to the BOD-experiments]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1974. Vol. 14, iss. 1. P. 82–87.

Leonov A. V., Lozovik P. A., Ikko O. I. Ispol'zovanie eksperimental'nykh dannykh po biokhimicheskoyu potrebleniyu kisloroda dlya korrektnoi otsenki sostoyaniya vodnykh ob'ektov i kachestva prirodnykh vod [Using experimental data on biochemical oxygen demand for correct assessment of the status of water bodies and the quality of natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 11–30. doi: 10.17076/lim726

Leonov A. V., Zobkova M. V. Obshchaya kharakteristika razvitiya BPK v dlitel'nykh eksperimentakh s vodoi iz vodoemov Karelii [General characteristics of BOD kinetics in long-term experiments with water from Karelian waterbodies of various types]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 3. P. 61–79. doi: 10.17076/lim952

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) [BOD kinetic parameter values from long-term experiments (with different integrated water samples from the central part of Lake Onego)]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2020. No. 4. P. 40–61. doi: 10.17076/lim1164

Lozovik P. A., Kulikova T. P., Martynova N. N. Monitoring vodnykh ob'ektov Karelii v 1992–2000 gg. [Monitoring of Karelian water objects in 1992–2000]. *Gidroekol. probl. Karelii i ispol'zovanie vodnykh resursov* [Hydroecol. probl. of Karelia and use of water res.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 135–144.

Lozovik P. A., Zobkova M. V., Ryzhakov A. V., Zobkov M. B., Efremova T. A., Sabylina A. V., Efremova T. V. Allokhtonnoe i avtokhtonnoe organicheskoe veshchestvo prirodnykh vod: kineticheskie i termodinamicheskie zakonomernosti transformatsii, kolichestvenny i kachestvenny sostavy [Allochthonous and autochthonous organic matter of natural waters: kinetic and thermodynamic laws of transformation, quantitative and qualitative composition]. *DAN* [Dokl. Russ. Acad. Sci.]. 2017. Vol. 477, no. 6. P. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Otsenka vneshnego vodoobmena zalivov ozer po khimicheskim pokazatelyam vody [Effects of external water exchange between bays of lakes on chemical indicators of water]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2019. Vol. 46, no. 1. P. 88–98. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

RD 52.24.421-2012. Khimicheskoe potreblenie kisloroda v vodakh. Metodika izmerenii titrimetricheskim metodom [Chemical oxygen demand in waters. Measuring by the titrimetric method]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2012. 19 p.

Sabylina A. V. Khimicheskii sostav gub Onezhskogo ozera, podverzhennykh antropogennomu zagryazneniyu [The chemical composition of the Lake Onega bays exposed to man-induced impact]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi terr. Rossii: sovr. sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimati-*

*cheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the north-west European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 61–67.

Sabylina A. V. Postuplenie v Onezhskoe ozero organicheskogo ugleroda, obshchego fosfora i obshchego azota s rechnym stokom i vynos s vodami r. Sviri v 1965–2008 godakh [An inflow of organic carbon, total phosphorus and total nitrogen to Lake Onego with stream runoff, and their removal by the Svir river water in 1965–2008]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 68–77. doi: 10.17076/lim307

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki. Khimicheskii sostav vody ozera [Lake Onego and its tributaries. The chemical composition of the lake water]. *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* [The state of water bodies in the Republic of Karelia according to the monitoring results of 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 29–40.

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Gidrokhimicheskaya kharakteristika litoral'noi zony Onezhskogo ozera [Hydrochemical characteristics of the littoral zone of Lake Onega]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2018. Vol. 45, no. 2. P. 179–187. doi: 10.7868/S0321059618020074

Shvets L. D. Gidrologicheskaya izuchennost' Onezhskogo ozera i ego basseina [Hydrological study of Lake Onego and its basin]. *Issled. rezhima i raschety vodnogo balansa ozer-vodokhranilishch Karelii* [Regime studies and water balance calculations of lake-reservoirs in Karelia]. Leningrad: Nauka, 1977. Iss. 2. P. 3–24.

Veres J. K., Ostapenia A. P. Soderzhanie labil'nogo organicheskogo veshchestva v vode ozer Narochanskogo regiona [Labile organic matter concentrations in water of the Naroch Lakes]. *Vestnik BGU. Ser. 2* [J. Belarusian St. Univ. Ser. 2]. 2011. No. 2. P. 45–49.

Zobkov M. B., Zobkova M. V. Ustroistvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotokhimicheskimi persul'fatnymi oksidatsiyami v sisteme nepreryvnogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskimi detektirovaniem [Device for determining organic carbon in water with photochemical persulfate oxidation in a continuous gas flow system and FTIR spectrometric detection]. *Zavodskaya lab. Diagnostika mat.* [Factory lab. Mat. diagnostics]. 2015. No. 8. P. 10–15.

Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 850–861. doi: 10.1016/j.jglr.2020.02.008

Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T. Lability of organic carbon in lakes of different trophic status. *Freshwat. Biol.* 2009. Vol. 54. P. 1312–1323. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02183.x

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water chemistry in Onega Lake and its tributaries. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2010. Vol. 37, no. 6. P. 842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102

Received July 13, 2020

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Леонов Александр Васильевич**

главный научный сотрудник, д. х. н., проф.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: leonov@ocean.ru

### **Зобкова Мария Валентиновна**

младший научный сотрудник лаб. гидрохимии  
и гидрогеологии  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: rincalika21@yandex.ru  
тел.: (8142) 576541

## **CONTRIBUTORS:**

### **Leonov, Alexander**

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovsky Ave., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: leonov@ocean.ru

### **Zobkova, Maria**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: rincalika21@yandex.ru  
tel.: (8142) 576541