

## ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 556.114.7:546.21:543.632.14

### ПРИМЕНЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ БПК-ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ СЕЗОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКИСЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ИЗ РАЗНЫХ РАЙОНОВ 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

В разные сезоны 2013–2017 гг. на Онежском озере проведены масштабные исследования окисления компонентов органического вещества на основе длительных БПК-тестов при 20 и 10 °С. Отбор проб воды осуществлялся из Центрального плеса озера, губ Петрозаводская, Кондопожская, Пухтинская, а также устьевой зоны р. Шуя в двух вариантах: (1) из поверхностного горизонта (0,5–1 м) и (2) интегральная (от поверхности до дна). В пробах воды зафиксировано мультстадийное развитие БПК с двумя или тремя стадиями потребления  $O_2$  на I-й, II-й и линейной стадиях, которые отражают разные особенности окисления компонентов ОВ. При анализе первичных экспериментальных данных отмечены особенности изменения значений БПК, расходуемых на отдельных стадиях процесса, вклад отдельных стадий в общее БПК, соотношения скоростей потребления  $O_2$  по стадиям, определяющие количественные критерии лабильности окисляемых компонентов органического вещества. Установлено, что изменения кинетических параметров БПК определяются типом кинетики I-й стадии (E- или A-тип) и режимом отбора проб воды. Выделено как минимум четыре варианта влияния этих факторов. В воде из Центрального плеса озера выявлено наименьшее потребление  $O_2$  за период эксперимента, а также повышенная лабильность окисляемого органического вещества на I-й стадии БПК, что подтверждает факт высокого качества воды в этой части озера. В других акваториях озера отмечена повышенная лабильность окисляемых компонентов органического вещества в весенней воде. Между содержанием компонентов органического вещества (лабильных и сравнительно стойких к окислению гумусовых веществ) и кинетическими параметрами БПК выявлены взаимосвязи, характеризующие высокими значениями коэффициентов детерминации ( $R^2 = 0,6–1,0$ ). Установлено, что взвешенное вещество также оказывает важное влияние на кинетику развития БПК.

**Ключевые слова:** БПК; кинетические параметры БПК; качество воды; компоненты органического вещества; Онежское озеро.

## A. V. Leonov, M. V. Zobkova. USING LONG-TERM BOD – EXPERIMENTS FOR SEASONAL RESEARCH OF ORGANIC MATTER COMPONENTS OXIDATION IN WATER FROM DIFFERENT AREAS OF LAKE ONEGO

Extensive research on the oxidation of organic matter components using long-term BOD experiments at 20 and 10 °C was conducted on Lake Onego in different seasons in 2013–2017. Water samples were taken from the central part of the lake, Pukhta, Kondopoga, Petrozavodsk Bays, as well as the estuarine zone of the River Shuya in two variations: surface horizon (0.5 to 1 m) or integral (from surface to bottom). The samples showed a multistage BOD development with two or three O<sub>2</sub> demand stages in the first, second and linear stages, which demonstrate the different oxidation patterns of organic matter components. It was found that the type of the first stage (E- or A-type) and the water sampling procedure defined the variations of BOD parameters. As a result, four alternative effects of these factors were identified. Minimal O<sub>2</sub> demand over the experimental period as well as a higher lability of oxidizable organic matter in the first BOD stage were found in water from the central part of the lake, confirming high quality of the water in this part of the lake. Elevated lability of oxidizable organic matter components in water from other parts of the lake was identified in spring. Strong correlation was found between various organic matter components (labile and oxidation-“stable” humic substances) and kinetic BOD parameters ( $R^2 = 0.60–1.00$ ). Suspended particulate matter also proved to influence BOD kinetic parameters.

**Key words:** biochemical oxygen demand; kinetic BOD parameters; water quality; organic matter components; Lake Onego.

### Введение

В современных гидрохимических и экологических исследованиях фиксируемое в длительных экспериментах развитие биохимического потребления O<sub>2</sub> (БПК) может использоваться для характеристики окисления разных компонентов органического вещества (ОВ), содержащихся в исследуемой воде. Большой интерес вызывают особенности развития окислительных процессов в малоизученных в этом направлении водах гумидной зоны, к которой относятся разнотипные водоемы Карелии.

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 проведена количественная оценка компонентов автохтонного (образующегося в самом водоеме) и аллохтонного (поступающего с водосборной территории) ОВ, а также установлены соотношения между ними и оценены возможности изменения их концентраций в процессе трансформации в водной среде [Ефремова и др., 2013; Зобкова и др., 2017; Ефремова, Зобкова, 2019].

Регистрируемое мультистадийное развитие БПК (в виде БПК-кривой) [Леонов, 1974а]

в длительных экспериментах (продолжительностью  $\geq 100$  сут) служит важной интегральной характеристикой биохимического состояния природных и разбавленных сточных вод, отражая многообразие происходящих в водной среде окислительных процессов с последовательной биохимической трансформацией разных фракций ОВ природного и антропогенного происхождения, а также стадии трансформации биогенных веществ – окисление форм азота (нитрификация) [Рыжаков и др., 2010] или органического фосфора ( $P_{\text{орг}}$ ) (щелочная и кислая фосфатазы превращают  $P_{\text{орг}}$  в минеральный P, потребляемый живыми организмами) [Леонов, 1974б; Леонов и др., 2018]. Продолжительный БПК-тест, по существу, выявляет и позволяет количественно характеризовать окислительную трансформацию лабильных и более стойких к биохимическому разложению компонентов ОВ в исследуемой воде или образующихся в ней в процессе эксперимента при окислении исходных компонентов ОВ.

В лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН с начала 2010-х гг. накоплен значительный массив данных по проводившимся длительным БПК-экспериментам в разнотипных водоемах Карелии. В текущей работе представлены данные по измеренным концентрациям разных фракций ОВ и длительным БПК-тестам в разных акваториях Онежского озера, воды которых отличаются по своему качеству. Анализ этих данных позволит охарактеризовать:

- значения концентраций разных компонентов ОВ и кинетических параметров БПК при 20 и 10 °С для разных акваторий озера в разные сезоны в зависимости от условий отбора проб воды;
- особенности окисления разных по лабильности компонентов ОВ с помощью количественных показателей (концентраций компонентов ОВ и кинетических параметров БПК) на выделенных стадиях БПК (I-я, II-я и линейная);
- взаимосвязи и соответствие кинетических показателей БПК концентрациям разных фракций ОВ для разных сезонов и акваторий озера, отличающихся качеством воды.

## Материалы и методы

### *Акватории Онежского озера*

**Онежское озеро** – второй по площади водоем Европы, площадь его водосбора оценивается в 66 300 км<sup>2</sup>, а площадь зеркала – 9720 км<sup>2</sup> [Швец, 1977]. Его бассейн отличает неравномерное распределение по акватории источников загрязнения, основные из которых расположены в северной части водоема. Крупные источники загрязнения – большие промцентры (города Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск). В зависимости от показателей (гидрологических, гидрохимических, гидробиологических) и степени антропогенного воздействия Онежское озеро можно подразделить на отдельные районы, отличающиеся расположением, объемом водной массы, глубинами, водообменом с центральным районом озера, химическим составом и др. Отличия этих характеристик определенно влияют на качество воды и значения кинетических параметров БПК, которое обнаруживается при экспериментальном изучении процесса.

**Центральный плес (ЦП)** озера меньше других районов подвержен изменчивости: он относительно изолирован от загрязненных губ, имеет большой объем водной массы, перемешиваемой дважды в год, сохраняет олиготрофный статус за счет дефицита Р, сдерживающего развитие фитопланктона [Сабылина, Рыжаков, 2007]. Воды ЦП характеризуются низкими температурами (средняя 7–8 °С), глубоководностью (средняя глубина 35,1 м) и высокой прозрачностью.

**Петрозаводская губа (ПГ)** подвержена антропогенному влиянию, однако характеризуется высокой проточностью (период водообмена с учетом внешнего водообмена с озером 0,13 [Лозовик и др., 2019]), что связано с небольшим объемом водной массы (1,2 км<sup>3</sup>), пологим

уклоном котловины в сторону открытой части озера и значительным поступлением в губу вод р. Шуи (3,1 км<sup>3</sup>/год). Вода в заливе имеет мезотрофный мезогумусный статус, а ее качество формируется за счет смешения озерных, речных и сточных вод [Sabylina et al., 2010]. Поэтому содержание ОВ в губе может значительно варьировать и быть близким либо к озерным, либо к речным водам.

**Кондопожская губа (КГ)** отличается высоким антропогенным воздействием, но в сравнении с ПГ отличается меньшей проточностью (период водообмена с учетом внешнего водообмена с озером составляет 1,02) [Лозовик и др., 2019]. Такая разница вызвана тем, что КГ имеет больший объем водной массы (~4,7 км<sup>3</sup>), сложный изрезанный рельеф с множеством островов и большими перепадами глубин, а речной приток составляет 2,5 км<sup>3</sup>/год. В вершине КГ расположен целлюлозно-бумажный комбинат (ЦБК), оказывающий существенное влияние на качество воды в заливе. Сточные воды ЦБК распространяются в средней толще водных масс в виде «факела» [Sabylina et al., 2010]. В отличие от вершинной части губы, испытывающей серьезное антропогенное воздействие, в ее средней и внешней частях ОВ по качеству и составу близко к озерным водам.

**Пухтинская губа (ПхГ)** расположена на юго-западном берегу Онежского озера, отличается активным водообменом с ЦП озера. Химический состав воды в ПхГ изменяется в зависимости от времени года. Весной термобар препятствует водообмену с озерными водами и запирает в губе речные воды, богатые ОВ аллохтонного происхождения [Бояринов, Петров, 1991], поэтому в воде ПхГ возрастают значения показателей ОВ. Летом и осенью главное влияние на качество воды оказывают озерные водные массы [Сабылина, Рыжаков, 2018]. Содержание Р<sub>общ</sub> также уменьшается от весны к осени, и вода в ПхГ относится к мезотрофному типу.

**Устье р. Шуи (РШ)** расположено в вершинной части ПГ. Река является вторым по величине притоком Онежского озера, ее сток во многом определяет качество вод и состояние акватории ПГ. С водами р. Шуи поступает существенное количество гумусовых веществ (ГВ), т. к. ее водосбор покрыт обилием лесов, болот и озер [Podsechin et al., 2009].

### *Отбор проб воды*

На рис. 1 показаны исследованные акватории Онежского озера, станции отбора проб воды для БПК-экспериментов и измерения кон-

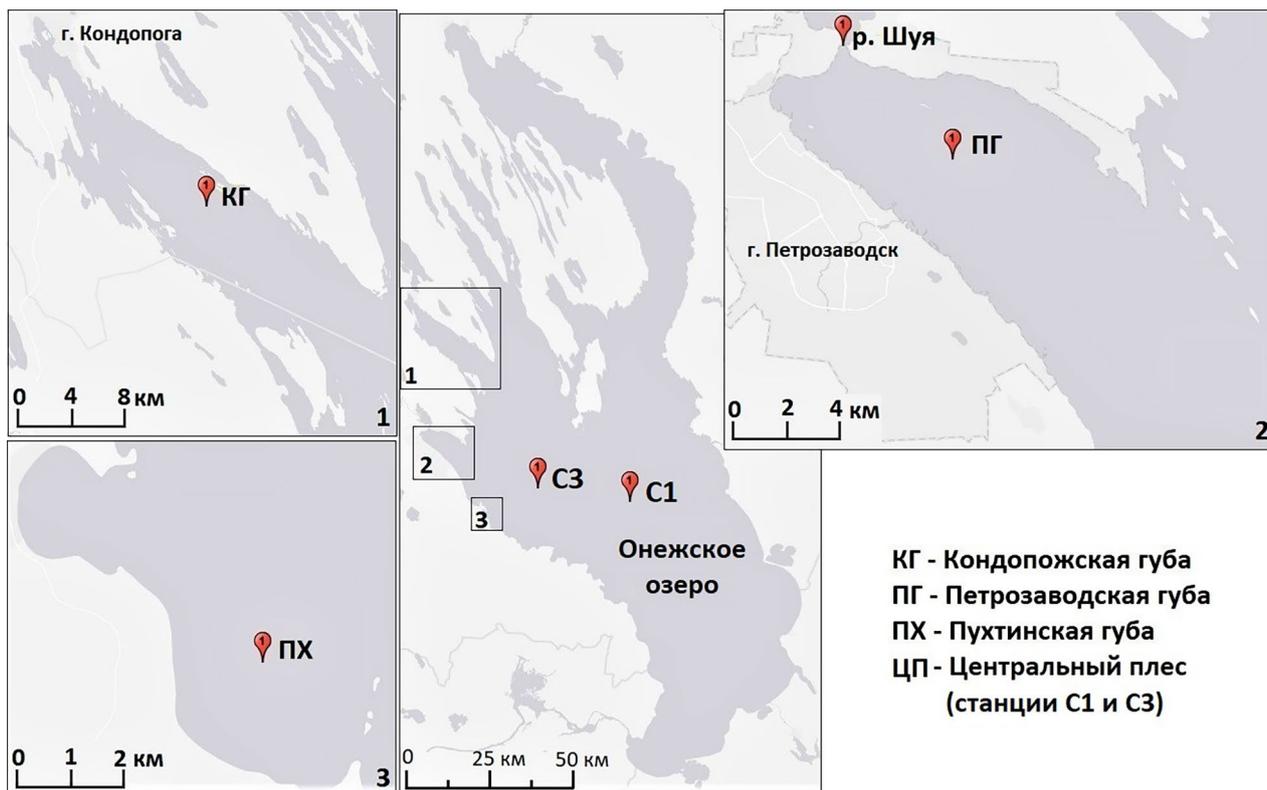


Рис. 1. Карта-схема отбора проб в различных районах Онежского озера в 2013–2017 гг.

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

центраций форм ОВ. Отбор проб проводился в разные сезоны для характеристики внутри- и межгодовых отличий в содержании разных форм ОВ и кинетических параметров БПК. Для сравнения результатов в настоящем исследовании использованы данные, которые были получены при отборе проб воды в двух вариантах: (1) из поверхностного горизонта (0,5 или 1 м) и (2) из горизонтов водной толщи (от 1 м до дна) при исследовании вод ЦП Онежского озера [Леонов, Зобкова, 2020а], отдельных акваторий озера (ПхГ, КГ, ПГ) и РШ [Леонов, Зобкова, 2020б]. Режимы отбора проб воды показаны в табл. 1.

#### Методы исследований

Весь комплекс аналитических измерений выполнен с помощью методов, применяемых в практике гидрохимических исследований природных вод [Аналитические..., 2017]. Методика постановки и проведения БПК-экспериментов подробно описана в [Леонов, Зобкова, 2020а, б].

Развитие БПК за первые 20 сут в отечественных и зарубежных исследованиях традиционно описывается с помощью экспоненциального типа уравнения 1-го порядка [Streeter, Phelps, 1925] – экспоненциальный (Е-тип):

$$\text{БПК}_t = [\text{O}_2]'(1 - e^{-kt}),$$

где  $\text{БПК}_t$  – значения БПК в разные сроки времени  $t$  хранения проб воды,  $[\text{O}_2]'$  – предельное значение БПК на I-й стадии, мг  $\text{O}_2/\text{л}$ ,  $k$  – константа скорости I-й стадии потребления  $\text{O}_2$ ,  $\text{сут}^{-1}$ . При использовании уравнения Е-типа для описания развития I-й стадии БПК (в пределах времени  $t$  до 20 сут) указанные параметры применяются для характеристики условий окисления лабильных компонентов ОВ.

Значения БПК на участках свыше 20 сут это уравнение не отражает. Отступления от экспоненциального развития БПК на I-й стадии наблюдаются при наличии в исследуемой воде загрязняющих веществ. Таким образом, уравнение Е-типа в ряде случаев не может описать развитие БПК ни в течение первых 20 сут, ни при больших сроках продолжения экспериментов. Однако уравнение Е-типа применяется при обработке БПК-кривых без какой-либо корректировки даже при двухстадийном развитии БПК в 30-суточных опытах [Трегубова, Кулиш, 1982].

Разная конфигурация БПК-кривых в продолжительных экспериментах отражается в типах кинетических уравнений, предлагаемых для обработки разнообразных данных

Таблица 1. Схема отбора проб воды из разных районов Онежского озера в 2013–2017 гг.

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

Акватория озера (станция; глубина, м) Area of the lake (station; depth, m)	Сезон, год Season, year	Тип пробы (горизонт, м) Sample type (horizon, m)
ЦП / CP (C1; 62,0)	зима, лето, осень 2013 winter, summer, autumn 2013	интегральная / integral (1,0–60,0)
	весна 2013 spring 2013	поверхностный / surface (1,0)
ЦП / CP (C3; 46,5)	весна 2016 spring 2016	интегральная / integral (1,0–46,0)
ЦП / CP (C1; 58,0)	осень 2016 autumn 2016	поверхностный / surface (1,0)
ЦП / CP (C3; 46,5)	зима, весна 2017 winter, spring 2017	поверхностный / surface (1,0)
ПхГ / PkВ (GP1; 13,5)	весна–осень 2013 spring–autumn 2013	поверхностный / surface (0,5)
КГ / КВ (K6; 82,0)	зима, лето, осень 2013 winter, summer, autumn 2013	интегральная / integral (1,0–80,0)
	весна 2013 spring 2013	поверхностный / surface (1,0)
РШ / RS	зима–осень 2013 и зима, весна 2016–2017 winter–autumn 2013 and winter, spring 2016–2017	поверхностный / surface (1,0 м)
ПГ / ПВ (P2; 28,6)	зима–осень 2013 и зима, весна 2016 winter–autumn 2013 and winter, spring 2016	интегральная / integral (1,0–28,0)
	осень, 2016, весна, 2017 autumn, 2016, spring, 2017	поверхностный / surface (1,0 м)
	зима, 2017 winter, 2017	интегральная / integral (1,0–28,0)

Примечание. Здесь и далее: ЦП – Центральный плес; ПГ – Петрозаводская губа; КГ – Кондопожская губа; ПхГ – Пухтинская губа; РШ – устье р. Шуя.

Note. Hereinafter: CP – Central part; PB – Petrozavodsk Bay; KB – Kondopoga Bay; PkВ – Pukhta Bay; RS – River Shuya.

по БПК независимо от вида кривых и продолжительности экспериментов [Леонов, 1974а]. При этом чаще используются следующие типы уравнений [Леонов, 1974б; Леонов, Зобкова, 2020а, б]:

– автокаталитический (А):

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01}(e^{w_1 t} - 1));$$

– экспоненциально-автокаталитический (ЕА):

$$\text{БПК} = [O_2]'(1 - e^{-kt}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2 t});$$

– полиавтокаталитический (АА):

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01}e^{w_1 t}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2 t});$$

– экспоненциально-линейный (ЕЛ):

$$\text{БПК} = [O_2]'(1 - e^{-kt}) + \omega_s t;$$

– автокаталитически-линейный (АЛ):

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01}(e^{w_1 t} - 1)) + \omega_s t;$$

– экспоненциально-автокаталитически-линейный (ЕАЛ):

$$\text{БПК} = [O_2]'(1 - e^{-kt}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2 t}) + \omega_s t;$$

– полиавтокаталитически-линейный (ААЛ):

$$\text{БПК} = [B_{01}(e^{w_1 t} - 1)] / (1 + \eta_{01}e^{w_1 t}) + [B_{02}(e^{w_2 t} - 1)] / (1 + \eta_{02}e^{w_2 t}) + \omega_s t;$$

В этих уравнениях  $t$  – время, сут;  $k$  – константа скорости БПК 1-го порядка, сут<sup>-1</sup>;  $K_k$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  – константы скорости БПК 2-го порядка (л·мгО<sub>2</sub><sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>);  $v_1$ ,  $\omega_s$  – соответственно скорости БПК на I-й и на линейной стадиях, мг О<sub>2</sub>/(л·сут);  $[O_2]'$ ,  $[O_2]''$  – предельные значения БПК соответственно на I-й и II-й стадиях, мг О<sub>2</sub>/л;  $B_{0i}$ ,  $\eta_{0i}$  – параметры, определяемые при обработке БПК-кривых ( $[B_{0i}] = k/k_k$ ;  $[\eta_{0i}] = [B_{0i}]/[O_2]'$ ). Значения указанных кинетических параметров оценивались при формально-кинетической обработке экспериментальных БПК-кривых, учитывая многообразие их типов [Леонов и др., 2018].

При обработке БПК-кривых для каждой выделенной стадии (I-я, II-я и линейная) оцениваются конечные (предельные) их значения (соответственно  $[O_2]'$ ,  $[O_2]''$ ,  $\omega_s \cdot 126$ ), об-

щее БПК за весь эксперимент ( $\text{БПК}_{126}$ ) – это сумма потребления  $\text{O}_2$  на отдельных стадиях [ $\text{БПК}_{126} = [\text{O}_2]' + [\text{O}_2]'' + (\omega_s \cdot 126)$ ], соотношение между этими составляющими оценивает роль отдельной стадии и ее вклад в общее  $\text{БПК}_{126}$ . Лабильность окисляемых количеств  $\text{O}_2$  оценивается по соотношению скоростей потребления  $\text{O}_2$  ( $v_1/\omega_s$ ). Также в ряде случаев можно использовать отношение количества потребляемого  $\text{O}_2$  на I-й стадии (за 20 сут) к потребляемому  $\text{O}_2$  на линейной стадии за 20 сут ( $\omega_s \cdot 20$ ). Лабильность окисляемого на I-й стадии  $\text{O}_2$  принимается более высокой, если  $v_1 > \omega_s$  или если количество потребляемого  $\text{O}_2$  за 20 сут на I-й стадии выше его потребления на линейной стадии ( $[\text{O}_2]' > \omega_s \cdot 20$ ).

Значения химического потребления  $\text{O}_2$  (ХПК) использовали для характеристики содержания  $\text{O}_2$  в пробах [РД..., 2012] перед началом эксперимента (ХПК<sub>0</sub>), на 49-е сут (ХПК<sub>49</sub>) и по его окончании (ХПК<sub>126</sub>). Также проводили измерения содержания общего органического углерода (ТОС) [Зобков, Зобкова, 2015], значений перманганатной окисляемости (ПО) и взвешенного вещества (РМ) в исходной воде. Ряд параметров  $\text{O}_2$  оценивали по эмпирическим уравнениям: содержание лабильного  $\text{C}$  ( $\text{C}_{\text{лаб}} = 0,3 \cdot [\text{O}_2]'$ ), условно «стойкого»  $\text{C}$  ( $\text{C}_{\text{стаб}} = \text{ТОС} - \text{C}_{\text{лаб}}$ ),  $\text{ТОС}$  в зависимости от общего содержания  $\text{O}_2$  ( $\text{O}_2$ ) или его доли в условно «стойкой» фракции ( $\text{O}_2$ ) ( $\text{C}_{\text{стаб}}$ ) ( $\text{ТОС}, \text{ мг } \text{C} = 2,15 \cdot \text{O}_2$  мг) [Бульон, 1983]. Для сравнения полученных значений кинетических параметров БПК со значениями компонентов  $\text{O}_2$  использованы опубликованные ранее данные – значения концентраций белков, липидов, углеводов и ГВ для вод Онежского озера в районах ЦП, ПГ и РШ (осень 2016 г., зима-лето 2017 г.) [Ефремова, Зобкова, 2019].

## Результаты исследований

### *Значения показателей $\text{O}_2$ в водах исследованных акваторий*

В 2013, 2016 и 2017 гг. в воде, используемой для постановки БПК-экспериментов, аналитически определяли при 20 °С показатели содержания в воде  $\text{O}_2$  (ТОС, ПО, ХПК) и РМ, а по эмпирическим уравнениям – вычисляли значения отдельных компонентов  $\text{O}_2$ :  $\text{C}_{\text{лаб}}$ ,  $\text{C}_{\text{стаб}}$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{O}_2$  (табл. 2).

Все измеренные в разные сезоны показатели  $\text{O}_2$  оказались повышенными в водах из устья РШ: зимой, весной, летом и осенью средние значения  $\text{ТОС}$  составили 17,9, 14,7, 15,0 и 12,9 мг С/л; РМ – 1,9, 7,2, 2,5 и 6,0 мг/л; ПО – 22,6, 20,3, 15,1 и 14,1 мг О/л соответ-

ственно. В отдельных акваториях Онежского озера концентрации  $\text{ТОС}$  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; РМ – 0,4, 2,8, 1,5 и 1,3 мг/л; ПО – 11,7, 9,9, 7,4 и 11,1 мг О/л соответственно. В целом наибольшие значения средних параметров  $\text{ТОС}$  и ПО зафиксированы в зимней воде, а наименьшие – в летней. Для РМ распределение иное – наибольшие и наименьшие средние значения приходятся соответственно на весеннюю и зимнюю воду. Разность значений  $\text{ХПК}_0 - \text{ХПК}_{126}$ , которая характеризует потенциал окисления условно «стойкой» фракции  $\text{O}_2$ , 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  $\text{ХПК}_0 - \text{ХПК}_{126}$  было максимальным в воде из устья РШ летом, а в разных акваториях Онежского озера – весной.

Содержание  $\text{C}$  лабильной фракции  $\text{O}_2$  было повышено в акваториях Онежского озера весной (в среднем 0,38 мг С/л), а в воде из устьевой зоны РШ – летом (2,39 мг С/л). В условно «стойкой» фракции повышение концентраций  $\text{C}$  для речных и озерных вод отмечалось зимой (составляли в среднем 9,81 и 17,26 мг С/л соответственно). Пониженное содержание  $\text{C}$  в лабильной и условно «стойкой» фракциях зафиксировано в летней воде из Онежского озера (в среднем 0,15 и 6,92 мг С/л соответственно), а в воде из устья РШ – осенью (0,36 и 12,54 мг С/л). Средние расчетные концентрации  $\text{O}_2$  и  $\text{O}_2$  в водах акваторий Онежского озера и устья РШ зимой повышены, а летом и осенью понижены. Отметим, что по всем показателям содержания  $\text{O}_2$ , в том числе лабильных и условно «стойких» компонентов, наблюдались более высокие значения для воды из устья РШ, чем для озерных вод (табл. 2).

### *Закономерности содержания и распределения $\text{O}_2$ в различных районах Онежского озера*

Как видно из табл. 2, наименьшие концентрации  $\text{ТОС}$  установлены в ЦП Онежского озера. Это связано с тем, что данная акватория является глубоководной, значительно удалена от прибрежных районов и заливов и меньше всего подвержена антропогенному влиянию [Sabylina et al., 2010]. В водах ЦП количество автохтонного  $\text{O}_2$  несколько выше, чем в губах [Ефремова, Зобкова, 2019].

Концентрация  $\text{O}_2$  в акваториях губ выше, чем в центре озера, что связано с рядом фак-

Таблица 2. Сводная таблица показателей ОБ в воде из разных акваторий Онежского озера в 2013, 2016 и 2017 гг.

Table 2. 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 проб воды] Lake region, year [type of sampling]	Аналитические измерения Analytical measurements						Расчетные значения Calculated values			
		ТОС	PM	ПО COD <sub>Mn</sub>	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>	ОВ <sub>Σ</sub> OM <sub>Σ</sub>	ОВ <sub>стаб</sub> OM <sub>stab</sub>
		мгС/л mgC/L	мг/л mg/L	мг О/л mg O/L				мг С/л mg C/L		мг О/л mg O/L	
Зима Winter	ЦП/СР, 2013 [2]	7,4	-	7,8	17,0	16,3	14,9	0,28	7,12	3,44	3,31
	РШ/RS, 2013 [1]	17,0	1,6	23,7	45,9	37,4*	33,7	0,41	16,60	7,91	7,72
	ПГ/РВ, 2013 [2]	8,6	0,4	9,5	21,3	18,8*	18,4	0,11	8,49	4,00	3,95
	КГ/КВ, 2013 [2]	7,9	0,0	8,5	20,6	-	17,6	0,13	7,77	3,67	3,61
	РШ/RS, 2016 [1]	18,0	2,0	21,5	51,3	-	-	0,60	17,40	8,37	8,09
	ПГ/РВ, 2017 [2]	11,4	1,1	13,2	29,5	28,0	25,7	0,12	11,28	5,30	5,25
	ЦП/СР, 2017 [1]	7,2	0,4	8,7	19,8	15,7*	14,9	0,18	7,02	3,35	3,26
	РШ/RS, 2017 [1]	18,6	2,2	22,6	49,0	45,6*	40,6	0,83	17,78	8,65	8,27
Весна Spring	РШ/RS, 2013 [1]	11,8	9,3	19,7	33,4	28,5	25,5	0,90	10,90	5,49	5,07
	ПГ/РВ, 2013 [2]	10,0	2,8	12,7	24,4	22,4	16,5	0,45	9,55	4,65	4,44
	КГ/КВ, 2013 [1]	7,8	4,4	11,3	24,0	19,3	14,8	0,59	7,22	3,63	3,36
	ПхГ/РкВ, 2013 [1]	8,3	2,6	8,9	19,8	18,6	11,1	0,24	8,06	3,86	3,75
	ЦП/СР, 2016 [2]	6,7	(~2,0)	6,5	16,2	-	-	0,24	6,46	3,12	3,01
	ПГ/РВ, 2016 [2]	10,7	1,0	12,2	29,6	-	-	0,30	10,40	4,98	4,84
	РШ/RS, 2016 [1]	16,2	0,9	19,7	42,4	-	-	0,83	15,38	7,54	7,15
	ПГ/РВ, 2017 [1]	12,7	3,0	16,5	33,8	-	-	0,30	12,40	5,91	5,77
Лето Summer	РШ/RS, 2017 [1]	16,2	11,5	21,6	44,9	-	-	0,30	15,90	7,53	7,40
	ЦП/СР, 2013 [2]	7,5	0,8	7,6	17,6	14,8	11,0	0,20	7,30	3,49	3,40
	РШ/RS, 2013 [1]	15,0	2,5	15,1	38,5	25,9	20,1	2,39	12,61	6,98	5,86
	ПГ/РВ, 2013 [2]	7,3	2,6	7,6	15,4	13,7	13,4	0,07	7,23	3,39	3,37
	КГ/КВ, 2013 [2]	6,2	1,7	8,2	18,3	16,8	12,9	0,19	6,01	2,63	2,80
	ПхГ/РкВ, 2013 [1]	7,7	1,0	6,4	20,1	20,8	18,5	0,18	7,52	3,58	3,50
Осень Autumn	ЦП/СР, 2013 [2]	7,4	1,8	7,0	16,2	14,3	13,6	0,20	7,21	3,44	3,35
	РШ/RS, 2013 [1]	12,9	6,0	14,1	30,8	20,3	19,9	0,36	12,54	6,00	5,83
	ПГ/РВ, 2013 [2]	7,2	1,4	7,8	17,8	18,7	16,0	0,35	6,86	3,35	3,19
	КГ/КВ, 2013 [2]	8,0	1,8	8,0	17,4	14,3	14,0	0,10	7,83	3,72	3,64
	ПхГ/РкВ, 2013 [1]	6,7	0,4	7,8	16,2	13,0	10,3	0,10	6,61	3,12	3,07
	ПГ/РВ, 2016 [1]	10,9	1,0	13,6	27,8	-	-	0,51	10,39	5,07	4,83

Примечание. Тип пробоотбора: [1] – из горизонта 0,5/1,0 м; [2] – интегральная (от поверхности до дна). \*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; PM – particulate matter; 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. Type of sampling: [1] – surface samples (0.5/1.0 m), [2] – integral (from surface to the bottom). \*Correspond with time = 70 days. The dash means the absence of data.

торов. Во-первых, большое количество ОБ, богатого ГВ, поступает с водами крупных рек (с р. Шуей в ПГ и с р. Суной в КГ). Во-вторых, в губах расположены крупные промцентры, которые также вносят вклад в общий пул ОБ и экологическую обстановку [Сабылина, Рыжаков, 2007; Sabylina et al., 2010; Теканова и др., 2019]. В отличие от КГ и ПГ концентрации ТОС в водах ПхГ близки к озерным, это связано с тем, что ПхГ характеризуется небольшими

размерами акватории с широко открытой границей в сторону ЦП озера и, следовательно, активным водообменом между этими районами. Главное влияние на качество воды в ПхГ летом и осенью оказывают озерные водные массы, а содержание ТОС в эти сезоны в водах ПхГ и ЦП практически не различалось [Сабылина, Рыжаков, 2018].

В сезонном плане также наблюдаются значительные отличия между разными районами

озера, что особенно заметно в губах. Так, в результате поступления сточных вод ЦБК, богатых биогенными элементами, в КГ в весенний и летний периоды происходит активное продуцирование автохтонного ОВ, что подтверждается ростом концентрации хлорофилла «а» [Теканова и др., 2018, 2019] и лабильной фракции ОВ в эти периоды (табл. 2). Рост автохтонного ОВ в летний период отмечается и в эвтрофной акватории РШ. В ПГ на концентрацию ОВ оказывают влияние как озерные, так и речные воды: водные массы губы представлены водами Онежского озера зимой и весной только на 38–48 %, а летом и осенью – на 82–86 % [Лозовик и др., 2019]. Так, весной с начала мая до конца июня в ПГ под влиянием термобара происходит запираание вод РШ и накопление ГВ в водах губы [Ефремова, Зобкова, 2019; Chmiel et al., 2020].

#### Значения кинетических параметров БПК

В табл. 3 приведены значения кинетических параметров БПК, оцененных при обработке данных экспериментов 2013–2017 гг., выполненных при 20 и 10 °С. Сравнимые в табл. 3 расчетные и наблюдаемые в экспериментах значения БПК достаточно подробно воспроизведены параметрами БПК-уравнений для всего периода длительных наблюдений.

На примере анализа экспериментов 2013 г. с весенней водой из разных районов Онежского озера (рис. 2), а также с отобранными в разные сезоны пробами воды из устья РШ (рис. 3) [Леонов, Зобкова, 2020а, б] выявлены отличия в особенностях развития БПК. Кинетика БПК представлена кривыми, построенными в экспериментах при 20 °С с водой из ЦП и ПГ по уравнениям EAL-типа, с водой из ПхГ и КГ – EL-типа; а при 10 °С – с водой из ЦП и КГ – по уравнениям EA-типа и с водой из ПхГ и ПГ – EL-типа (табл. 3, рис. 2).

Развитие I-й стадии БПК при 20 и 10 °С отражено уравнениями E-типа. В экспериментах с водой из ЦП, ПхГ, КГ (поверхностные пробы) и ПГ (интегральная проба) кинетику БПК при 20 °С описывают близкие значения констант скорости,  $k$ , – соответственно 0,130, 0,115, 0,130 и 0,103 сут<sup>-1</sup>, а при 10 °С – 0,0931, 0,111, 0,0876 и 0,139 сут<sup>-1</sup>. Средние значения  $k$  в экспериментах с водой из горизонта 1 м ЦП, ПхГ и КГ при 20 °С составили 0,125, а при 10 °С – 0,0972 сут<sup>-1</sup>; в интегральной пробе из ПГ средние значения  $k$  при 20 °С – 0,103 и при 10 °С – 0,139 сут<sup>-1</sup>. Также близки значения  $[O_2]'$  при 20 и 10 °С в экспериментах с водой из горизонта 1 м: в ЦП (0,89 и 0,83 мг O<sub>2</sub>/л), ПхГ (0,80

и 0,75 мг O<sub>2</sub>/л) и КГ (1,95 и 1,80 мг O<sub>2</sub>/л) – при 20 °С выше в 1,07 раза, чем при 10 °С. При этом значения  $[O_2]'$  в воде из горизонта 1 м в ЦП и ПхГ при 20 и 10 °С составляют в среднем 0,82 мг O<sub>2</sub>/л, а в воде из КГ – 1,88 мг O<sub>2</sub>/л, что в 2,3 раза выше.

В экспериментах с водой из ПГ отмечены существенные отличия в значениях  $[O_2]'$  при 20 и 10 °С (1,50 и 0,79 мг O<sub>2</sub>/л), что свидетельствует о разной реакции компонентов ОВ на условия окисления при разных температурах. Значения  $v_1$  в воде разных районов озера распределены неравномерно (табл. 3), а соотношение скоростей потребления O<sub>2</sub> на I-й стадии БПК при 20 и 10 °С было наименьшим в мелководной ПхГ (1,10), в ЦП – немного выше (1,50), а в ПГ и КГ – еще выше (1,58–1,65).

Развитие II-й стадии БПК отмечено при 20 °С в воде из ЦП и ПГ, при этом кинетику БПК по A-типу описывают параметры, средние значения которых составляли соответственно:  $w_2$  – 0,129 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $B_{O_2}$  – 0,00272 и 0,00391 (0,00332) мг/л и  $[O_2]''$  – 0,770 мг O<sub>2</sub>/л. При 10 °С развитие II-й стадии БПК отмечено в воде из ЦП, КГ и ПГ при значениях параметров соответственно:  $w_2$  – 0,0929, 0,123, 0,226 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>,  $B_{O_2}$  – 0,00636, 0,00312, 0,000576 мг/л,  $[O_2]''$  – 1,039, 1,763, 0,570 мг O<sub>2</sub>/л. Отметим, что при 20 и 10 °С близкие значения параметров II-й стадии БПК, в частности  $w_2$  и  $B_{O_2}$ , отмечены в экспериментах с водой из ЦП, ПГ и КГ; важно также, что в этих экспериментах значения  $[O_2]''$  при 10 °С выше в 1,2–2,5 раза, чем при 20 °С (табл. 3).

Фиксируемые в весенних экспериментах с водой из ЦП, ПхГ, КГ и ПГ значения скоростей потребления O<sub>2</sub> на линейной стадии,  $\omega_s$ , составили при 20 °С соответственно 0,0106, 0,0228, 0,0368 и 0,0286 мг O<sub>2</sub>/(л·сут). Таким образом, при 20 °С наименьшая скорость потребления O<sub>2</sub> на линейной стадии отмечена в воде из ЦП, а наибольшая – в воде из КГ. При 10 °С значения  $\omega_s$  отмечены в экспериментах с водой из ПхГ и ПГ (соответственно 0,0056 и 0,00935 мг O<sub>2</sub>/(л·сут)). Оцененные скорости потребления O<sub>2</sub> на линейной стадии при 20 °С в воде из ПхГ и ПГ выше, чем при 10 °С, соответственно в 4,1 и 3,1 раза (табл. 3).

Надо отметить, что весной в ЦП и КГ не зафиксировано потребления O<sub>2</sub> при 10 °С соответственно после 90-х и 70-х суток при наличии в исследуемой воде растворенного O<sub>2</sub>. Во всех экспериментах с водой из других акваторий отмечено развитие БПК, поэтому причина остановки развития БПК на линейной стадии должна исследоваться в специальных экспериментах.

Таблица 3. Сводная таблица кинетических параметров БПК, оцененных в исследованиях с водой из разных акваторий Онежского озера в 2013–2017 гг.

Table 3. Summary table of BOD kinetic parameters assessed for different areas of Lake Onego in 2013–2017

Район озера, год, сезон [тип отбора проб воды] Lake region, year, season [type of water sampling]	Кинетические БПК-параметры Kinetic BOD parameters									
	I-я стадия (по E- или A-типу) I stage (on E- or A-type)			Линейная стадия Linear stage		II-я стадия II stage	БПК <sub>полн</sub> BOD <sub>total</sub>			
	Тип БПК BOD type	[O <sub>2</sub> ] <sup>I</sup> , 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)	БПК <sub>126</sub> , мг O <sub>2</sub> /л BOD <sub>126</sub> , mg O <sub>2</sub> /L	[O <sub>2</sub> ] <sup>II</sup> , мг O <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /L	Расчет	Опыт	
								Calculate	Experiment	мг O <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ЦП, 2013, З [2] CP, 2013, W [2]	E A	0,94 0,90	0,138 0,315	0,130 0,0128	– –	– –	1,28 1,387	2,22 2,287	(2,22) (2,29)	
ЦП, 2017, З [2] CP, 2017, W [2]	E A	0,65 0,31	0,254 0,400	0,165 3,73·10 <sup>-4</sup>	0,0161 0,0167	0,788** 0,818**	–	1,438 1,128	1,44 1,13	
КГ, 2013, З [2] KB, 2013, W [2]	E E	0,43 0,28	0,148 0,173	0,0636 0,0484	0,0132 0,00875	1,663 1,103	0,44 0,23	2,533 1,613	2,52 1,61	
РШ, 2013, З [1] RS, 2013, W [1]	A A	1,35 0,524	0,305 0,185	0,0885 0,0149	0,0317 0,0152	3,994 1,915	2,86 1,356	8,195 3,795	8,20 3,81	
РШ, 2016, З [1] RS, 2016, W [1]	A E	1,90 0,68	0,265 0,189	0,0785 0,128	0,0327 0,0201	4,120 2,533	2,005 0,75	8,025 3,963	7,99 (3,96)	
РШ, 2017, З [1], RS, 2017, W [1]	E E	2,53 0,66	0,125 0,175	0,316 0,116	– 0,0143	– 1,801*	1,413 1,49	4,170 3,951	4,16 3,45	
ПГ, 2013, З [2] PB, 2013, W [2]	E E	0,38 0,32	0,131 0,0922	0,0498 0,0295	0,0268 0,0115	3,377 1,449	–	3,757 1,769	(3,76) 1,77	
ПГ, 2016, З [2] PB, 2016, W [2]	E E	3,335! 0,50	0,138 0,0910	0,460! 0,0455	0,0228 0,0142	2,873 1,789	1,585 –	7,793 2,289	7,86 2,29	
ПГ, 2017, З [2] PB, 2017, W [2]	E E	0,39 0,23	0,138 0,0968	0,0538 0,0223	0,0370 0,0177	4,662 2,230	–	5,052 2,460	5,05 2,46	
ЦП, 2012, В [1] CP, 2012, Sp [1]	A A	0,40 0,303	0,418 0,652	0,0140 6,16·10 <sup>-4</sup>	0,0108 0,00086	1,361 0,108	–	1,761 0,411	1,76 0,41	
ЦП, 2013, В [2] CP, 2013, Sp [2]	E E	0,89 0,83	0,130 0,0931	0,116 0,0773	0,0106 –	0,965 <sup>+</sup> –	0,83 1,04	2,685 1,87	2,70 1,87	
ЦП, 2016, В [2], CP, 2016, Sp [2]	A E	0,31 0,75	1,405 0,111	0,0905 0,0833	0,0143 0,00751	1,802 0,946	–	2,112 1,696	(2,11) (1,70)	
ЦП, 2017, В [1] CP, 2017, Sp [1]	A A	0,245 0,58	0,371 0,259	0,00281 0,00722	0,0126 0,0047	1,588 0,427*	–	1,833 1,007	(1,83) 1,01	
ПхГ, 2013, В [1] PhB, 2013, Sp [1]	E E	0,80 0,75	0,115 0,111	0,0920 0,0833	0,0228 0,0056	2,873 0,706	–	3,673 1,458	3,67 1,46	
КГ, 2013, В [1] KB, 2013, Sp [1]	E E	1,95 1,80	0,130 0,0876	0,254 0,158	0,0368 –	4,637 –	– 1,76	6,587 3,560	6,58 3,58	
РШ, 2013, В [1] RS, 2013, Sp [1]	E E	3,00 1,44	0,134 0,120	0,402 0,173	– 0,0351	– 4,423	4,82 –	7,82 5,863	7,87 5,87	
РШ, 2013, В [1] RS, 2013, Sp [1]	E E	3,40 1,575	0,102 0,117	0,347 0,184	– 0,0282	– 3,553	4,42 0,738	7,82 5,866	7,87 5,87	
РШ, 2016, В [1] RS, 2016, Sp [1]	E A	2,75 0,90	0,0829 0,430	0,228 0,156	0,00657 0,00714	0,828 0,650*	4,507 1,92	8,085 3,47	8,06 3,50	
РШ, 2017, В [1] RS, 2017, Sp [1]	A A	1,00 1,65	0,420 0,276	0,0077 0,0688	– –	– –	6,98 3,44	7,98 5,09	(7,96) (5,09)	
ПГ, 2013, В [2] PB, 2013, Sp [2]	E E	1,50 0,79	0,103 0,139	0,155 0,110	0,0286 0,00935	3,604 1,178	0,71 0,57	5,814 2,538	5,81 2,55	
ПГ, 2016, В [2] PB, 2016, Sp [2]	E E	1,00 0,850	0,0988 0,247	0,0988 0,210	0,0254 0,0121	3,200 1,525	0,847 –	5,047 2,855	5,02 2,88	
ПГ, 2017, В [2] PB, 2017, Sp [2]	E E	1,00 0,85	0,129 0,0876	0,120 0,0745	0,0214 0,00867	2,696 1,092	1,24 –	4,936 1,942	4,94 1,94	
ЦП, 2013, Л [2] CP, 2013, Sm [2]	A E	0,667 0,41	0,352 0,125	0,0143 0,0512	0,0115 0,00592	1,449 0,746	–	2,116 1,156	(2,12) 1,12	
ПхГ, 2013, Л (1) PhB, 2013, Sm [1]	A A	1,410 0,785	0,579 0,392	0,0215 0,0182	0,0212 0,0194	2,671 2,444	–	4,081 3,229	4,07 3,23	

Table 3 (continued)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КГ, 2013, Л [2]	Е	0,63	0,175	0,110	0,0158	1,991	0,553	3,174	3,17
КВ, 2013, См [2]	Е	0,43	0,125	0,0537	0,0131	1,676	–	2,106	2,10
РШ, 2013, Л [1]	Е	7,97	0,100	0,797	–	–	–	7,97	8,02
RS, 2013, См [1]	Е	3,63	0,080	0,290	0,0273	3,440	3,46	10,53	10,52
ПГ, 2013, Л [2]	Е	0,22	0,101	0,0222	0,0178	2,243	0,352	2,815	2,81
РВ, 2017, См [2]	Е	0,15	0,101	0,0151	0,0069	0,869	0,324	1,343	1,34
ЦП, 2013, О [2]	Е	0,65	0,129	0,0839	0,00935	1,178	0,094	1,922	1,93
СР, 2013, А [2]	Е	0,373	0,203	0,0757	0,00457	0,576	–	0,949	0,96
ЦП, 2013, О [2]	Е	1,20	0,330	0,306	0,0106	1,336	0,31	2,846	(2,85)
СР, 2013, А [2]	Е	0,26	0,403	0,0135	0,00829	1,044	–	1,304	1,30
ПхГ, 2013, О [1]	А	0,613	0,293	0,0345	0,0177	2,230	–	2,843	2,84
PhB, 2013, А [1]	А	0,41	0,321	$3,36 \cdot 10^{-3}$	0,00629	0,793	–	1,203	1,20
КГ, 2013, О [2]	Е	0,57	0,150	0,0855	0,0138	1,739	0,33	2,639	2,62
КВ, 2013, А [2]	Е	0,30	0,0922	0,0277	–	–	0,677	0,977	0,967
РШ, 2013, О [1]	А	1,20	0,309	0,203	0,0282	3,553	2,336	7,069	(7,08)
RS, 2013, А [1]	А	0,572	0,347	0,0881	0,0289	3,641	–	4,213	4,21
РШ, 2013, О [1]	Е	1,50	0,180	0,270	0,0231	2,911	2,59	7,001	7,00
RS, 2013, А [1]	Е	0,62	0,180	0,112	0,0247	3,112	0,48	4,212	4,21
ПГ, 2013, О [2]	А	1,149	0,225	0,0657	0,0105	1,323	0,72	3,192	3,18
РВ, 2013, А [2]	А	0,64	0,281	0,0304	0,00857	1,080	0,48	2,200	2,20
ПГ, 2016, О [1]	А	1,691	0,363	0,314	0,0247	3,112	–	4,803	4,80
РВ, 2016, А [1]	А	1,087	0,339	0,150	0,0121	1,525	–	2,612	2,60

*Примечание.* Значения над чертой – для экспериментов при 20 °С, под чертой – при 10 °С; в круглых скобках – отвечающие закономерному изменению во времени уточненные конечные значения БПК, учитываемые при обработке данных эксперимента. З, В, Л, О – соответственно зима, весна, лето, осень. Тип отбора проб: [1] – из поверхностного горизонта (0,5 или 1 м), [2] – интегральная, из горизонтов от 1 м до дна; \* для периода 91 сут; \*\* для периода 49 сут. Прочерк – нет данных.

*Note.* Above the line – data for experiments at 20 °С, below the line – data for experiments at 10 °С; number in parentheses is adjusted final experimental value of the BOD taken into account when processing the experiment. W, Sp, Sm, A – winter, spring, summer, autumn, respectively. Sampling type: [1] – from surface horizon (0.5 or 1 m), [2] – integral, horizons from the surface to the bottom. \*For period 91 days; \*\*for period 49 days. The dash means the absence of data.

Отношение потребления  $O_2$  на I-й стадии к линейной ( $v_1/\omega_s$ ) характеризует лабильность окисляемых  $OB$  на I-й стадии. При 20 °С это отношение составляло 4,1–4,0 в воде из ЦП и ПхГ, 6,9 и 5,4 – в воде из КГ и ПГ, а при 10 °С – 14,9 и 11,8 в воде из ПхГ и ПГ соответственно. Повышенные значения  $v_1/\omega_s$  для ПхГ и ПГ при 10 °С показывают меньшую способность окисления  $OB$  на линейной стадии при понижении температуры.

Общее потребление  $O_2$  в весенней воде из ЦП составило 1,922 мг  $O_2$ /л (доли потребления  $O_2$  на I-й, II-й и линейной стадиях составили соответственно 29,1, 27,2 и 43,7 %). В воде из ПГ оцененное общее потребление  $O_2$  составило 5,814 мг  $O_2$ /л (с потреблением 25,8, 12,2 и 62,0 % на указанных стадиях). В экспериментах с водой из ПхГ и КГ II-я стадия не фиксировалась. Общее потребление  $O_2$  в воде из ПхГ составило 3,673 мг  $O_2$ /л (21,8 и 78,2 % расходовалось на I-й и линейной стадиях), а в воде из КГ – 6,587 мг  $O_2$ /л (29,6 и 70,4 % на этих стадиях).

Развитие БПК в разные сезоны 2013 г. в воде из устья РШ отражают разные типы БПК-урав-

нений: при 20 и 10 °С кинетику БПК описывают как одностепенные уравнения (зимой – ААЛ-типа, а осенью – ЕАЛ-типа), так и уравнения разного типа (весной – ЕА- и ЕАЛ-типа, а летом – Е- и ЕАЛ-типа) (табл. 3, рис. 3).

Кинетика БПК I-й стадии в экспериментах с зимней водой из устья РШ при 20 и 10 °С представлена уравнениями А-типа, а в весенней, летней и осенней воде – уравнениями Е-типа. Значения констант скорости I-й стадии БПК в разные сезоны в экспериментах с водой РШ были близки при 20 и 10 °С со средними значениями для периода зимы  $w_1 = 0,245$  л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup> и периода открытой воды  $k = 0,127$  сут<sup>-1</sup>. Однако значения  $[O_2]'$  при 20 и 10 °С отличались и составляли: зимой – 1,35 и 0,524, весной – 3,40 и 1,575, летом – 7,97 и 3,63 и осенью – 1,50 и 0,62 мг  $O_2$ /л. Также отличались значения  $v_1$  при 20 и 10 °С: в зимней воде они составили 0,0885 и 0,0149, в весенней – 0,347 и 0,184, в летней – 0,797 и 0,290, в осенней воде – 0,270 и 0,112 мг  $O_2$ /(л·сут). Таким образом, при 20 °С значения  $[O_2]'$  и  $v_1$  в разные сезоны всегда выше, чем при 10 °С:  $[O_2]'$  – в 2,2–2,6 раза, а  $v_1$  – в 1,9–5,9

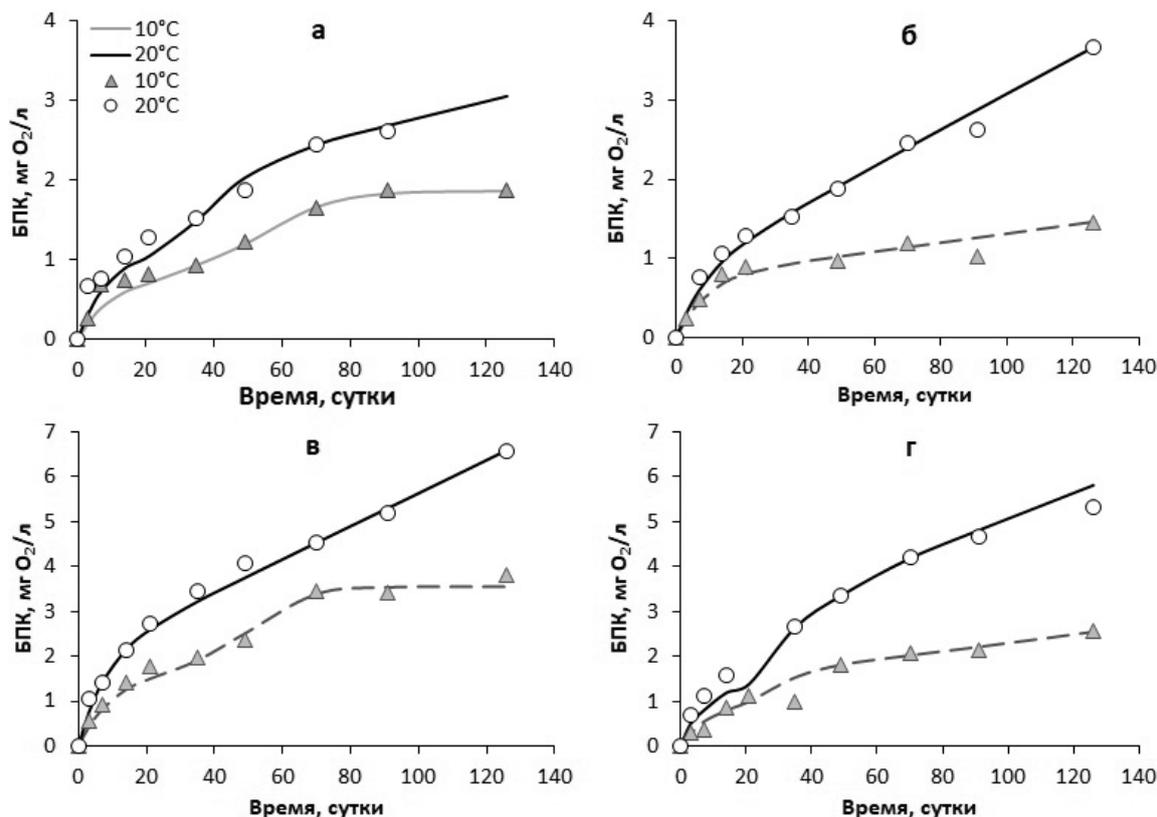


Рис. 2. Развитие BPK в экспериментах при 20 и 10 °С с водой из разных акваторий Онежского озера: а – ЦП, б – ПХ, в – КГ, г – ПГ, отобранной весной 2013 г.

Здесь и на рис. 3 – уравнения для разных BPK-кривых; обозначение расчетных кривых и экспериментальных данных по BPK на фрагментах б–г и рис. 3 – см. фрагмент а

Fig. 2. BOD-curves in the experiments at 20 and 10 °С with water from different parts of Lake Onego in spring 2013: а – CP, б – PkB, в – KB, г – PB.

Here and in Fig. 3 – different BOD-curve equations; the designation of the BOD calculation curves and experimental data in fragments б–г and Fig. 3 is the same as in fragment а

раза (наибольшие отличия – в зимней воде, наименьшие – в весенней, а средние – в летней и осенней воде) (рис. 3).

Значения кинетических параметров II-й стадии BPK в экспериментах с водой из РШ при 20 °С также отличались в разные сезоны. Для зимы, весны и осени отличия в значениях  $w_2$  невелики (в пределах 0,079–0,0984, среднее 0,0874 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>), у других параметров колебания выше:  $B_{02}$  – 0,0199–0,229 мг/л и  $[O_2]''$  – 2,59–4,42 мг O<sub>2</sub>/л. Их значения при 10 °С для разных сезонов менялись в пределах:  $w_2$  – 0,118–0,238 (0,153) л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>;  $B_{02}$  – 2,89·10<sup>-6</sup>–0,0116 мг/л и  $[O_2]''$  – 1,356–3,46 мг O<sub>2</sub>/л. Необходимо отметить, что наибольшие значения  $B_{02}$  и  $[O_2]''$  при 20 °С отмечались весной, а при 10 °С – летом (табл. 3).

Скорости BPK на линейной стадии,  $\omega_s$  (мг O<sub>2</sub>/(л·сут)), при 20 и 10 °С составляли в зимней воде соответственно 0,0317 и 0,0152. Из-за полного расхода O<sub>2</sub> на I-й и II-й стадиях в весен-

ней и летней воде при 20 °С не отмечено развития линейной стадии, а при 10 °С значения  $\omega_s$  были достаточно близки, весной и летом они составили – 0,0282 и 0,0273 соответственно. Сопоставимы также значения  $\omega_s$  осенью при разных температурах (рис. 3).

Отношение потребления O<sub>2</sub> на I-й стадии к скорости на линейной стадии ( $v_1/\omega_s$ ) при 20 °С в зимней воде составило 2,8, а в осенней воде – 11,7 (в весенней и летней воде его оценить нельзя, поскольку  $\omega_s$  не выявлено). При 10 °С отношение  $v_1/\omega_s$  зимой составляло 1,0, весной – 6,5, летом – 10,6 и осенью – 11,7, что указывает на тенденцию возрастания лабильности окисляемого ОВ на I-й стадии от зимы к осени.

В воде из устья РШ во все сезоны общее BPK за период эксперимента было существенно выше: в зимней и осенней воде значения BPK<sub>126</sub> составляли соответственно 8,179 и 7,006 мг O<sub>2</sub>/л (на I-й стадии – 16,2–21,4 %,

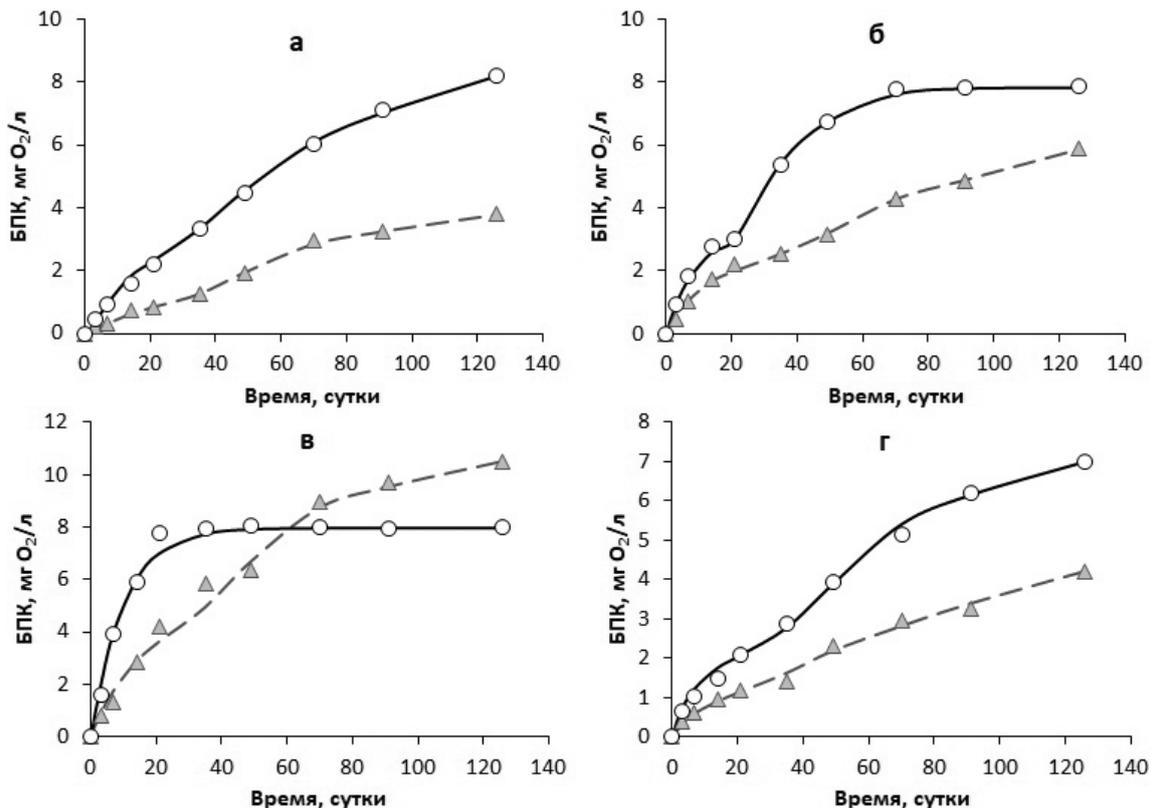


Рис. 3. Развитие БПК в экспериментах при 20 и 10 °С с водой из устья р. Шуя, отобранной в разные сезоны 2013 г.: а – зима; б – весна, в – лето; г – осень

Fig. 3. BOD-curves in the experiments at 20 and 10 °C with water from RS in different seasons of 2013: а – winter, б – spring; в – summer; г – autumn

на II-й стадии – 35,0–37,0 %, на линейной стадии – 48,8–41,6 %), в весенней воде при общем потреблении – 7,752 мг  $O_2$ /л (на I-й и II-й стадиях – 43,9 и 56,1 % соответственно, линейная стадия не выявлена) и в летней воде – 7,97 мг  $O_2$ /л при 100% потреблении на I-й стадии. Данная тенденция указывает на резкий рост лабильной фракции ОВ именно в летний период, это связано с тем, что р. Шуя является эвтрофным водным объектом.

#### Оцененное потребление $O_2$ по акваториям Онежского озера

Акватория ЦП отличалась от других районов озера наименьшими значениями общего потребления  $O_2$  (БПК<sub>126</sub>, мг  $O_2$ /л): зима – в пределах 2,22–2,679, весна – 1,80–2,996, лето – 2,116, осень – 1,922–2,846 мг  $O_2$ /л. Пределы колебаний БПК<sub>126</sub> в разные сезоны в воде из КГ составили 2,533–6,587, из ПГ – 2,816–5,249, из ПхГ – 2,843–4,081, из РШ – 4,169–8,110 мг  $O_2$ /л.

Анализ кинетических параметров БПК выполнен с учетом влияния на них типа кинети-

ки I-й стадии (Е- или А-тип) и режима отбора проб – (1) или (2). Комбинация этих факторов образует варианты 1–4 влияния на кинетику БПК: варианты 1 и 2 характеризуют при кинетике по Е-типу на I-й стадии БПК – режимы отбора проб соответственно (2) и (1), а варианты 3 и 4 – при кинетике по А-типу – режимы отбора проб соответственно (1) и (2).

При анализе значений кинетических параметров БПК будут учтены эти варианты влияния. Для конкретного сезона при близких значениях параметров БПК (для разных лет или разных акваторий) могут быть оценены средние значения параметров БПК. По составленной подборке данных вычислены двухлетние средние значения параметров – в зимней воде: для ПГ (2013/2017 гг., режим отбора проб (2) –  $[O_2]'$  = 0,365 мг  $O_2$ /л;  $k$  = 0,135 сут<sup>-1</sup>;  $v_1$  = 0,0518;  $\omega_s$  = 0,0319 мг  $O_2$ /(л·сут)) и РШ (2013/2016 гг., режим отбора проб (1) –  $[O_2]'$  = 1,675 мг  $O_2$ /л;  $w_1$  = 0,329 л·мг<sup>-1</sup>·сут<sup>-1</sup>;  $v_1$  = 0,0608;  $\omega_s$  = 0,0322 мг  $O_2$ /(л·сут)) и в весенней воде: для ПГ (2013/2016 гг., режим отбора проб (2) –  $[O_2]'$  = 1,25 мг  $O_2$ /л;  $k$  = 0,101 сут<sup>-1</sup>;  $v_1$  = 0,127;  $\omega_s$  = 0,0261 мг  $O_2$ /(л·сут)) и РШ (2013/2016 гг., режим отбора проб (1) –  $[O_2]'$  = 3,08 мг  $O_2$ /л;

$k = 0,0924 \text{ сут}^{-1}$ ;  $v_1 = 0,318$ ;  $\omega_s = 0,00319 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ , а по разным сезонам – при режимах отбора воды (2) в 2013 г. – дважды: для КГ (зима-лето-осень) –  $[O_2]^I = 0,543 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ;  $k = 0,158 \text{ сут}^{-1}$ ;  $v_1 = 0,0864$ ;  $\omega_s = 0,0143 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$  и для ПГ (зима-лето) –  $[O_2]^I = 0,30 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ;  $k = 0,116 \text{ сут}^{-1}$ ;  $v_1 = 0,036$ ;  $\omega_s = 0,0225 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ .

Далее представлена подборка кинетических параметров БПК при 20 °С для разных сезонов по акваториям Онежского озера с выделением 3–4 вариантов разных комбинаций и сочетаний факторов, влияющих на развитие БПК, а также наибольшие значения соотношений скоростей потребления  $O_2$  на I-й стадии и линейной стадиях ( $v_1/\omega_s$ ) и потребления  $O_2$  на I-й стадии к его потреблению на линейной стадии ( $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20)$ ). Вклад каждой стадии потребления  $O_2$  в БПК<sub>126</sub> характеризуют доли потребления  $O_2$  по отдельным стадиям.

**В зимней воде** отметим наибольшие параметры кинетики БПК в акваториях ЦП, КГ и ПГ (по варианту 1): в воде из ЦП это значения  $[O_2]^I = 0,94 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ,  $v_1 = 0,130 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ,  $[O_2]^{II} = 1,28 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ; в воде из КГ повышено отношение скоростей БПК ( $v_1/\omega_s = 4,8$ ); в воде из ПГ –  $\omega_s (0,0319 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут}))$ ,  $\omega_s \cdot 126 (4,02 \text{ мг } O_2/\text{л})$ , БПК<sub>126</sub> ( $4,404 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ). В варианте 2 высокие значения в воде ЦП  $k (0,254 \text{ сут}^{-1})$  и лабильности ОВ, окисляемого на I-й стадии ( $v_1/\omega_s = 10,3$ ). В воде из РШ в вариантах 2 и 3 в сравнении с озерными водами повышены в зимней воде значения большинства параметров:  $[O_2]^I = 2,75$  и  $1,675 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ,  $v_1 = 0,344 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ,  $\omega_s = 0,0322 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ,  $v_1/\omega_s = 10,7$ ; ( $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20)$ ) –  $2,6$ ,  $\omega_s \cdot 126 = 4,055 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ,  $[O_2]^{II} = 2,38 \text{ мг } O_2/\text{л}$ , БПК<sub>126} = 4,169 и  $8,110 \text{ мг } O_2/\text{л}$ . Таким образом, в зимней воде из ЦП в сравнении с другими районами озера повышено значение  $[O_2]^I = 0,94 \text{ мг } O_2/\text{л}$ , а в воде из РШ повышены значения большинства параметров БПК. Наивысшая лабильность ОВ, окисляемого на I-й стадии БПК, характеризует воды из ЦП и РШ ( $v_1/\omega_s = 10,3$  и  $10,7$ ).</sub>

**В весенней воде** из ЦП, КГ, ПГ и ПхГ (вариант 2) близки значения  $k$  (среднее  $0,128 \text{ сут}^{-1}$ ), повышены значения лабильности ОВ, окисляемого на I-й стадии ( $v_1/\omega_s = 4,0$ – $10,9$ ). В воде из ЦП повышены значения  $v_1/\omega_s = 10,9$ ,  $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20) = 3,8$ ; а в воде из КГ – значения  $[O_2]^I = 1,95 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ,  $v_1 = 0,254$ ,  $\omega_s = 0,0368 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ,  $\omega_s \cdot 126 = 4,637$ , БПК<sub>126} = 6,587 \text{ мг } O\_2/\text{л}; в воде из ПГ –  $[O_2]^{II} = 1,24 \text{ мг } O_2/\text{л}$ . В воде ПхГ и ЦП близки параметры  $[O_2]^I (0,80 \text{ мг } O_2/\text{л})$  и  $v_1 (0,116$ – $0,092 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ). В водах ЦП и ПГ близки процентные соотношения потребления  $O_2$  по стадиям (на I-й –  $20,3$ – $27,0$  %, на II-й –  $13,5$ – $28,0$  %, на линейной –  $45,0$ – $62,7$  %).</sub>

**В летней воде** из КГ (вариант 1) повышены значения  $v_1 = 0,110 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$  и отношения  $v_1/\omega_s = 7,0$ , ( $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20) = 2,0$ ; в воде из РШ (вариант 2) – значения  $[O_2]^I = 7,97 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ,  $v_1 = 0,797 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ , БПК<sub>126} = 7,97 \text{ мг } O\_2/\text{л}; в воде из ПхГ (вариант 3) – значения  $[O_2]^I = 1,41 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ,  $\omega_s = 0,0212 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ,  $\omega_s \cdot 126 = 2,671$ , БПК<sub>126} = 4,081 \text{ мг } O\_2/\text{л}. В водах из ПГ (вариант 1), ПхГ (вариант 3) и ЦП (вариант 4) близки наименьшие значения  $v_1/\omega_s (1,0$ – $1,2)$ .</sub></sub>

**В осенней воде** из ЦП и КГ (вариант 1) близки значения параметров I-й стадии БПК ( $[O_2]^I = 0,65$  и  $0,57$  (среднее  $0,61$ )  $\text{ мг } O_2/\text{л}$ ;  $k = 0,129$  и  $0,150 (0,140) \text{ сут}^{-1}$ ;  $v_1 = 0,0839$  и  $0,0855 (0,0847) \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ ), отношения  $v_1/\omega_s (9,0$  и  $6,2)$  и  $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20) (3,5$  и  $2,1)$ , потребления  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126 = 1,178$  и  $1,739$ ), общего потребления  $O_2$  (БПК<sub>126} = 1,922 и  $2,639 \text{ мг } O_2/\text{л}$ ) и процентные соотношения потребления  $O_2$  по стадиям (на I-й –  $33,8$ – $21,6$  %, на II-й –  $4,9$ – $12,5$  %, на линейной –  $61,3$ – $65,9$  %). В воде из РШ (вариант 2) повышены значения  $[O_2]^I = 1,50$ ,  $[O_2]^{II} = 2,59$ , БПК<sub>126} = 7,001 \text{ мг } O\_2/\text{л} при процентных соотношениях потребления  $O_2$  по стадиям (на I-й –  $21,4$  %, на II-й –  $37,0$  %, на линейной –  $41,6$  %). В воде из ЦП, ПГ и ПхГ (вариант 3) близки константы скорости  $w_1 (0,330, 0,363, 0,293$  (среднее  $0,329$ )  $\text{ л}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$ ), скорости  $v_1 = 0,306, 0,314, 0,345 (0,322) \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ , повышены соотношения скоростей  $v_1/\omega_s = 28,9, 12,7, 19,5 (20,4)$ , отношений потребления  $O_2$  на I-й и линейной стадиях –  $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20) = 5,7, 3,4, 1,7 (3,6)$ . В воде из ПГ отмечены наибольшие значения потребления  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126 = 3,112$ ).</sub></sub>

#### *Среднесезонные параметры БПК*

Среднесезонные значения параметров БПК оценены для 2013 г. для акваторий КГ (зима-лето-осень) и ПГ (зима-лето) при одинаковых значениях влияющих на БПК факторов (вариант 1). Для указанных акваторий в 2013 г. в эти сезоны отмечены сравнительно небольшие отличия в значениях основных кинетических параметров БПК.

В воде из КГ среднесезонное предельное потребление  $O_2$  на I-й стадии (по E-типу) составило  $0,543 \text{ мг } O_2/\text{л}$  при значениях  $k = 0,158 \text{ сут}^{-1}$ ,  $v_1 = 0,0864$  и  $\omega_s = 0,0143 \text{ мг } O_2/(\text{л}\cdot\text{сут})$ , соотношение  $v_1/\omega_s = 6,0$ , а соотношение потребления  $O_2$  на I-й стадии к линейной за 20 сут –  $[O_2]^I/(\omega_s \cdot 20) = 1,9$ . За период эксперимента в воде из КГ среднее общее потребление  $O_2$  – БПК<sub>126} – оценено равным  $2,786 \text{ мг } O_2/\text{л}$  при процентных соотношениях потребления  $O_2$  по стадиям (на I-й –  $19,5$  %, на II-й –  $15,8$  %, на линейной –  $64,7$  %).</sub>

В воде из ПГ указанные параметры БПК составили:  $[O_2]'$  – 0,30 мг  $O_2$ /л;  $k$  – 0,116 сут<sup>-1</sup>;  $v_1$  – 0,0360 и  $\omega_s$  – 0,0225 мг  $O_2$ /(л·сут). Соотношение  $v_1/\omega_s$  – 1,6, а потребление  $O_2$  на I-й стадии к потреблению на линейной стадии за 20 сут –  $[O_2]'/(\omega_s \cdot 20)$  – 0,7. В воде из ПГ за 126 сут среднее общее потребление  $O_2$  – БПК<sub>126</sub> – оценено равным 3,312 мг  $O_2$ /л (на I-й – 9,1 %, на II-й – 5,3 %, на линейной – 85,6 %).

Установлены следующие отличия в водах КГ и ПГ среднесезонных значений кинетических параметров БПК:

- за период опыта общее потребление  $O_2$  в 1,2 раза выше в воде из ПГ (3,312 мг  $O_2$ /л),
- относительное потребление  $O_2$  по стадиям: в акватории КГ оно выше на стадиях I и II (соответственно 19,5 и 15,8 %), чем в акватории ПГ (9,1 и 5,3 %), а на линейной стадии потребление  $O_2$  в акватории ПГ выше (85,6 %), чем в акватории КГ (64,7 %);
- показатели лабильности ОВ на I-й стадии ( $v_1/\omega_s$  и  $[O_2]'/(\omega_s \cdot 20)$ ) выше в воде из КГ – 6,0 и 1,9, в воде из ПГ значения этих параметров 1,6 и 0,7;
- в воде из ПГ в 1,6 раза выше скорость окисления ОВ на линейной стадии, и это в целом определяет более высокое в этой воде значение БПК<sub>126</sub> [Леонов, Зобкова, 2020б].

#### *Соответствие значений кинетических параметров БПК концентрациям ОВ*

Для проверки соответствия компонентов ОВ кинетическим параметрам БПК использовались данные, приведенные в работе [Ефремова, Зобкова, 2019], по содержанию лабильных компонентов (углеводов, липидов и белков), а также ГВ (сравнительно «стойких» к биохимическому окислению компонентов ОВ) в воде, использованной для БПК-экспериментов.

Необходимо отметить, что в результате исследования [Ефремова, Зобкова, 2019] было установлено, что ОВ Онежского озера в основном представлено компонентами ГВ (68–81 %) и их доля увеличивалась от ЦП к РШ. При этом такие высокие значения ГВ являются характерными для многих бореальных озер, что также было выявлено в водоемах Швеции, Финляндии и Шотландии [Henriksen et al., 1998]. На компоненты автохтонного ОВ в Онежском озере приходилось только 19–32 %, из которых 10 % – на углеводы, ~1 % – на липиды, ~0,4 % – на белки и ~0,3 % – на мочевины, а оставшиеся в среднем 14 % от общего содержания ОВ относятся к другим компонентам ОВ (свободные аминокислоты, нуклеиновые кислоты, летучие органические соединения и многие другие), ко-

личество и разнообразие которых в природных водах очень велико [Ефремова, Зобкова, 2019].

На рис. 4 показаны полученные зависимости между значениями лабильных компонентов ОВ (белков, липидов и углеводов) 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<sub>0</sub>) с общим потреблением  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s \cdot 126$  (б, в), а также между скоростными параметрами изменения значений «стойких» компонентов ОВ ( $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$ ) и потреблением  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s$ ) (г). По каждой группе взаимодействующих показателей ОВ с кинетическими параметрами БПК получено по три зависимости, характеризующие высокосignификантными коэффициентами детерминации  $R^2$  (рис. 4) [Леонов, Зобкова, 2020б].

Общий анализ данных на рис. 4 позволяет выделить следующие закономерности по всем зависимостям. В зону 1 на рис. 4 попадают в основном низкопродуктивные акватории Онежского озера (ЦП и КГ), а иногда ПхГ (мелководная, с хорошим водообменом) и ПГ в летне-осенний период, когда близки гидрохимические характеристики ПГ и ЦП. В промежуточной зоне 2 расположены в основном участки губ ПГ и ПхГ, которые более продуктивны в сравнении с открытыми районами Онежского озера. В третью зону «падают» наиболее продуктивные устьевой участок РШ и ПГ в весенний и зимний периоды, когда вода в губе по гидрохимическим показателям близка к речным водам.

Из результатов анализа зависимостей на рис. 4 (г) следует важный факт – повышение скорости потребления  $O_2$  на линейной стадии с ростом скорости изменения условно «стойких» компонентов ОВ ( $[ХПК_0 - ХПК_{126}]/126$ ). При этом скорость трансформации ГВ, которые относятся к этим компонентам, крайне мала и слабо изменяется в различные сезоны года [Лозовик и др., 2017]. Очевидно, факт возрастания скорости потребления  $O_2$  на линейной стадии связан с влиянием взвешенного ОВ, которое увеличивается в водоемах с выраженным трофическим статусом и играет важную роль при трансформации ОВ [Ostapenia et al., 2009; Верес, Остапеня, 2011].

При исследовании проб воды из олиго-, мезо- и эвтрофных водоемов, в которых в сравнении с акваторией ЦП Онежского озера повышены значения РМ, на линейных стадиях БПК отмечались существенно большие скорости потребления  $O_2$  ( $\omega_s$ ). Поэтому различия в значениях ТОС –  $C_{\text{лаб}}$  в этих случаях могут прини-

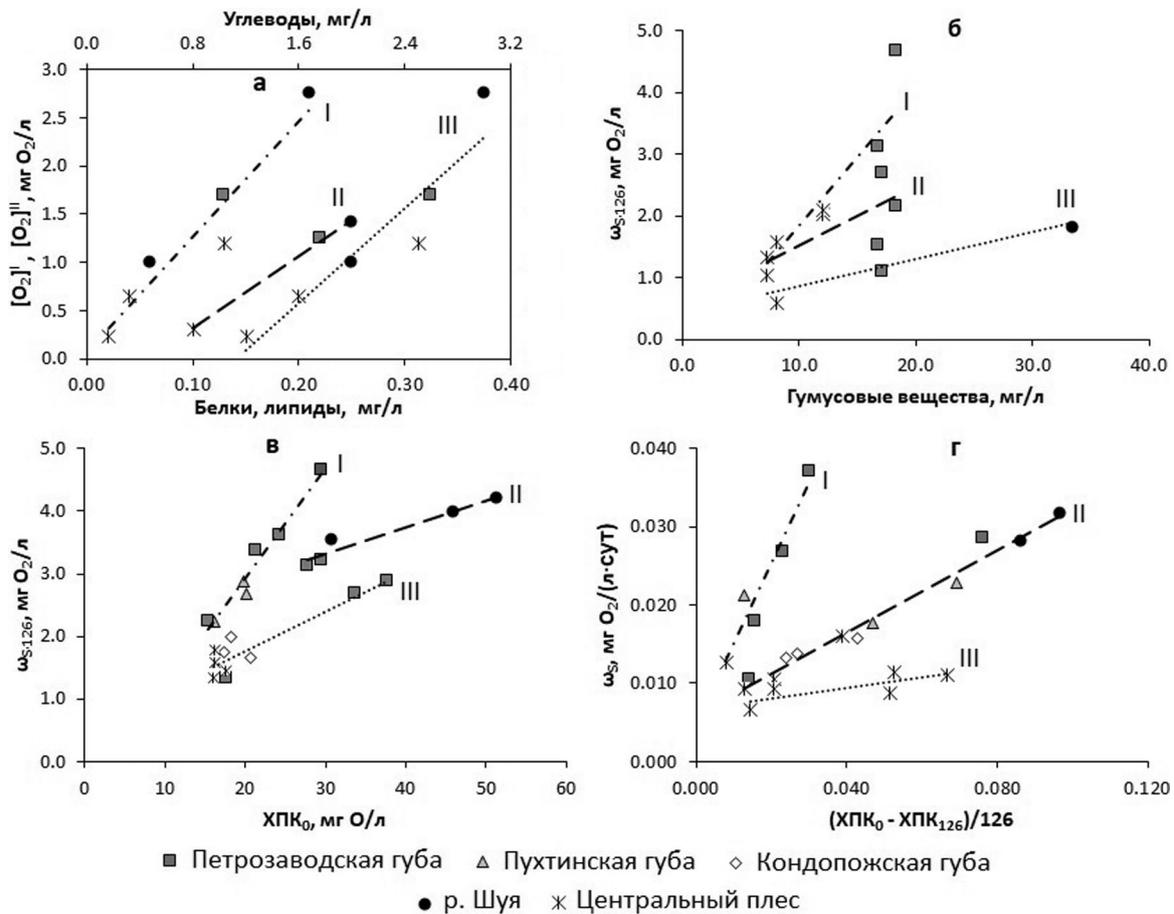


Рис. 4. Соответствие значений показателей ОВ и кинетических параметров БПК:

**а)** зависимости I–III между начальными концентрациями лабильных компонентов ОВ (Б – белки, Л – липиды и У – свободные 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. 4. Correspondence of organic matter concentrations and kinetic BOD parameters:

**a)** linear connections I–III between initial labile OM concentrations (Б – proteins, Л – lipids and У – carbohydrates) and  $O_2$  demand at the 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 change rate of conditionally “stable” OM components ( $[XPK_0 - XPK_{126}]/126$ ) and  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s$ )

маться эквивалентными РМ и по значению РМ можно оценить  $OB_{взв}$  по эмпирическому уравнению [Sabylina et al., 2010].

Следовательно, значения скорости потребления  $O_2$  на линейной стадии  $\omega_s$  пропорциональны изначальной концентрации РМ. В каче-

стве примера можно привести общие пределы изменения значений  $\omega_s$  (мг  $O_2$ /(л·сут)), оцененных по результатам анализа БПК-данных длительных экспериментов с водой, отобранной из поверхностного горизонта в разные сезоны из разнотипных водоемов Карелии и других водных объектов:

- Онежское озеро: ЦП – 0,0094–0,0161 [Леонов, Зобкова, 2020а], другие акватории озера – 0,0212–0,0368 [Леонов, Зобкова, 2020б];
- Белое море – 0,0056–0,0090 мг  $O_2$ /(л·сут) [Леонов и др., 2019];
- слой 0–10 м морских и океанических вод – 0,0004–0,0280 (в среднем 0,0101) мг  $O_2$ /(л·сут) [Леонов, 1977].

Очевидно, скорости потребления  $O_2$  на линейной стадии,  $\omega_s$ , находятся в прямой зависимости от значений показателей взвешенного вещества (РМ или  $OB_{взв}$ ) в исследуемой воде. Это подтверждают полученные зависимости между значениями исходных концентраций РМ и суммарным потреблением  $O_2$  на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126$ ) с высокими значениями коэффициентов детерминации ( $R^2 = 0,66–1,00$ ), построенные по результатам обработки данных длительных БПК-экспериментов с водой из разных районов Онежского озера (рис. 5).

На рис. 5 при 20 и 10 °С положение показателей взаимосвязей I–III между  $\omega_s \cdot 126$  и исходной концентрацией РМ в воде в каждой акватории определяется: типом исследуемых вод отдельных районов озера (в целом качество воды снижается в ряду: ЦП – ПхГ – ПГ – КГ – РШ), сезоном отбора проб, режимом отбора проб воды (1 или 2), а также температурой про-

ведения экспериментов (20 и 10 °С). В результате на каждой взаимосвязи можно выделить несколько объединенных групп, отличающихся между собой параметрами ОВ, значениями РМ и  $\omega_s \cdot 126$ .

**Зависимости I** при 20 и 10 °С построены по данным преимущественно зимних сезонов 2013, 2016 и 2017 гг. из разных акваторий Онежского озера. По средним концентрациям разных компонентов ОВ можно условно выделить три группы данных.

**В первую** включены данные, полученные для воды из горизонта 1 м с повышенными исходными значениями показателей ОВ (ХПК<sub>0</sub> = 48,6; ПО = 22,6 мг О/л; ТОС = 17,5 мг/л) в зимней воде из РШ (2013 и 2016 гг.) при значениях РМ и  $\omega_s \cdot 126$ , меняющихся при 20 °С соответственно в пределах 1,6–2,0 (в среднем 1,8) мг/л и 3,99–4,11 (4,04) мг  $O_2$ /л; а при 10 °С – с наибольшими значениями РМ и  $\omega_s \cdot 126$  в воде РШ для лета 2013 г. и зимы 2016 г. соответственно в пределах 2,0–2,5 (2,3) мг/л и 3,44–2,53 (в среднем 2,99) мг  $O_2$ /л.

**Во вторую** включены данные со средними значениями показателей ОВ (ХПК<sub>0</sub> = 25,7; ПО = 11,5 мг О/л; ТОС = 9,9 мг/л), которые характеризуют воды ПГ (зима 2013 и 2017 гг., весна и осень 2016 г.) и ПхГ (лето 2013 г.) при колебаниях при 20 °С значений РМ и  $\omega_s \cdot 126$  соответственно в пределах 0,4–1,1 (в среднем 1,0) мг/л и 3,38–2,67 (3,05) мг  $O_2$ /л, а при 10 °С в те же сезоны по районам озера значения  $\omega_s \cdot 126$  менялись в пределах 1,45–2,44 (в среднем 1,84) мг  $O_2$ /л. Повышенные значения параметров в этой группе получены в воде из разных горизонтов столба воды: при 20 °С зимой, а при

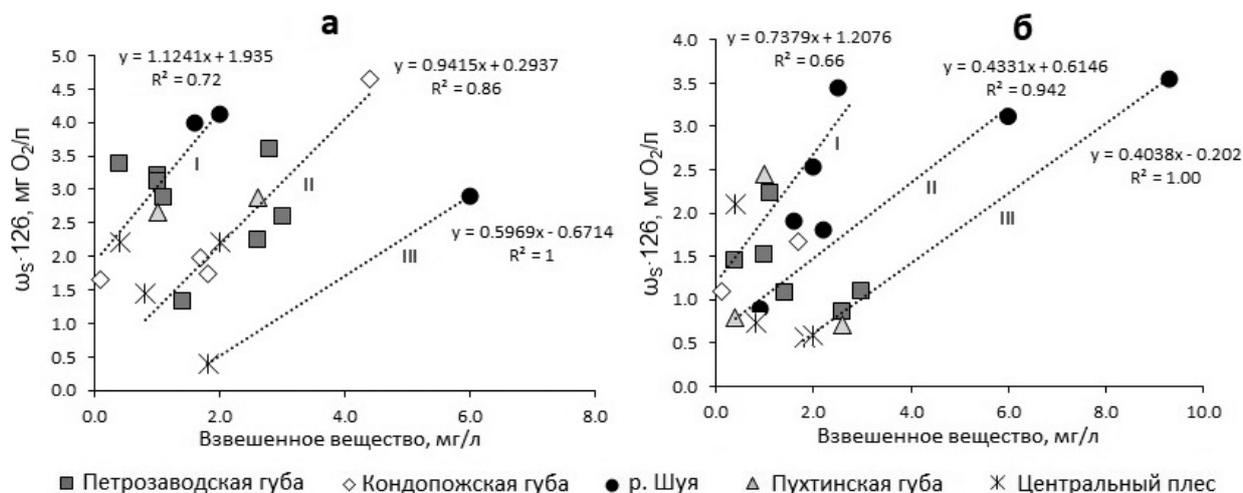


Рис. 5. Зависимости между исходными концентрациями взвешенного вещества и общим потреблением кислорода на линейной стадии ( $\omega_s \cdot 126$ ) в водах из разных районов Онежского озера при: **а** – 20 °С и **б** – 10 °С

Fig. 5. Linear connections between suspended matter concentrations and common  $O_2$  demand at linear stage ( $\omega_s \cdot 126$ ) in water from different parts of Lake Onego at: **а** – 20 °С and **б** – 10 °С

10 °С весной; в воде из горизонта 1 м понижены значения параметров летом и осенью.

**Третья группа** содержит данные с наименьшими значениями показателей ОВ ( $XPK_0 = 18,0$ ;  $PO = 8,3$  мг О/л;  $ТОС = 7,3$  мг/л), которые характеризуют акватории ЦП (зима 2017 г.), ПхГ (осень 2013 г.) и КГ (зима 2013 г.) с колебаниями при 20 °С значений РМ и  $\omega_s \cdot 126$  соответственно в пределах 0–0,4 (в среднем 0,3) мг/л и 2,23–1,66 (2,04) мг О<sub>2</sub>/л, а при 10 °С – с колебаниями  $\omega_s \cdot 126$  в пределах 2,10–0,79 (в среднем 1,33) мг О<sub>2</sub>/л. Повышенные значения параметров при 20 °С получены в воде из 1 м – для ЦП (зима 2017 г.) и ПхГ (осень 2013 г.), а при 10 °С – в воде из ЦП (зима 2017 г.); понижены значения параметров – при 20 °С в воде из КГ (зима 2013 г.), а при 10 °С – в воде из ПхГ (осень 2013 г.).

**Зависимости II** при 20 и 10 °С построены по данным для весны, лета и осени 2013, 2016 и 2017 гг. для разных районов Онежского озера. Все данные подразделяются на две группы.

**В первую группу** при 20 °С входят данные со средними значениями показателей ОВ ( $XPK_0 = 25,5$ ;  $PO = 12,4$  мг О/л;  $ТОС = 9,7$  мг/л) в акваториях КГ, ПГ и ПхГ (весна 2013 г.) и ПГ (весна 2017 г.), со значениями РМ и  $\omega_s \cdot 126$  при 20 °С, меняющимися соответственно в пределах 4,4–2,6 (в среднем 3,2) мг/л и 4,64–2,61 (3,43) мг О<sub>2</sub>/л; а при 10 °С средние значения показателей ОВ составили:  $XPK_0 = 27,4$ ;  $PO = 12,7$  мг О/л;  $ТОС = 10,4$  мг/л; значения РМ и  $\omega_s \cdot 126$  в воде из КГ (весна 2013 г.) и РШ (осень 2013 г.) – соответственно в пределах 6,0–4,4 (5,2) мг/л и 3,11–2,50 (в среднем 2,81) мг О<sub>2</sub>/л. Повышенные значения параметров получены при 20 °С в весенней воде – с горизонта 1 м (КГ, 2013 г.) и из разных горизонтов столба воды (ПГ, 2013 г.), а при 10 °С в воде с горизонта 1 м – осенью (РШ, 2013 г.) и весной (КГ, 2013 г.).

**Во вторую группу** при 20 °С входят данные со средними значениями показателей ОВ ( $XPK_0 = 17,0$ ;  $PO = 7,6$  мг О/л;  $ТОС = 7,1$  мг/л) в районах ПГ (весна 2013 г.), ЦП (осень 2013 г. и весна 2017 г.), КГ (лето и осень 2013 г.) при значениях РМ и  $\omega_s \cdot 126$ , меняющихся соответственно в пределах 2,6–1,4 (в среднем 1,9) мг/л и 2,24–1,45 (1,93) мг О<sub>2</sub>/л; а при 10 °С средние значения показателей ОВ составили:  $XPK_0 = 31,7$ ;  $PO = 14,6$  мг О/л;  $ТОС = 12,0$  мг/л и значения РМ и  $\omega_s \cdot 126$  в воде из РШ (лето 2013 г., весна 2016 г., зима и весна 2017 г.), из КГ (лето 2013 г.) и ПГ (осень 2013 г.) были соответственно в пределах 0,8–11,5 (3,7) мг/л и 0,90–1,80 (в среднем 1,24) мг О<sub>2</sub>/л. Значения показателей при 20 °С получены в весенней,

летней и осенней воде из разных горизонтов, а при 10 °С – наибольшие показатели характеризуют зимнюю воду с горизонта 1 м (РШ, 2017 г.), средние значения – летнюю и осеннюю воду из разных горизонтов столба воды (КГ, ПГ и РШ, 2013 г.) и наименьшие значения – весеннюю воду из горизонта 1 м (РШ, 2016, 2017 гг.).

**Зависимости III** при 20 и 10 °С построены по данным для весны, лета и осени 2013, 2016 и 2017 гг.

**Первая группа** данных при 20 °С характеризуется значениями показателей ОВ ( $XPK_0 = 23,5$ ;  $PO = 10,6$  мг О/л;  $ТОС = 9,7$  мг/л) в акваториях РШ и ЦП (осень 2013 г.) при концентрациях РМ и значениями  $\omega_s \cdot 126$ , меняющимися в пределах 1,8–6,0 (в среднем 3,9) мг/л и 0,40–2,91 (1,66) мг О<sub>2</sub>/л соответственно.

**Вторую группу** при 10 °С характеризуют повышенные значения в весенней воде из горизонта 1 м (РШ, 2013 г.) концентраций ОВ ( $XPK_0 = 33,4$ ;  $PO = 19,7$  мг О/л;  $ТОС = 11,8$  мг/л), РМ и  $\omega_s \cdot 126$  (соответственно 9,3 мг/л и 3,55 мг О<sub>2</sub>/л), а также средние значения концентраций ОВ ( $XPK_0 = 22,1$ ;  $PO = 10,6$  мг О/л;  $ТОС = 9,0$  мг/л), РМ и  $\omega_s \cdot 126$  (соответственно 3,0 мг/л и 0,80 мг О<sub>2</sub>/л) в пробах воды весной (ПГ, 2013, 2017 гг.; ЦП, 2016 г.), летом (ПхГ, 2013 г.) и осенью (ЦП, КГ, 2013 г.), отбираемых из разных горизонтов от поверхности до дна.

## Выводы

Выполнены совместные определения концентраций разных показателей ОВ и долгосрочные (продолжительностью до 126 сут) наблюдения за изменением значений БПК с водой из разных акваторий Онежского озера. Воды в этих акваториях подразделены по качеству: на относительно чистые в ЦП и подверженные антропогенному воздействию в ПГ, КГ, ПхГ и РШ. В долгосрочных экспериментах получено мультистадийное развитие БПК с двумя-тремя (I-я, II-я и линейная) стадиями. Присутствие в исследуемой воде разных по составу и количеству компонентов ОВ, включая взвешенные фракции, определяет особенности кинетики процесса БПК, которое можно охарактеризовать значениями кинетических параметров процесса. Методология формально-кинетического анализа данных БПК-экспериментов применена для получения уравнений, включающих значения кинетических параметров, описывающих динамику значений БПК в течение всего периода наблюдений. Кинетические параметры использованы для характеристики развития БПК в проведенных экспериментах по отдельным стадиям процесса. Анализ значений параме-

тров позволяет характеризовать особенности развития БПК по стадиям, выявить вклады отдельных стадий в суммарные значения БПК и установить лабильность окисляемых компонентов ОВ. Характерные значения кинетических параметров БПК подтверждают информацию о том, что воды ЦП Онежского озера сохраняют высокое качество в сравнении с другими его акваториями. Для весеннего периода отмечены наиболее значимые различия в значениях кинетических параметров БПК, когда особенно активны продукционные процессы. Проведена проверка соответствия концентраций лабильных и условно «стойких» к биохимическому окислению компонентов ОВ, а также взвешенного вещества значениям кинетических параметров БПК для разных акваторий Онежского озера. Установлены для взаимосвязей между указанными показателями ОВ и параметрами БПК высокие значения коэффициентов детерминации ( $R^2 = 0,60-1,00$ ). В дальнейшем планируется провести подобный анализ по имеющимся данным о содержании и значениях показателей ОВ и кинетике БПК для разнотипных малых водоемов Карельского региона.

*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

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.*
- 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., Сабылина А. В., Лозовик П. А.* Лабильные органические вещества: углеводы, липиды и белки в Онежском озере // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 96–104.
- 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.
- Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В.* Баланс органического вещества в озерах Карелии // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. I Междунар. конф. (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 358–364.
- Леонов А. В.* Особенности кинетики биохимического потребления кислорода в природных и сточных водах: Дис. ... канд. хим. наук. М.: ГОИН, 1974а. 240 с.
- Леонов А. В.* Обобщение, типизация и кинетический анализ кривых потребления кислорода по данным БПК-опытов // Океанология. 1974б. Т. XIV, вып. 1. С. 82–87.
- Леонов А. В.* Изучение кинетики биохимического потребления кислорода в пробах атлантической воды // Океанология. 1977. Т. 17, вып. 2. С. 243–252.
- Леонов А. В., Зобкова М. В.* Значения кинетических параметров БПК длительных экспериментов (на примере анализа данных с разными интегральными пробами воды из центральной части Онежского озера) // Труды КарНЦ РАН. 2020а. № 4. С. 40–61. doi: 10.17076/lim1164
- Леонов А. В., Зобкова М. В.* Соответствие значений параметров долгосрочной кинетики БПК концентрациям компонентов органического вещества в воде из разных акваторий Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2020б. № 9. С. 40–64. doi: 10.17076/lim1287
- 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., Чичерина О. В., Икко О. И.* Исследования кинетики БПК в пробах воды в длительных опытах: Матер. конф. МСОИ-2019. М., 2019. С. 186–190.
- 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. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

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

Рыжаков А. В., Куукконен Н. А., Лозовик П. А. Определение интенсивности аммонификации и нитрификации в природных водах кинетическим методом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 1. С. 70–74.

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

Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Здоровеннов Р. Э., Макарова Е. М. Результаты исследования экосистемы Онежского озера в период летней стратификации по данным экспедиции 2017 г. // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 44–53. doi: 10.17076/lim753

Теканова Е. В., Рыжаков А. В., Калинкина Н. М., Дмитриева Д. А., Фомина Ю. Ю., Макарова Е. М. Состояние экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. 2019. С. 190–194.

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

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.

Chmiel H. E., Hofmann H., Sobek S., Efremova T., Pasche N. Where does the river end? Drivers of spatiotemporal variability in CO<sub>2</sub> concentration and flux in the inflow area of a large boreal lake // Limnology and Oceanography. 2020. Vol. 65, no. 6. P. 1161–1174. doi: 10.1002/lno.11378

Henriksen A., Skjelkvåle B. L., Mannio J., Wilander A., Harriman R., Curtis C., Jensen J. P., Fjeld E., Moiseenko T. Northern European lake survey, 1995: Finland, Norway, Sweden, Denmark, Russian Kola, Russian Karelia, Scotland and Wales // Ambio. 1998. Vol. 27. P. 80–91.

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

Podsechin V., Kaipainen H., Filatov N., Bilaletdin Ä., Frisk T., Paananen A., Terzhevik A., Vuoristo H. Development of water protection of Lake Onega. Suomen, Pirkanmaa Regional Environment Centre, 2009. Ymp. 36. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38020> (дата обращения: 20.12.2020).

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

Streeter H. W., Phelps E. B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River // U. S. Publ. Health Service Bull. 1925. No. 146. P. 1–75.

Поступила в редакцию 29.01.2021

## References

*Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, kinetic, and computational methods in hydrochemical practice]. Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 270 p.

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

Bul'on V. V. Pervichnaya produktsiya planktona vnutrennikh vodoemov [Primary plankton production in 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 Onega water]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2019. No. 9. P. 60–75. doi: 10.17076/lim1017

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A. Labil'nye organicheskie veshchestva: uglevody, lipidy i belki v Onezhskom ozere [Labile organic matter (carbohydrates, lipids and proteins) in Lake Onega]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2013. No. 6. P. 98–104.

Leonov A. V., Chicherina O. V., Ikko O. I. Issledovaniya kinetiki BPK v probakh vody v dlitel'nykh opytakh

[The study of BOD kinetics in water samples during long experiments]. *Mater. konf. MSOI-2019* [Proceed. conf. MSOI-2019]. Moscow, 2019. P. 186–190.

Leonov A. V., Lozovik P. A., Ikko O. I. Ispol'zovanie eksperimental'nykh dannykh po biokhimicheskomu 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* [Transactions of KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 11–30. doi: 10.17076/lim726

Leonov A. V. Izuchenie kinetiki biokhimicheskogo potrebleniya kisloroda v probakh atlanticheskoi vody [Study of the kinetics of the biochemical oxygen consumption in Atlantic water samples]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1977. Vol. 17, iss. 2. P. 243–252.

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. Osobennosti kinetiki biokhimicheskogo potrebleniya kisloroda v prirodnykh i stochnykh vodakh [Features of the kinetics of biochemical oxygen demand

in natural and waste waters]: PhD (Cand. of Chem.) thesis. Moscow: GOIN, 1974a. 240 p.

Leonov A. V., Zobkova M. V. Sootvetstvie znachenii parametrov dolgosrochnoi kinetiki BPK kontsentratsiyam komponentov organicheskogo veshchestva v vode iz raznykh akvatorii Onezhskogo ozera [Compliance between the parameter values of the long-term BOD – experiments and concentrations of organic matter components in waters from different areas of Lake Onego]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2020b. No. 9. P. 40–64. doi: 10.17076/lim1287

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* [Transactions of KarRC RAS]. 2020a. No. 4. P. 40–61. doi: 10.17076/lim1164

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

Lozovik P. A., Zobkova M. V., Ryzhakov A. V., Zobkov M. B., Efremova T. A., Sabylina A. V., Efremova T. V. Allokhthonnoe i avtokhthonnoe 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. Acad. Sci.]. 2017. Vol. 477, no. 6. P. 728–732. doi: 10.7868/S086956521736021X

RD 52.24.421-2012. *Khimicheskoe potreblenie kisloroda v vodakh. Metodika izmerenii titrimetricheskim metodom* [Chemical consumption of oxygen in waters. The measurement procedure by titrimetric method]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2012. 19 p.

Ryzhakov A. V., Kukkonen N. A., Lozovik P. A. Opreделение intensivnosti ammonifikatsii i nitrifikatsii v prirodnykh vodakh kineticheskim metodom [Determination of the rate of ammonification and nitrification in natural waters by kinetic method]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2010. Vol. 37, no. 1. P. 70–74.

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 the 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. Hidrokhimicheskaya kharakteristika littoral'noi zony Onezhskogo ozera [Hydrochemical characteristic 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. Hidrologicheskaya izuchennost' Onezhskogo ozera i ego basseina [Hydrological study of Lake

Onego and its basin]. *Issledovaniya rezhima i raschety vodnogo balansa ozer-vodokhranilishch Karelii* [Regime studies and water balance calculations of the lake-reservoirs in Karelia]. Leningrad, 1977. Iss. 2. P. 3–24.

Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Zdorovenov R. E., Makarova E. M. Rezul'taty issledovaniya ekosistemy Onezhskogo ozera v period letnei stratifikatsii po dan-nym ekspeditsii 2017 g. [Results of the study of Lake Onego ecosystem in the period of summer stratification based on measured data from a 2017 expedition]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2018. No. 9. P. 44–53. doi: 10.17076/lim753

Tekanova E. V., Ryzhakov A. V., Kalinkina N. M., Dmitrieva D. A., Fomina U. U., Makarova E. M. Sostoyanie ekosistemy Kondopozhskoi guby Onezhskogo ozera v usloviyakh mnogofaktornogo vozdeistviya [The modern state of the Kondopozhskaya bay ecosystem (Lake Onego) under the conditions of multifactor impact]. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya* [Lakes of Eurasia: problems and solutions]. 2019. P. 190–194.

Tregubova T. M., Kulish T. P. Kinetika biokhimicheskogo potrebleniya kisloroda v vode ozera [Biochemical oxygen demand kinetics in lake water]. *Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera* [Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga]. Leningrad: Nauka, 1982. P. 106–116.

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* [The Bryansk St. Univ. Herald]. Ser. 2. 2011. No. 2. P. 45–49.

Zobkov M. B., Zobkova M. V. Ustroistvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotokhimicheskim persul'fatnym okisleniem v sisteme nepreryvnogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskim 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 materialov* [Factory lab. Material diagnostics]. 2015. No. 8. P. 10–15.

Zobkova M. V., Efremova T. A., Lozovik P. A., Sabylina A. V. Balans organicheskogo veshchestva v ozerakh Karelii [Organic matter balance in lakes of Karelia]. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mater. I Mezhdunarod. konf. (11–15 sent. 2017 g.)* [Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceed. 1<sup>st</sup> int. conf. (Sept. 11–12, 2017)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 358–364.

Chmiel H. E., Hofmann H., Sobek S., Efremova T., Pasche N. Where does the river end? Drivers of spatiotemporal variability in CO<sub>2</sub> concentration and flux in the inflow area of a large boreal lake. *Limnology and Oceanography*. 2020. Vol. 65, no. 6. P. 1161–1174. doi: 10.1002/lno.11378

Henriksen A., Skjelkvåle B. L., Mannio J., Wilander A., Harriman R., Curtis C., Jensen J. P., Fjeld E., Moiseenko T. Northern European lake survey, 1995: Finland, Norway, Sweden, Denmark, Russian Kola, Russian Karelia, Scotland and Wales. *Ambio*. 1998. Vol. 27. P. 80–91.

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

*Podsechin V., Kaipainen H., Filatov N., Bilaletdin Ä., Frisk T., Paananen A., Terzhevik A., Vuoristo H.* Development of water protection of Lake Onega. Suomen, Pirkanmaa Regional Environment Centre, 2009. Ymp. 36. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38020> (accessed: 20.12.2020).

*Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B.* Water chemistry in Onega Lake and its tributaries. *Water Re-*

*sources.* 2010. Vol. 37, no. 6. P. 842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102

*Streeter H. W., Phelps E. B.* A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *U. S. Publ. Health Service Bull.* 1925. No. 146. P. 1–75.

*Received January 29, 2021*

## **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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:rincalika21@yandex.ru)  
tel.: (8142) 576541