

## ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ<sup>1</sup>

© 2022 г. Е. В. Теканова<sup>а</sup>, \*, И. А. Литвинова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”,  
Петрозаводск, 185000 Россия

\*e-mail: etekanova@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

Оценена реакция экосистемы Кондопожской губы Онежского озера на изменение антропогенной нагрузки (от сточных вод Кондопожского ЦБК и форелевых хозяйств) по показателю деструкции органического вещества. Выполнен статистический анализ изменений деструкции за период 1989–2020 гг. Скорость деструкции измерялась скляночным кислородным методом. Выявлено достоверное снижение скорости деструкции в период с 1989 по 2020 г. в вершинной части залива, куда попадают сточные воды ЦБК. Медианные значения деструкции при минимальной нагрузке сточных вод в 2008–2020 гг. снизились здесь в 5 раз по сравнению с величинами в период максимальной нагрузки – в 1989–2001 гг. В центральной части залива, где расположены форелевые фермы, тенденция к снижению скорости деструкции органического вещества не была достоверной. Величины деструкции здесь уменьшились в <2 раза по сравнению с 1989–2001 гг. Снижению скорости разрушения органического вещества в центральной части залива препятствует деятельность форелевых хозяйств.

**Ключевые слова:** Онежское озеро, антропогенная нагрузка, деструкция органического вещества, эвтрофирование, реолиготрофизация, форелеводство, сточные воды.

**DOI:** 10.31857/S0321059622060177

### ВВЕДЕНИЕ

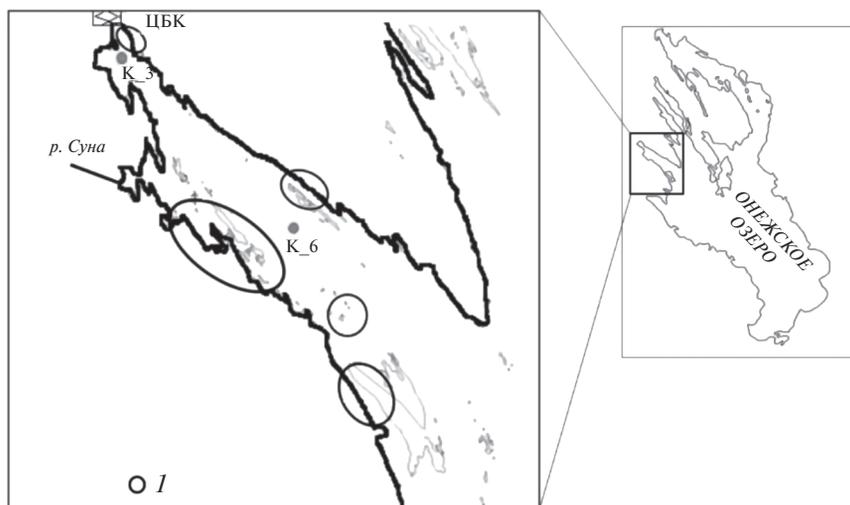
Онежское озеро, второй по величине водоем в Европе, сохранило до настоящего времени в целом природное олиготрофное состояние. Это важнейший стратегический источник чистой пресной воды для северо-западной части России [9, 18, 25, 26]. Сохранению экосистемы озера во многом способствует то, что главные источники антропогенной нагрузки на водоем – сточные воды коммунально-промышленных центров – расположены в заливах (Кондопожской губе, Петрозаводской губе), где и происходит разбавление, трансформация и седиментация большей части загрязняющих веществ. В то же время экосистемы самих заливов подвергаются значительному антропогенному прессингу.

Наибольшую антропогенную нагрузку испытывает экосистема Кондопожской губы Онежского озера, куда с 1929 г. поступают сточные

воды Кондопожского ЦБК и г. Кондопоги. Загрязнение вод органическим веществом (ОВ) и биогенными элементами привело к последовательной трансформации экосистемы и развитию эвтрофирования, достигающего центральной части залива [15, 20, 21, 24, 28, 29]. В настоящее время на фоне значительного снижения нагрузки сточных вод Кондопожского промцентра на Кондопожскую губу появились новые внешние факторы, которые могут оказывать влияние на состояние и функционирование ее экосистемы через увеличение содержания в воде ОВ и биогенных веществ [7]. Во-первых, это развитие садкового форелеводства на акватории губы с 2000-х гг. Во-вторых, это возрастание поступления веществ в Онежское озеро с водосборной территории вследствие увеличения как среднегодовой, так и зимней температуры воздуха в Карелии [23], что доказано на примере Петрозаводской губы Онежского озера [6, 23, 25].

Деструкция ОВ – показатель биохимической скорости окисления легкоминерализуемых ОВ в природных водах – служит важным критерием

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (государственная регистрация 121021700117-3).



**Рис. 1.** Картограмма Кондопожской губы Онежского озера с указанием станций отбора проб (1 – участки расположения форелевых хозяйств).

процессов биологического самоочищения в условиях эвтрофирования. В то же время, отражая метаболическую активность планктона, показатель деструкции ОВ позволяет оценить изменения в энергетическом балансе и трофической сети водной экосистемы. Несмотря на хорошую изученность экосистемы Кондопожской губы Онежского озера, анализ многолетних изменений деструкции ОВ до настоящего времени не проводился. Изучение изменений внутриводоемной трансформации ОВ приобретает особую актуальность в современных условиях глобального потепления и изменения антропогенной деятельности на водоемах и их водосборах.

Целью настоящей работы был сравнительный анализ деструкционных процессов в Кондопожской губе Онежского озера в периоды максимальной и минимальной нагрузки сточных вод Кондопожского промцентра на фоне развития товарного форелеводства в заливе.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кондопожская губа – крупный залив в северо-западной части Онежского озера. Ее площадь составляет 223 км<sup>2</sup>, объем водных масс 4.3 км<sup>3</sup>, максимальная глубина достигает 82 м, средняя 21 м. Морфологическая особенность губы – значительное углубление дна в ее центральной части (глубина 82 м) и его повышение на выходе из залива (глубина ~30 м) – создает относительную изолированность от открытого плеса и способствует аккумуляции загрязнений. Период условного водообмена составляет 2 года. Основной речной сток в Кондопожскую губу зарегулирован и поступает в ее вершинную часть через Сунский

канал, что создает постоянное сточное течение, которое, с одной стороны, разбавляет сточные воды ЦБК, с другой – выносит их на большое расстояние [13]. Температурный режим Кондопожской губы определяется особенностями термического цикла больших холодноводных глубоких озер, где формируется термический бар. По среднемноголетним данным [4], очищение губы ото льда происходит к 20 мая, в первой декаде июня завершается прохождение термического бара, температура воды достигает 4°C и начинается этап летнего нагревания. К 20 июня поверхностный слой воды прогревается до 10°C, период “биологического” лета длится ~100 дней и заканчивается в последней декаде сентября. В августе температура верхнего слоя воды достигает максимального среднемноголетнего значения –17°C, при этом толщина эпилимниона составляет ~10 м. К началу ноября завершается прохождение осеннего термобара и вода охлаждается до 4°C.

В работе использованы архивные (за 1989, 1991, 1993, 1998, 1999, 2001, 2003, 2005 гг.) и собственные (за 2007, 2008, 2011, 2015, 2017 и 2020 гг.) данные о деструкции ОВ в воде Кондопожской губы Онежского озера. Пробы воды отбирались с борта научно-исследовательского судна “Эколог” из нескольких слоев водной толщи на двух мониторинговых станциях: К\_3 – в вершинной части губы (глубина  $13.6 \pm 0.6$  м), куда поступает сток Кондопожского промцентра; К\_6 – в центральном глубоководном районе губы в 30 км от вершины залива (глубина  $79.5 \pm 0.7$  м), где находится большая часть форелевых хозяйств (рис. 1).

Скорость деструкции ОВ измерялась скляночным кислородным методом [10] по разнице между исходным содержанием кислорода в озерной

**Таблица 1.** Поступление взвешенных веществ, легкоминерализуемого ОВ и минерального фосфора со сточными водами ЦБК в Кондопожскую губу Онежского озера

Показатель	1989–2001 гг.	2002–2007 гг.	2008–2016 гг.
БПК <sub>полн</sub> , т О <sub>2</sub> /г	4627	2591	998
Фосфор минеральный, т/г	62	38	17
Взвешенные вещества, т/г	4222	2427	1333

воде и содержанием после суточной инкубации проб воды в склянках с притертыми пробками (объем 120 мл) в темноте. Пробы из эпилимниона помещали в палубный инкубатор, где температура воды поддерживалась на уровне температуры верхнего слоя заборной воды. Пробы из гиполимниона инкубировались в холодильной камере при температуре 5–7°C. Иодометрическое титрование кислорода проводилось в судовой лаборатории через несколько часов после фиксации кислорода в склянках. Пересчет единиц кислорода на углерод проводился с использованием коэффициента 0.3 [3].

Сведения о поступлении загрязняющих веществ в составе сточных вод Кондопожского ЦБК взяты из зарегистрированной базы данных [12]. Сведения о расположении и мощности форелевых хозяйств на акватории Кондопожской губы Онежского озера взяты из открытых источников [2].

Скорость деструкции ОВ в воде – функциональная характеристика планктона, ей присущи сезонные изменения в течение периода открытой воды. Для корректной оценки многолетних изменений деструкции ОВ на отдельных станциях были использованы данные в период сезонного максимума, который определялся по траектории среднесезонной сезонной динамики показателя. Траектория построена методом скользящего среднего, который хорошо зарекомендовал себя при изучении закономерностей сезонных изменений планктона Онежского озера [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

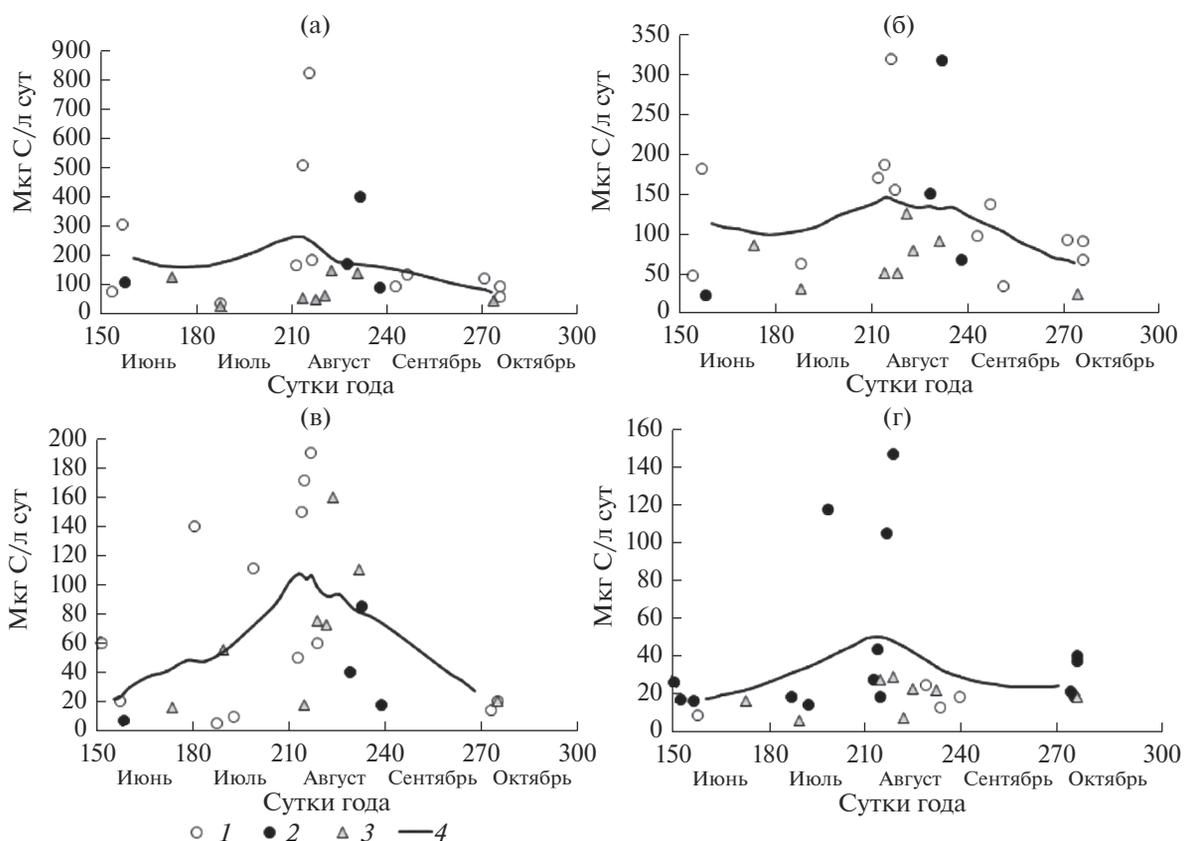
### *Многолетняя динамика органических и биогенных веществ, поступающих со сточными водами ЦБК в Кондопожскую губу Онежского озера*

Измерения скорости деструкции ОВ в воде Кондопожской губы Онежского озера начаты в 1989 г. в связи с антропогенным эвтрофированием ее экосистемы из-за высокой фосфорной нагрузки сточных вод Кондопожского ЦБК после введения в строй станции биологической очистки сточных вод (табл. 1). В процессе эвтрофирования возросло количество планктонных микроводорослей и увеличилась доля в их сообществе недиадомового фитопланктона – источника легко-

минерализуемого ОВ для зоо-, бактерио- и протозойного планктона. Кроме того, важным трофическим ресурсом для гетеротрофного планктона были легкоминерализуемые органические и взвешенные вещества в сточных водах [15, 29]. В 1989–2001 гг. в Кондопожскую губу поступало наибольшее количество этих веществ за весь период измерений деструкции ОВ (табл. 1). В 2000-х гг. происходило последовательное снижение объема сточных вод сначала из-за спада производства, а затем – в результате модернизации станции биологической очистки. Это повлекло за собой снижение количественных и функциональных показателей развития планктона на фоне их большой вариабельности [9, 29]. К 2008 г. количество поступающих в губу со сточными водами ЦБК легкоминерализуемых ОВ, взвешенных веществ и фосфатов сократилось в среднем в 5, 4 и 3 раза соответственно по сравнению с 1989–2001 гг. и сохраняется устойчиво низким до настоящего времени (табл. 1). Критерий Манна–Уитни выявил достоверное снижение поступления в Кондопожскую губу со сточными водами легкоминерализуемых ОВ ( $p = 0.00011$ ), взвешенных веществ ( $p = 0.00041$ ) и фосфатов ( $p = 0.0011$ ) в 2008–2017 гг. по сравнению с 1989–2001 гг. Эти периоды выбраны для оценки изменений скорости деструкции ОВ в Кондопожской губе.

### *Многолетние изменения скорости деструкции ОВ в воде вершинной и центральной частей Кондопожской губы Онежского озера*

Как видно из рис. 2, сезонные изменения деструкции ОВ наиболее выражены в верхнем слое воды наиболее эвтрофированной верхней части губы (ст. К\_3) и достигают в среднем 7 раз. Наименьшей сезонной изменчивостью характеризуются средневзвешенные в толще воды величины деструкции в глубоководной центральной части (ст. К\_6), где они в разные месяцы различаются в среднем лишь в 2 раза. Средневзвешенная скорость деструкции ОВ на ст. К\_6 в значительной мере отражает биохимические процессы окисления ОВ в гиполимнионе, который составляет здесь ~90% столба воды. Деструкция ОВ в гипо-



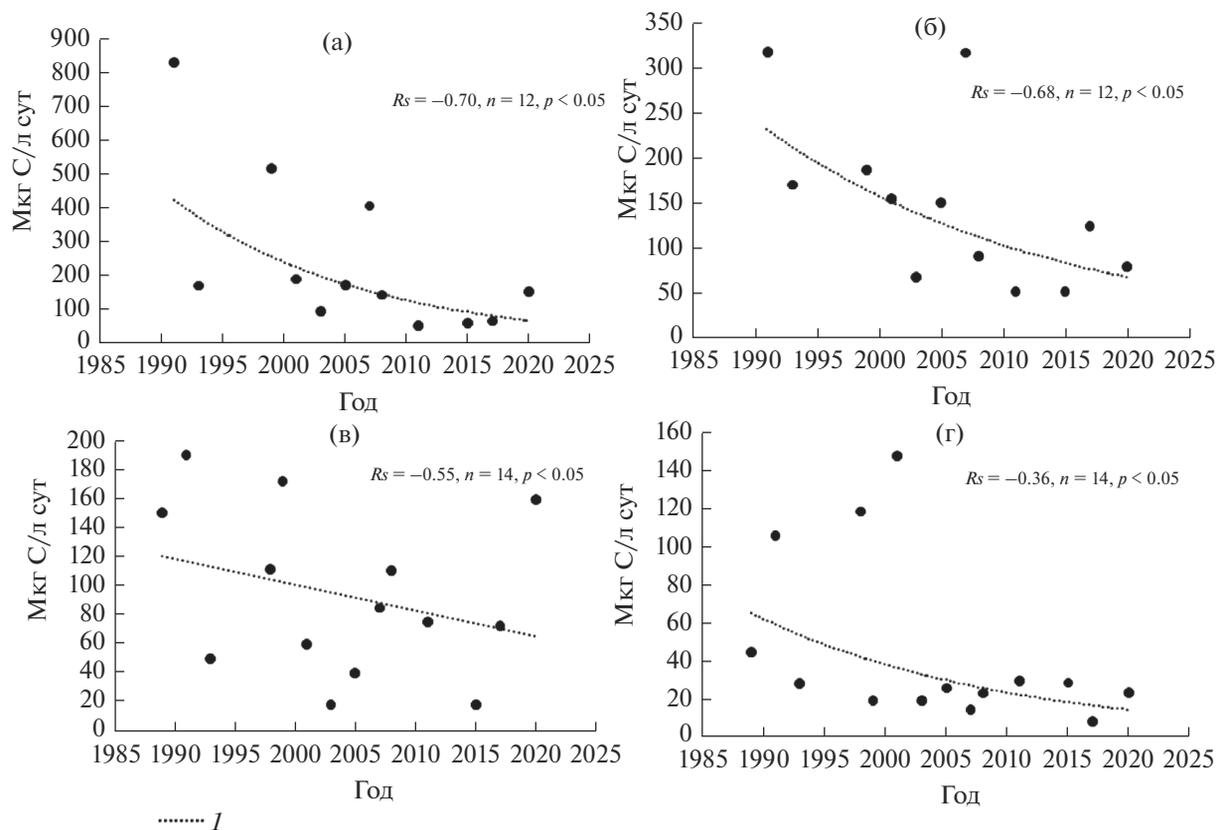
**Рис. 2.** Многолетняя сезонная динамика деструкции ОВ в поверхностном слое воды на ст. К\_3 (а), средневзвешенной в толще воды на ст. К\_3 (б), в поверхностном слое воды на ст. К\_6 (в), средневзвешенной в толще воды на ст. К\_6 (г) в Кондопожской губе Онежского озера (1 – 1989–2001 гг., 2 – 2003–2007 гг., 3 – 2008–2020 гг., 4 – траектория среднеемноголетней сезонной динамики).

лимнионе протекает главным образом за счет бактериопланктона, так как наибольшие плотности зоопланктонных организмов приурочены к области эпилимниона [11]. Если в верхних слоях водной толщи скорость деструкции в течение вегетационного периода регулируется температурой воды и трофическим ресурсом, то функциональная активность бактерий в гипolimнионе на ст. К\_6 в условиях постоянно низкой температуры воды может повышаться лишь за счет пополнения глубоких слоев воды доступным ОВ [19].

В соответствии с траекторией среднеемноголетней сезонной динамики деструкции ОВ в вершинной (ст. К\_3) и центральной (ст. К\_6) частях Кондопожской губы период сезонного максимума длится с 15 июля по конец августа (рис. 2). Как видно по рис. 2а, 2б, в вершинной части губы все величины деструкции ОВ в период сезонного максимума в 2008–2017 гг. находятся ниже траектории среднеемноголетней сезонной динамики, что может указывать на тенденцию к их снижению. Достоверность многолетнего снижения скорости деструкции на ст. К\_3 в период сезонного максимума подтверждается ранговым коэф-

фициентом корреляции Спирмена, который составил для верхнего слоя воды  $-0.7$  ( $n = 12$ ,  $p < 0.05$ ), для средневзвешенных в толще воды величин  $-0.68$  ( $n = 12$ ,  $p < 0.05$ ) (рис. 3а, 3б). В центральной части Кондопожской губы лишь средневзвешенные величины деструкции в период сезонного максимума в 2008–2020 гг. расположены ниже траектории среднеемноголетней сезонной динамики на рис. 2г. Несмотря на наличие некоторой тенденции к снижению, на ст. К\_6 не выявлено достоверного снижения деструкции за многолетний период (рис. 3в, 3г).

В табл. 2 представлена сравнительная характеристика максимальных сезонных величин деструкции ОВ в воде Кондопожской губы в периоды наибольшей (1989–2001 гг.) и наименьшей (2008–2020 гг.) нагрузки на водную экосистему биохимически лабильного ОВ, взвешенных веществ и фосфатов в составе сточных вод ЦБК. В 2008–2020 гг. произошло уменьшение медианных, минимальных и максимальных значений показателя как на ст. К\_3, так и на ст. К\_6. Наиболее значительны эти изменения в верхнем слое воды вершинной части губы, непосредственно



**Рис. 3.** Многолетние изменения деструкции ОВ в поверхностном слое воды на ст. К\_3 (а), средневзвешенной в толще воды на ст. К\_3 (б), в поверхностном слое воды на ст. К\_6 (в), средневзвешенной в толще воды на ст. К\_6 (г) в Кондопожской губе Онежского озера в период сезонного максимума (I – линия тренда;  $R_s$  – ранговый коэффициент корреляции Спирмена, жирным шрифтом выделено его достоверное значение).

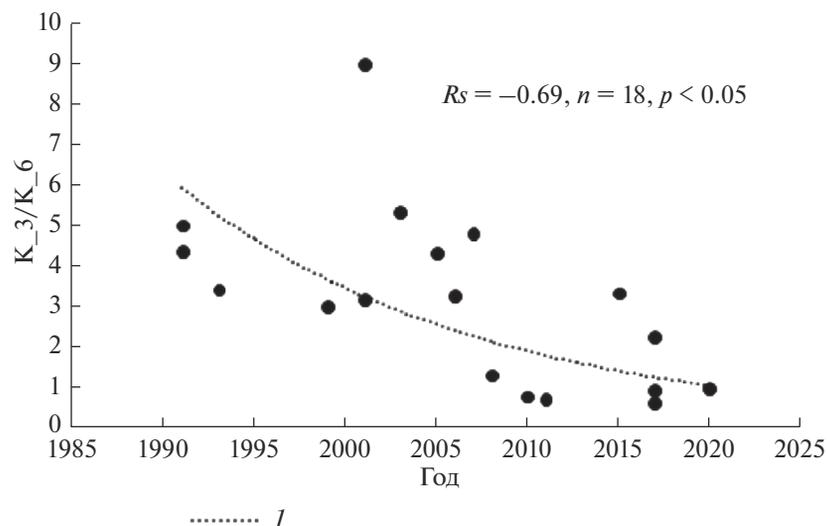
подверженной влиянию сточных вод ЦБК. В 2008–2020 гг. медианное значение деструкции сократилось здесь в 5 раз по сравнению с 1991–2001 гг. Кроме того, произошло снижение variability показателя, коэффициент вариации уменьшился с 72 до 32%. Медианы средневзвешенных в толще воды величин деструкции уменьшились

в 2 раза. Критерий Манна–Уитни статистически подтвердил достоверность этого снижения при  $p = 0.05$  как в верхнем слое воды (0.02), так и для средневзвешенных величин (0.02).

В центральном районе губы на ст. К\_6 скорость деструкции ОВ в верхнем слое воды понизилась лишь в 1.7 раз (табл. 2) при некотором воз-

**Таблица 2.** Деструкция ОВ в Кондопожской губе Онежского озера в период сезонного максимума в 1989–2001 и 2008–2020 гг., мкг С/л сут (Me – медиана,  $m$  – ошибка медианы, min – минимальное значение, max – максимальное значение)

Станция	Слой воды	Параметр	1989–2001 гг.	2008–2020 гг.
К_3	Верхний слой 1 м	$me \pm m(n)$	352.6 (4)	$65.8 \pm 26.9$ (5)
		min–max	170.0–830.0	51.6–152.9
	Средневзвешенная в толще воды	$me \pm m(n)$	178.3 (4)	$79.8 \pm 11.4$ (5)
		min–max	155.0–317.5	51.6–124.6
К_6	Верхний слой 1 м	$me \pm m(n)$	$130.5 \pm 35.2$ (6)	$75.0 \pm 26.7$ (5)
		min–max	50.0–190.0	18.0–159.2
	Средневзвешенная в толще воды	$me \pm m(n)$	$74.3 \pm 28.7$ (6)	$22.5 \pm 5.9$ (5)
		min–max	18.3–147.0	7.2–28.8 (5)



**Рис. 4.** Многолетние изменения соотношения величин деструкции ОВ в вершинном и центральном районах Кондопожской губы Онежского озера в июле–августе (*I* – линия тренда;  $R_s$  – ранговый коэффициент корреляции Спирмена, жирным шрифтом выделено его достоверное значение).

растании изменчивости показателя. Коэффициент вариации увеличился с 57% в 1989–2001 гг. до 70% в 2008–2020 гг. Медианные значения средневзвешенной деструкции на ст. К<sub>6</sub> в 2008–2020 гг. сократились в 3 раза по сравнению с 1989–2001 гг. (табл. 2). Несмотря на снижение скорости деструкции на ст. К<sub>6</sub> по медианным значениям, тест Манна–Уитни показал, что выявленные изменения не значимы ни для верхнего слоя воды ( $p = 0.41$ ), ни для средневзвешенных величин ( $p = 0.12$ ) при уровне значимости  $< 0.05$ .

#### *Многолетние изменения распределения скорости деструкции ОВ на акватории Кондопожской губы Онежского озера*

Пространственное распределение химических и биологических параметров на акватории Кондопожской губы всегда характеризовалось закономерным снижением показателей по направлению от вершинной части к центральной [9, 15, 29]. Для оценки многолетних изменений градиента деструкции ОВ между станциями К<sub>3</sub> и К<sub>6</sub> рассчитано соотношение одновременно измеренных величин показателя в поверхностном слое воды на этих станциях. В этом случае основным критерием для формирования выборки были не закономерности сезонного цикла, а однородность температуры воды на акватории. Однородные температурные условия складываются на акватории губы в июле и августе. В этот период разница температуры поверхностного слоя воды на станциях К<sub>3</sub> и К<sub>6</sub> составляет в среднем  $0.7 \pm 0.2^\circ\text{C}$ . В июне из-за медленного весеннего прогревания воды эта разница достигает  $6.4 \pm 1.2^\circ\text{C}$ . Как видно из рис. 4, разница скоростей деструкции ОВ

в воде вершинного и центрального участков Кондопожской губы сокращается, и коэффициент Спирмена подтверждает значимость этого тренда ( $R_s = -0.69$ ,  $n = 18$ ,  $p < 0.05$ ).

Постепенное исчезновение градиента деструкции ОВ между вершинным и центральным участками Кондопожской губы подтвердил и парный тест Вилкоксона. Так, в 1991–2001 гг. величины одновременно измеренной деструкции ОВ на станциях К<sub>3</sub> и К<sub>6</sub> достоверно различались ( $p = 0.023$ ,  $n = 6$ ), а в 2008–2020 гг. различия уже не были значимыми ( $p = 0.89$ ,  $n = 8$ ) при  $p < 0.05$ . Эта же закономерность прослеживается и в табл. 2, хотя в нее входят не только одновременно измеренные величины деструкции. Градиент медианной скорости деструкции в верхнем слое воды между станциями К<sub>3</sub> и К<sub>6</sub> в 1989–2001 гг. достигал 2.7 раз, а в 2008–2017 гг. разница между медианами практически отсутствовала (табл. 2).

#### *Причины многолетних изменений деструкции ОВ в Кондопожской губе Онежского озера*

В целом, снижение скорости деструкции на ст. К<sub>6</sub> происходит медленнее, чем на ст. К<sub>3</sub>. Значимое снижение напряженности деструкционных процессов в вершинной части Кондопожской губы стало возможным в результате существенного снижения нагрузки сточных вод Кондопожского ЦБК, несмотря на наличие в этой части губы форелевого хозяйства (рис. 1). Как видно из табл. 1, количество поступающего в губу со сточными водами  $P_{\text{мин}}$  в 2008–2016 гг. сократилось в среднем на 45, взвешенных веществ – на 2889, БПК<sub>полн</sub> – на 3554 т в год по сравнению с

1989–2001 гг. В то же время дополнительное поступление в эту часть губы фосфора и легкоминерализуемого ОВ от форелевого хозяйства мощностью 70 т товарной продукции [2] – значительно меньше. Так, расчет потока веществ в водную экосистему в результате форелеводческой деятельности по методике в [8, 14] показал, что в вершинную часть губы ежегодно поступает лишь 450 кг минерального фосфора, 11.2 т взвешенных веществ и 18.3 т легкоминерализуемого ОВ (в кислородных единицах по БПК<sub>полн</sub>) от форелевого хозяйства. Количество лабильного ОВ, поступающего в водоем от 1 т выращенной рыбы, рассчитывается по методике из [14] по БПК<sub>5</sub>, поэтому для оценки БПК<sub>полн</sub> величина БПК<sub>5</sub> была увеличена на 20%, так как принято считать, что за 5 дней окисляется ~80% всего лабильного ОВ [1].

Влияние сточных вод Кондопожского промцентра в центральной части губы существенно ослабевает. Значительная часть аллохтонного фосфора, легкоминерализуемого ОВ и взвешенных веществ не достигают центральной части в результате оседания, разбавления и биологического самоочищения, т. е. деструкции ОВ, в верхней части залива. Это подтверждается значительным снижением концентраций этих веществ в воде центральной части Кондопожской губы. Так, в 1990-е гг., в период высокой нагрузки сточных вод ЦБК на экосистему, на станциях К<sub>3</sub> и К<sub>6</sub> концентрации Р<sub>общ</sub> в воде составляли в среднем 40 и 18 мкг/л, БПК<sub>5</sub> – 2.0 и 1.2 мг О<sub>2</sub>/л, взвешенных веществ – 4.0 и 1.0 мг/л соответственно [16], т. е. в центральной части залива они сокращались в 2–4 раза. В 2008–2016 гг. поступление минерального фосфора, легкоминерализуемого ОВ и взвешенных веществ со сточными водами ЦБК составляло в среднем 17.1, 1073 и 1333 т в год соответственно. По методике [14] установлено, что от расположенных в центральной части губы форелевых ферм общей мощностью 1750 т товарной рыбы [2] в водоем поступают 10.5 т минерального фосфора, 458.5 т легкоминерализуемого ОВ (БПК<sub>полн</sub>) и 280 т взвешенных веществ в год. Учитывая, что значительная часть сточных вод Кондопожского промцентра не достигает центральной части губы, антропогенная нагрузка от форелевых хозяйств представляется весьма большой.

На современном этапе развития общества товарное производство форели как отрасль сельского хозяйства должно руководствоваться двумя принципами: с одной стороны, обеспечивать население качественным продовольствием, с другой – минимизировать ущерб водоемам, многие из которых и так испытывают антропогенное воздействие. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют рециркуляционные системы аквакультуры, используемые в настоящее время в странах Евросоюза [27, 31]. Они расположены на

берегу, имеют почти замкнутый цикл водооборота и преимущество в биоутилизации отходов выращивания рыбы. Дальнейшее усовершенствование нитрификационных реакторов в таких системах сделает водооборот полностью замкнутым и совсем исключит негативное влияние на окружающую среду. Еще один способ предотвратить неизбежное загрязнение пресных водоемов при развитии на их акваториях товарного форелеводства – устройство форелевых ферм на морском побережье после выбора подходящих гидрологических условий. В частности, в Карелии – это побережье Белого моря. Безусловно, и первый, и второй варианты развития форелеводства требуют больших капиталовложений.

Еще одной возможной причиной медленного снижения деструкции ОВ в воде на ст. К<sub>6</sub> может быть поддержание деструкционных процессов аллохтонным ОВ, поступающим со стоком р. Суны в западное побережье центральной части губы (рис. 1). В связи с климатическими изменениями, возможно, возрос сток этих веществ, как это было показано для Петрозаводской губы Онежского озера, куда впадает р. Шуя [6]. Однако, в отличие от водного стока р. Шуи (3.05 км<sup>3</sup>/г), сток р. Суны невелик (0.25 км<sup>3</sup>/г), и его влияние на воды Кондопожской губы ограничивается приустьевым участком. Кроме того, в высокоцветных водах Карелии ~90% аллохтонного ОВ составляет гумусовое вещество [5]. Высокомолекулярное гумусовое вещество трудно поддается биохимическому окислению. Этому предшествует фотоокисление [22], в процессе которого от гумусовых веществ отделяются низкомолекулярные структуры, доступные для бактериального разложения. Считается, что водными бактериями могут потребляться лишь ~15% гумусовых веществ [30].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что в настоящее время в экосистеме Кондопожской губы Онежского озера происходят изменения, связанные с динамикой антропогенной нагрузки. Значимое снижение деструкции ОВ в вершинной, наиболее загрязненной сточными водами Кондопожского ЦБК, части губы свидетельствует об улучшении здесь экологической ситуации в целом и о развитии процессов реолиготрофизации. Эти изменения вызваны существенным сокращением объема эвтрофирующих веществ, поступающих в составе сточных вод Кондопожского промцентра. Уменьшение деструкции в центральной части Кондопожской губы происходит медленнее и не имеет статистического подтверждения. Снижению планктонного дыхания препятствует новый антропогенный фактор – расположенные в побережье центральной части губы форелевые хозяйства, которые обогащают экосистему ОВ

биогенными элементами и поддерживают процессы биологического самоочищения воды на прежнем высоком уровне. С учетом природной и экономической ценности Онежского озера необходим тщательный мониторинг состояния его экосистемы. Также нужен строгий контроль деятельности существующих форелевых хозяйств и разрешительных мер на открытие новых хозяйств с учетом того, что товарное форелеводство — одна из основных отраслей экономики Карелии, в пресных водоемах которой выращивается ~50% реализуемой на территории России форели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 270 с.
2. Ассоциация форелеводов Карелии. Карта рыбных хозяйств. [Электронный ресурс]. <http://kareliatrout.ru> (дата обращения: 25.01.2021)
3. *Бульон В.В.* Радиоуглеродный метод определения первичной продукции, его возможности и ограничения в сравнении с кислородным методом // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 14–20.
4. *Ефремова Т.В.* Термический режим // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦРАН, 2010. С. 55–66.
5. *Зобкова М.В., Ефремова Т.А., Лозовик П.А., Сабылина А.В.* Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 115–120.
6. *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.
7. *Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т.* Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18.
8. *Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦРАН, 2007. 395 с.
9. Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. *Н.Н. Филатова*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 374 с.
10. *Кузнецов С.И., Дубинина Г.А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 285 с.
11. *Куликова Т.П., Кустовлянкина Н.Б., Сярки М.Т.* Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.
12. *Литвинова И.А., Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Макарова Е.М., Ефимова А.Н.* Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Свид. гос. регистрации базы данных № 2021620975. 17.05.2021.
13. *Литинская К.Д.* Общая физико-географическая характеристика и элементы гидрологического режима // Кондопожская губа Онежского озера в связи с ее загрязнением протокками ЦБК. Петрозаводск: Карельский фил. АН СССР, 1975. С. 5–21.
14. *Лозовик П.А.* Антропогенные нагрузки на Онежское озеро от различных источников формирования химического состава воды // Всерос. науч. конф. “Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения”. Новочеркасск: Лик, 2017. С. 378–384.
15. Онежское озеро. Экологические проблемы // Под ред. *Н.Н. Филатова*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 293 с.
16. *Сабылина А.В.* Современный гидрохимический режим озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 58–108.
17. *Сярки М.Т.* Изучение траекторий сезонной динамики планктона с помощью метода двойного сглаживания // Принципы экологии. 2013. № 1. С. 62–68.
18. *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. // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 44–53.
19. *Теканова Е.В., Тимакова Т.М.* Первичная продукция и деструкция органического вещества в Онежском озере // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2006. С. 60–70.
20. *Тимакова Т.М., Сабылина А.В., Полякова Т.Н., Сярки М.Т., Теканова Е.В., Чекрыжева Т.А.* Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции его изменения за последние десятилетия // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 42–49.
21. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Под ред. *З.С. Кауфмана*. Л.: Наука, 1990. 264 с.
22. *Bertilson S., Tranvik L.* Photochemical transformations of dissolved organic matter in lakes // Limnol. Oceanogr. 2000. V. 45. Iss. 4. P. 753–762.
23. *Filatov N.N., Kalinkina N.M., Tekanova E.V.* Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming // Limnol. Freshwater Biol. 2018. № 1. P. 15–17.
24. *Kalinkina N.M., Kulikova T.P., Litvinova I.A., Polyakova T.N., Syarki M.T., Tekanova E.V., Timakova T.M., Chekryzheva T.A.* Bioindication of water and bottom sediment pollution in the Kondopozhskaya Bay of Lake Onega // Water Resour. 2012. V. 39. № 7. P. 776–783.
25. *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. V. 46. Iss. 4. P. 850–861.
26. Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modelling / Eds *L.A. Rukhovets, N.N. Filatov*. Chester: Springer, 2010. 298 p.
27. *Martinsa C.I.M., Edinga E.H., Verdegema M.C.J., Heinsbroeka L.T.N., Schneider O., Blanchetond J.P.*

- Roque d'Orbcasteld E., Verretha J.A.J.* New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability // *Aquacultural Engineering*. 2010. V. 43. Iss. 3. P. 83–93.
28. *Sabylina A.V., Lozovik P.A., Zobkov M.B.* Water chemistry in Lake Onega and its tributaries // *Water Res.* 2010. V. 37. № 6. P. 842–853.
29. *Timakova T.M., Kulikova T.P., Litvinova I.A., Polyakova T.N., Syarki M.T., Tekanova E.V., Chekryzheva T.A.* Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill // *Water Res.* 2014. V. 41. № 1. P. 78–86.
30. *Tranvik L.J.* Degradation of dissolved organic matter in humic waters by bacteria // *Aquatic humic substances. Ecology and Biogeochemistry*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. P. 259–283.
31. *Woynarovich A., Hoitsy G., Moth-Poulsen T.* Small-scale rainbow trout farming. Technical Paper FAO Fisheries and Aquaculture. Edition 561. Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Series, 2011. 81 p. [Электронный ресурс]. [https://www.researchgate.net/publication/274632961\\_Small\\_Scale\\_Rainbow\\_Trout\\_Farming](https://www.researchgate.net/publication/274632961_Small_Scale_Rainbow_Trout_Farming) (дата обращения: 13.02.2021)