

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.555:551.583(282.247.211)

ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОНЕЖСКОГО
ОЗЕРА С НАЧАЛА 1990-х ГОДОВ

© 2019 г. Н. М. Калинкина*, Е. В. Теканова**, А. В. Сабылина, А. В. Рыжаков

*Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”,
Институт водных проблем Севера, Петрозаводск, Россия*

**e-mail: cerioda@mail.ru,*

***e-mail: etekanova@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.02.2018 г.; после доработки 27.08.2018 г.; принята в печать 21.09.2018 г.

В новых климатических условиях Карелии (мягкие зимы, увеличение количества жидких осадков, меньшее промерзание почвы) увеличивается поступление в озера аллохтонного органического вещества с речными водами. В связи с геохимическими особенностями Фенноскандии в водоемы попадает больше гумусовых веществ в комплексе с железом и фосфором. Это может привести к изменению гидрохимического режима, качества воды и условий обитания биоты. Впервые для водоемов Карелии на примере Петрозаводской губы Онежского озера оценены многолетние изменения (1963–2017 гг.) показателей-маркеров аллохтонного органического вещества. Выявлено, что с 1990-х годов в воде Петрозаводской губы достоверно возрастает цветность воды (от 56 до 73 град), содержание взвеси (от 1.6 до 3 мг/л), железа (от 0.12 до 0.42 мг/л), фосфора (от 12 до 22 мкг/л). Это приводит к изменению карбонатной системы воды залива – достоверно увеличивается концентрация углекислого газа (от 1.2 до 3.0 мг/л), падает величина рН (от 7.22 до 7.12) и содержание кислорода (от 101 до 92% насыщения). Наиболее высокими оказались коэффициенты корреляции Спирмена между показателями и годом исследования для весеннего периода, когда залив отделен от открытого плеса озера термическим баром и находится под сильным влиянием речных вод. Одновременно с изменением гидрохимического режима происходит увеличение количества железа в верхнем слое илов (от 0.65 до 4.8% от в.с.н.). Это привело к снижению численности макрозообентоса в 6–7 раз.

Ключевые слова: Карелия, Онежское озеро, климатические изменения, речной сток, гидрохимический режим, аллохтонное органическое вещество, железо, фосфор, газовый режим, рН.

DOI: 10.31857/S2587-55662019162-72

Введение. По прогнозам, в России потепление климата и его последствия будут проявляться наиболее резко. При этом наиболее масштабные изменения произойдут в арктическом и субарктическом регионах, где повышение приземной температуры воздуха зимой приведет к сокращению ледоставного периода, увеличению стока рек, росту количества осадков, сезонному протаиванию многолетнемерзлых грунтов и др. [12, 15].

К настоящему времени показано, что в последние 20 лет на Европейской части территории России [5], и особенно в северо-западном регионе [13, 14], наблюдаются преимущественно очень мягкие зимы, увеличение доли жидких осадков (дожди) над твердыми (снег). С наступлением мягких зим отмечается более слабое промерзание почвы и 2–3-х кратное увеличение стока с заболоченных территорий в зимний период 1983–2005 гг. по сравнению с 1963–1973 гг. [8]. В Карелии в основном за счет сильных ливней увеличилось количество осадков в летний период [13], сократился период ледостава [26].

Все это не может не сказаться на состоянии водных объектов. На территории Фенноскандии речные воды приносят в водоемы органическое вещество (ОВ) преимущественно гумусовой природы и тесно связанные с ним за счет комплексообразования железо, марганец и фосфор [9, 11, 19, 23]. Увеличение содержания в воде озер аллохтонного ОВ сказывается на цветности, содержании взвешенных веществ, CO_2 и O_2 , различных форм фосфора и железа, величине рН и др. Следствием оседания железа может быть его накопление в донных отложениях. Особенно ярко эти изменения могут проявиться в водоемах с заболоченными водосборами. К таким озерам относится Онежское озеро – одно из самых крупных озер Европы, расположенное на территории Карелии. Заболоченность его водосбора достигает 20–25%. В 2007–2008-х годах поступление с притоками органического углерода в Онежское озеро увеличилось на 22–39% по сравнению с 1965–2002 гг. [21]. Концентрация общего железа в притоках увеличилась с 1980-х годов в среднем в три раза – с 0.27 (0.02–0.98)

до 0.89 (0.03–6.4) мг/л [17, 20]. Именно изменением речного стока, как правило, объясняется и феномен возрастания цветности воды (brownification) в ряде водоемов гумидной зоны на территории Финляндии [27, 29], Германии [25], Швеции [24], США [30], Польши [28] и других стран.

В этих условиях весьма актуальным становится выявление изменений гидрохимического режима Онежского озера, что и является задачей настоящей работы.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была выбрана Петрозаводская губа Онежского озера. Она представляет собой удобный полигон для оценки влияния речных вод на этот водоем, так как в этот залив впадает р. Шуя – второй по величине приток озера. Площадь водной поверхности залива составляет 76 км², средняя глубина 16 м, максимальная глубина 29 м. Объем ежегодно поступающей речной воды достигает 3.05 км³, в то время как собственный объем воды в заливе составляет всего 1.17 км³, период условного водообмена – 0.35 года. С речным притоком в залив ежегодно приносится 41–58 тыс. т ОВ [21]. Весной и осенью на выходе из Петрозаводской губы формируется термический бар, изолирую-

щий воды залива от водной массы центрального плеса озера [16] и резко снижающий скорость потока речных вод. Это приводит к интенсивному оседанию аллохтонного ОВ на дно залива. Таким образом, Петрозаводская губа выступает в роли своеобразного фильтра, препятствующего поступлению значительной части аллохтонного ОВ в центральный плес озера.

В работе выполнен анализ многолетней внутри- и межгодовой динамики химических показателей воды на двух постоянных глубоководных станциях в Петрозаводской губе (рис. 1) с 1992 по 2017 гг., когда было накоплено большое количество данных, а также сведения за более ранние периоды – 1963, 1976 и 1981 гг. За весенний сезон принимался период с середины мая по середину июня с температурой поверхности воды менее 10 °С и существованием за пределами залива термического бара, за летний – июль и август, когда температура воды достигает сезонного максимума. Расслоение воды по температуре определяет заметную разницу в химических характеристиках эпилимниона и гипolimниона. Для уменьшения изменчивости показателей изучался массив данных для слоя эпилимниона – от поверхности до глубины 10–15 м. Цветность, содержание в воде общего фосфора, общего железа, взвешенных

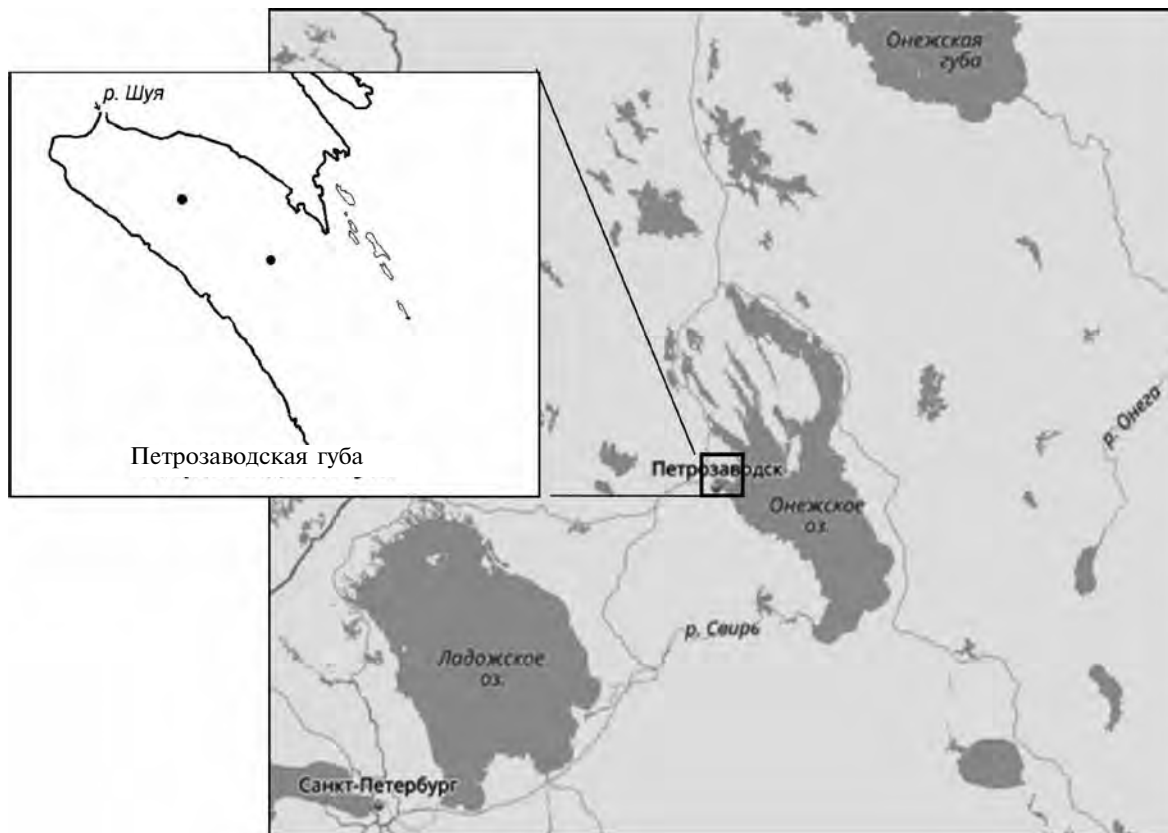


Рис. 1. Карта-схема Онежского озера с расположением точек отбора проб в Петрозаводской губе.

веществ, pH, CO₂, O₂, гидрокарбонатных ионов определялись общепринятыми методами [1] по аттестованным методикам в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Показатель кислотно-основного равновесия Alk/Acid рассчитывался как соотношение концентраций гидрокарбонатных ионов и углекислого газа [10]. Статистический анализ выполнен в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

Результаты и их обсуждение. Весенний период (1990–2010-е годы). Анализ многолетних данных показал, что на протяжении 1992–2017 гг. в Петрозаводской губе происходит направленное изменение показателей химического состава воды эпилимниона. Наиболее ярко эти процессы выражены в весенний период, когда влияние речных вод на залив максимально. На протяжении последних 25 лет отмечается увеличение цветности, содержания взвешенных веществ, общего фосфора и общего железа, т.е. показателей поступления аллохтонного ОВ (рис. 2). Медиана цветности воды в за-

ливе в 1990-е годы составляла 56 град, в 2000-е годы – 42 град, в 2010-е годы достигла 73 град. Одновременно в воде нарастало содержание взвешенных веществ (от 1.6 до 3 мг/л), фосфора (от 0.012 до 0.022 мг/л) и железа (от 0.12 до 0.42 мг/л) (табл. 1). Достоверность этих трендов подтверждается значимыми ($p = 0.05$) коэффициентами корреляции Спирмена между химическими показателями и годом измерения (табл. 2).

Увеличение концентраций железа и взвешенных веществ в воде Петрозаводской губы в последние 20 лет хорошо согласуется с обнаруженным ранее многолетним нарастанием количества железа в донных отложениях. Так, в 1970-х годах содержание общего железа в верхнем слое илов в среднем составляло 0.4% от воздушно-сухой навески, в 1990-х годах – 0.65%, в 2001 г. – уже 4.8% [2, 3].

Резкое увеличение накопления железа на дне с 2000-х годов совпадает по времени с началом масштабного (в 6–7 раз) сокращения в этом заливе количества донных животных, главным

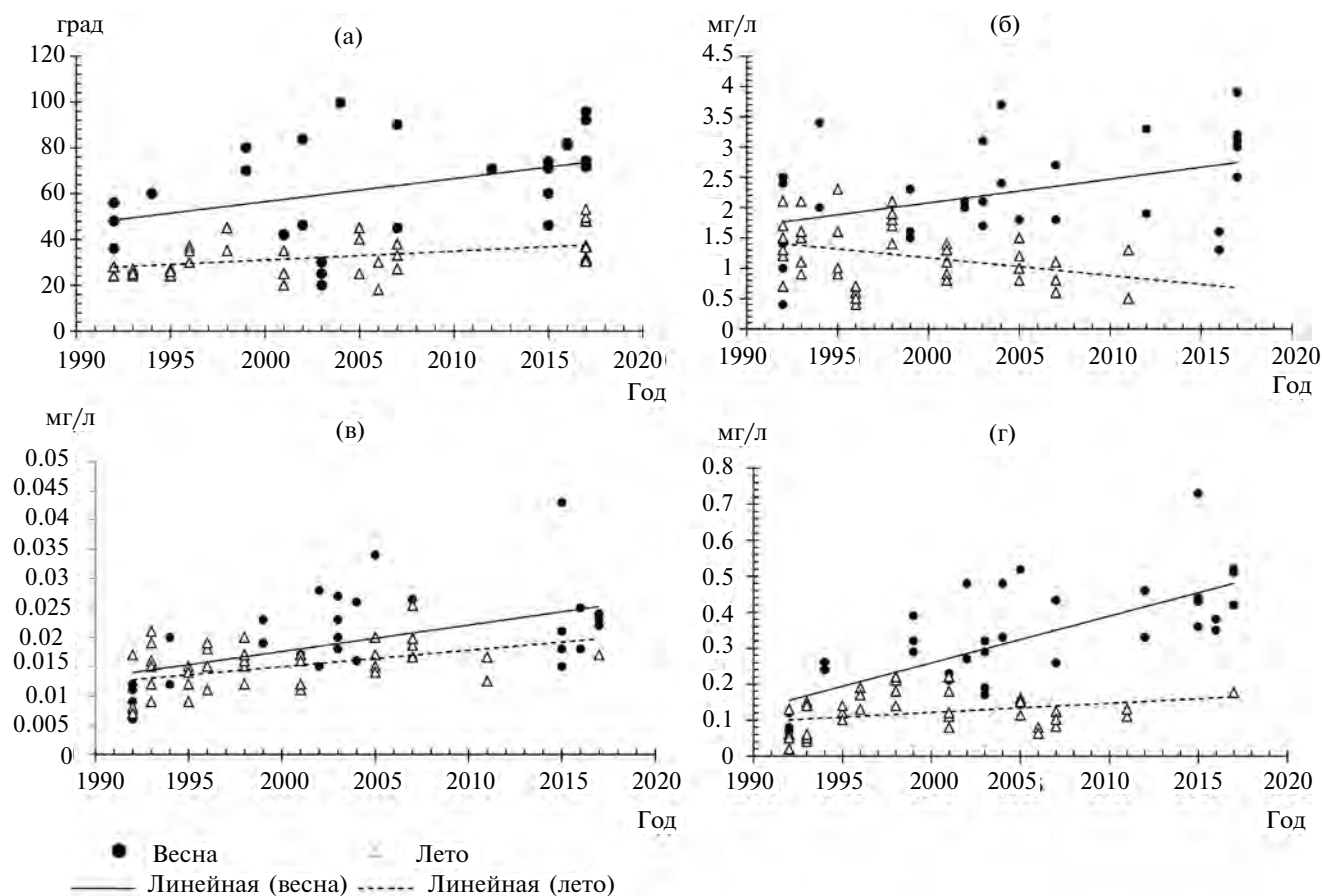


Рис. 2. Изменение цветности воды (а), концентрации взвешенных веществ (б), общего фосфора (в) и общего железа (г) в эпилимнионе Петрозаводской губы Онежского озера в весенний и летний период 1992–2017 гг.

Таблица 1. Статистические характеристики химических показателей эпилимниона Петрозаводской губы Онежского озера весной 1963–2017 гг.

Показатель	1963 г.		1976 г.		1981 г.*	1990-е годы		2000-е годы		2010-е годы	
	Me±m	min-max (n)	Me	min-max (n)	Сред.	Me±m	min-max (n)	Me±m	min-max (n)	Me±m	min-max (n)
Цв., град.	90±14	55–105 (6)	62	50–80 (3)	63	56±3	36–80 (11)	42±5	20–100 (11)	73±3	46–96 (12)
ВВ**, мг/л	–	–	–	–	2.6	1.6±0.3	0.4–3.4 (11)	2.1±0.2	1.7–3.7 (11)	3.0±0.5	1.3–3.9 (9)
Р _{общ.} , мг/л	–	–	–	–	0.017	0.012±0.003	0.006–0.023 (11)	0.020±0.003	0.015–0.034 (13)	0.022±0.002	0.015–0.043 (13)
Fe _{общ.} , мг/л	0.47±0.18	0.16–0.78 (6)	0.27	0.22–0.36 (3)	0.29	0.12±0.05	0.05–0.39 (11)	0.29±0.06	0.17–0.52 (13)	0.42±0.03	0.33–0.73 (13)
CO ₂ , мг/л	4.85±0.44	3.47–6.53 (8)	2.83	2.30–3.30 (3)	3.0	1.21±0.06	0.77–3.20 (11)	2.80±0.32	1.30–3.90 (13)	2.99±0.36	2.00–4.29 (12)
pH	6.65±0.03	6.60–6.80 (8)	7.10	6.90–7.20 (3)	6.9	7.22±0.01	7.16–7.46 (11)	7.07±0.07	6.88–7.52 (13)	7.12±0.09	6.49–7.36 (13)
O ₂ , %	–	–	92	90–95 (3)	91	101±2	90–106 (11)	97±1	88–105 (13)	92±3	81–96 (13)

* – цит. по [17]; ** – ВВ – взвешенные вещества.

образом реликтовых ракообразных и олигохет [6]. В поровых водах донных отложений в 2013 г. была обнаружена концентрация общего железа 13 мг/л [6], что превышает пределы токсического воздействия железа на моллюсков в 1.4 раза [22] и личинок амфибиотических насекомых – в 1.6 раза [31]. Механизм негативного воздействия железа на водных беспозвоночных зависит от формы нахождения этого элемента в воде. В большинстве пресных водоемов, в том

числе и в Онежском озере, железо находится преимущественно в окисленной форме, образуя взвесь с гумусовыми веществами. Негативное действие этих комплексов проявляется опосредованно, путем механического налипания взвеси на органы дыхания и пищеварения. В условиях дефицита кислорода и низких значений pH в водоемах преобладает восстановленная форма железа, которая оказывает прямое токсическое воздействие на гидробионтов.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Спирмена между химическими показателями эпилимниона Петрозаводской губы Онежского озера и годом исследований (1992–2017 гг.)

Показатель	Весна	Лето
Цв., град.	0.48 (34)	0.48 (56)
ВВ**, мг/л	0.44 (31)	–0.35 (41)
P _{общ.} , мг/л	0.56 (37)	0.45 (42)
Fe _{общ.} , мг/л	0.76 (37)	0.38 (44)
CO ₂ , мг/л	0.58 (36)	0.77 (51)
lg Alk/Acid	–0.58 (34)	–0.66 (47)
pH	–0.43 (37)	–0.25 (51)
O ₂ , %	–0.71 (37)	–0.35 (51)

Примечание. Жирным шрифтом выделены достоверные ($p = 0.05$) коэффициенты; в скобках – величина выборки.

Нарастающее влияние аллохтонного ОВ на Петрозаводскую губу закономерно приводит к изменениям в карбонатной системе. Увеличивается концентрация углекислого газа, уменьшается соотношение щелочности и кислотности (Alk/Acid), что приводит к снижению pH. Одновременно в результате биохимического окисления аллохтонного ОВ снижается содержание кислорода в воде (рис. 3). Так, концентрация CO₂ возросла почти в 3 раза (от 1.2 до 3.0 мг/л), величина pH снизилась с 7.22 до 7.12, насыщение воды кислородом – от 101% до 92% (см. табл. 1). Все показатели, связанные с карбонатной системой, достоверно изменяются (см. табл. 2). Масштаб этих изменений становится более очевидным, если учесть, что на весенний период приходится сезонный максимум развития диатомового планктона – основного компонента фитопланктона Онежского озера [4], т.е. в это время эпилимнион должен насыщаться кислородом на фоне снижения концентрации диоксида углерода.

Летний период (1990–2010-е годы). В летний период практически все изученные тренды сходны с весенними (см. рис. 2, 3). Наибольшее увеличение за многолетний период отмечается для углекислого газа (в 2.4 раза) при снижении насыщенности воды кислородом на 6%

(табл. 3). Коэффициенты корреляции Спирмена с годом исследования оказались достоверными (за исключением величины pH). Однако степень многолетнего изменения таких показателей как фосфор общий, железо общее и кислород была немного ниже, чем весной, что выразилось в более низких величинах коэффициентов корреляции с годом. Лишь для диоксида углерода коэффициент корреляции Спирмена оказался значительно выше, чем весной (см. табл. 2). Такая ситуация отражает, во-первых, снижение летом влияния речных вод в связи с исчезновением термического бара и усилением водообмена с открытым плесом, т.е. разбавляющим действием озерных вод. Во-вторых, это указывает на интенсивное разложение осажденного на дне залива аллохтонного ОВ. Об активных процессах самоочищения воды в заливе также свидетельствует снижение абсолютных значений цветности, железа, фосфора, взвешенных частиц и насыщения воды кислородом в летний период по сравнению с весной (см. рис. 2, 3). Все эти процессы объясняют отсутствие достоверного уменьшения величины pH в эпилимнионе.

Интерес вызывает динамика содержания в воде взвешенных веществ, для которых была выявлена противоположная по сравнению с весенним периодом многолетняя тенденция – их

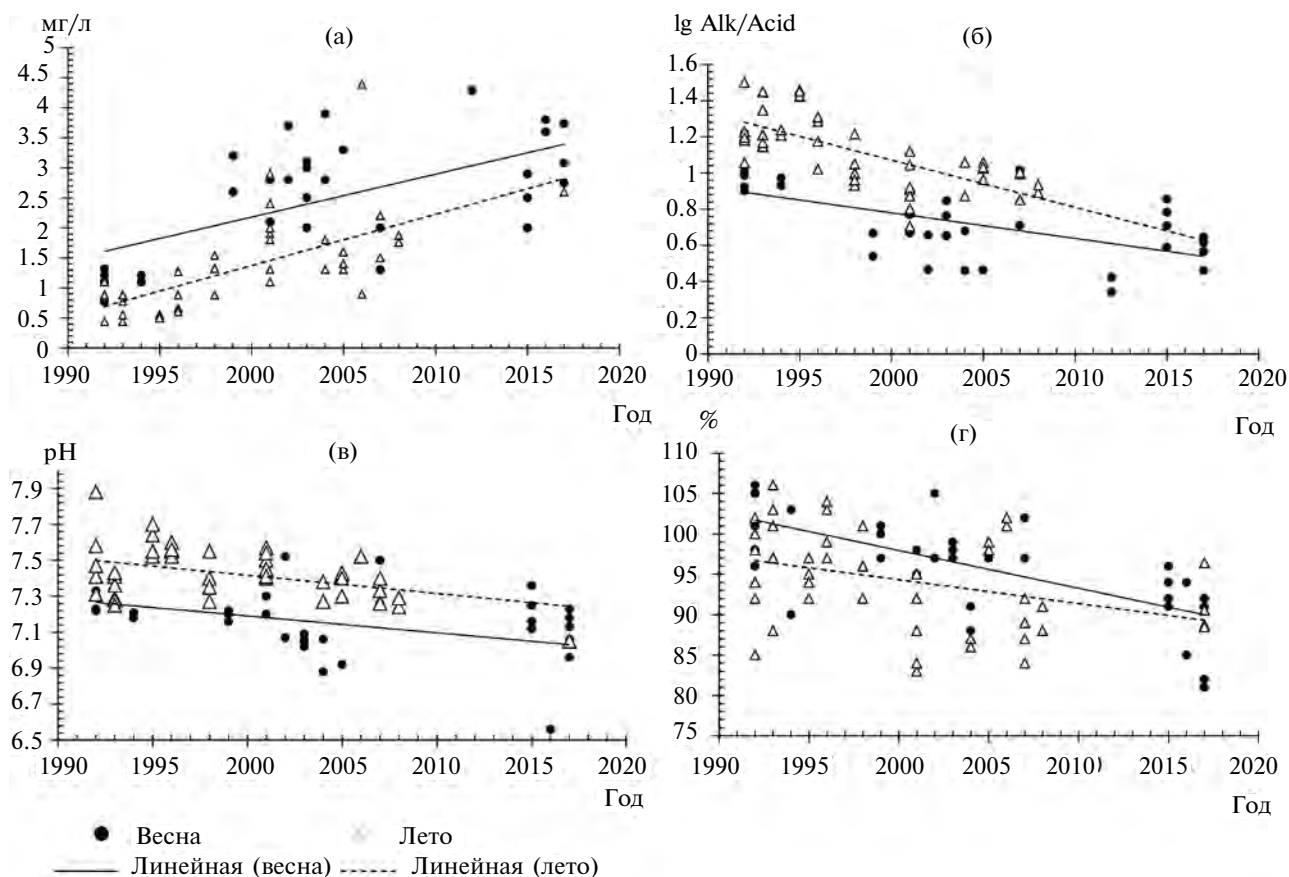


Рис. 3. Изменение концентрации диоксида углерода (а), соотношения щелочности и кислотности (б), величины рН (в) и процента насыщения воды кислородом (г) в эпилимнионе Петрозаводской губы Онежского озера в весенний и летний периоды 1992–2017 гг.

уровень в воде залива летом падает (см. рис. 2б). Так, в летний период 1990-х годов медиана концентраций взвешенных веществ в заливе составляла 1.5 мг/л, в 2000-е годы – 1.0 мг/л, а в 2010-е годы – 0.9 мг/л (см. табл. 3). Скорее всего, это может быть связано с более интенсивным осаждением взвешенных веществ весной. Скорость осаждения зависит от размеров взвешенных частиц и от интенсивности их коагуляции, которая может усиливаться при снижении рН воды [1]. Другой возможной причиной снижения количества взвеси в летний период может быть сокращение летней биомассы диатомового планктона – основного компонента альгоценозов Онежского озера.

Сравнительный анализ гидрохимического режима Петрозаводской губы в 1963–1981 гг. Анализ немногочисленных данных за период до 1990-х годов показал, что сходные процессы происходили в заливе и раньше, однако они были вызваны антропогенным воздействием, в частности, промышленным сплавом древесины по р. Шуе и Петрозаводской губе. В 1960-е годы вследствие разложения остатков коры и древесины в воде и на дне

Петрозаводской губы регистрировались очень высокие величины цветности воды и концентрации углекислого газа, низкие значения рН. Например, весной 1963 г., когда воды залива отделены от открытого плеса озера термическим баром, концентрация CO_2 (4.9 мг/л), железа (0.47 мг/л), величины рН (6.65) и цветности (90 град) были наиболее высокими за весь последующий многолетний период весенних наблюдений (см. табл. 1). Летом этого же года перечисленные показатели оказались значительно ниже, чем весной, за счет разбавляющего влияния озерных вод и были сопоставимы с данными, полученными в последующий период наблюдения, вплоть до настоящего времени. Исключение составило содержание в воде CO_2 , которое и в летний период 1963 г. не уменьшилось и оказалось максимальным (4.5 мг/л) для всех последующих летних сезонов (см. табл. 3).

В 1970-е и 1980-е годы молевой сплав древесины был прекращен, однако появился новый фактор антропогенного воздействия – лесосушительная мелиорация. В воде р. Шуи, которая была приемником дренажных стоков, концентрация взвешенных веществ увеличилась

Таблица 3. Статистические характеристики химических показателей эпилимниона Петрозаводской губы Онежского озера летом 1963–2017 гг.

Показатель	1963 г.		1976 г.		1981 г.*	1990-е годы		2000-е годы		2010-е годы	
	Me±m	min-max (n)	Me±m	min-max (n)		Me±m	min-max (n)	Me±m	min-max (n)	Me	min-max (n)
Цв., град.	36±2	31–50 (9)	56±6	29–108 (11)	34	24–45 (26)	27±1	27±3	18–45 (15)	36±2	30–53 (15)
ВВ*, мг/л	–	–	–	–	0.6	0.4–4 (26)	1.5±0.1	1.0±0.1	0.6–1.5 (13)	0.9	0.5–1.3 (2)
P _{общ.} , мг/л	–	–	–	–	0.01	0.007–0.021 (26)	0.015±0.001	0.017±0.002	0.011–0.025 (13)	0.015	0.017–0.017 (3)
Fe _{общ.} , мг/л	0.10±0.01	0.05–0.30 (9)	0.14±0.02	0.04–0.55 (11)	0.08	0.02–0.22 (26)	0.13±0.02	0.12±0.02	0.06–0.22 (15)	0.14	0.11–0.18 (3)
CO ₂ , мг/л	4.50±0.56	2.30–6.10 (9)	2.30±0.21	1.76–4.29 (11)	2.5	0.44–1.54 (28)	0.88±0.08	1.76±0.14	0.90–4.40 (21)	2.13	1.65–2.60 (2)
pH	7.05±0.06	6.90–7.30 (8)	7.00±0.06	6.70–7.21 (11)	7.1	7.25–7.88 (28)	7.42±0.05	7.40±0.03	7.24–7.57 (21)	7.25	7.05–7.45 (2)
O ₂ , %	93±1	92–94 (5)	92±3	81–97 (11)	90	85–106 (28)	97±1	91±1	83–102 (21)	89	88–96 (4)

* – цит. по [17]; ** – ВВ – взвешенные вещества.

в 2.5 раза, ОВ – на 38%, минерализация воды – на 25% [18]. Хотя в 1976 и 1981 гг. по сравнению с 1963 г. содержание углекислого газа, железа и цветность воды в заливе несколько снизились, а величина рН – повысилась (см. табл. 1, 3), тем не менее, качество воды в Петрозаводской губе было ниже, чем в 1990-е годы.

В целом можно отметить, что за более чем 50-летний период изучения гидрохимического режима Петрозаводской губы самыми благополучными для экосистемы залива оказались 1990-е годы (см. табл. 1, 3). К этому времени негативные последствия сплава древесины были по большей части устранены, мелиоративные работы на водосборе р. Шуи закончены. Несмотря на то, что на 1990-е годы приходился максимальный сброс в залив биологически очищенных коммунально-промышленных вод г. Петрозаводска [7], процесс антропогенного эвтрофирования экосистемы не получил серьезного развития по двум причинам: первая – сброс сточных вод происходит во внешнюю часть залива, близкую к открытому плесу озера, и вторая – залив обладает хорошим водообменом.

Заключение. Таким образом, обнаруженные тренды химических показателей воды Петрозаводской губы Онежского озера в 1992–2017 гг. свидетельствуют о влиянии новых климатических условий на состояние водосборной территории и усилении влияния речных вод на залив. Доказательством этому служат системность и статистическая достоверность выявленных изменений гидрохимического режима Петрозаводской губы. Увеличение содержания аллохтонного ОВ, цветности, взвешенных веществ, общего фосфора и железа повлекло за собой изменения в карбонатной системе – нарастание концентрации CO_2 в воде, смещение кислотно-основного равновесия и снижение рН. Уменьшение содержания растворенного кислорода указывает на активизацию биохимического окисления аллохтонного ОВ. Наиболее выраженными наблюдаемыми системными явлениями оказались в весенний период, когда Петрозаводская губа в силу гидрологических особенностей озера относительно изолирована от центрального плеса и влияние речных вод максимально. Летом под влиянием озерных вод степень изменений в химическом составе воды залива заметно ниже. Исключение составляет углекислый газ, концентрация которого летом возрастает за счет продолжающегося разрушения принесенного весной ОВ. Многолетние тенденции изменения содержания взвешенных веществ в заливе весной и летом противоположны. Весной количество взвеси в воде нарастает за счет увеличения поступления аллохтонного ОВ с речным стоком. Снижение содержания взвеси

летом может происходить в результате изменения химических или биологических процессов в заливе. Изменения химического состава воды в Петрозаводской губе в 1992–2017 гг. происходят одновременно с накоплением на дне железа и угнетением бентоса. Схожие процессы (нарастание концентрации CO_2 , снижение величины рН) происходили в экосистеме Петрозаводской губы в 1960–1980-е годы в результате антропогенного воздействия на залив: молевого сплава леса и лесосушительной мелиорации.

Изменения химического состава воды, обнаруженные в Петрозаводской губе, могут распространяться на остальную акваторию озера, а также привести к структурной или количественной трансформации планктонных и бентосных сообществ всего водоема. Изучение процессов изменения экосистемы Онежского озера в новых климатических условиях является важной задачей дальнейших исследований.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Funding. The study is prepared within Scientific Research Plan of the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
2. *Белкина Н.А.* Химический состав донных отложений // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / отв. ред. П.А. Лозовик, Т.П. Куликова, Н.Н. Мартынова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 40–49.
3. *Васильева Е.П., Белкина Н.А.* Общая характеристика донных отложений // Онежское озеро. Экологические проблемы / отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 120–145.
4. *Вилянская И.Г.* Структура и динамика биомассы фитопланктона // Онежское озеро. Экологические проблемы / отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 146–157.
5. *Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Телегина Е.А.* Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 6. С. 603–611.
6. *Калинкина Н.М., Сидорова А.И., Полякова Т.Н., Белкина Н.А., Березина Н.А., Литвинова И.А.* Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 2. С. 47–68. URL: <http://ecopri.ru/journal/article.php?id=5182> (Дата обращения: 26.02.2018).

7. Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18.
8. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе: экспериментальные исследования и моделирование. СПб.: Нестор-История, 2012. 616 с.
9. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 273 с.
10. Лозовик П.А. Кислотно-основное равновесие поверхностных вод гумидной зоны // Геохимия. 2007. № 10. С. 1139–1144.
11. Лозовик П.А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592.
12. Мелешко В.П. Потепление климата: причины и последствия // Химия и жизнь. 2007. № 4. С.6–12.
13. Назарова Л.Е. Атмосферные осадки в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 114–120.
14. Назарова Л.Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Изв. Русского географического общества. 2017. Т. 149. Вып. 5. С. 16–24.
15. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. 28 с.
16. Петров М.П. Термический режим // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / ред. З.С. Кауфман. Л.: Карельский научный центр АН СССР, 1990. С. 32–37.
17. Пирожкова Г.П. Химический состав приточных вод бассейна Онежского озера // Притоки Онежского озера / ред. З.С. Кауфман. Петрозаводск: Карельский научный центр АН СССР, 1990. С. 4–37.
18. Пьявченко Н.И., Нестеренко И.М., Чесноков В.А. Мелиорация и природа Севера. Петрозаводск: Карелия, 1980. 76 с.
19. Рыжаков А.В., Зобкова М.В., Лозовик П.А. Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 33–45.
20. Сабылина А.В. Внешняя нагрузка на озеро // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 68–72.
21. Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 68–77.
22. Стадниченко А.П. Влияние сернокислого железа на быстрые поведенческие и физиологические реакции катушки роговой (Molluska: Gastropoda: Pulmonata) // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 50. № 4. С. 45–50.
23. Теканова Е.В., Кравченко И.Ю., Потахин М.С., Богданова М.С. Анализ природных факторов формирования биологической продуктивности водоемов в разных ландшафтах Карелии // Принципы экологии. 2017. № 2. С. 61–69. URL: <http://ecoprj.ru/journal/article.php?id=5802> (Дата обращения: 26.02.2018).
24. Bartels P., Hirsch P.E., Svanback R., Eklov P. Dissolved organic carbon reduces habitat coupling by top predators in lake ecosystems // Ecosystems. 2016. V. 19. P. 955–967.
25. Brothers S., Köhler J., Attermeyer K., Grossart H.P., Mehner T., Meyer N., Scharnweber K., Hilt S. A feedback loop links brownification and anoxia in a temperate, shallow lake // Limnol. Oceanogr. 2014. V. 59. № 4. P. 1388–1398.
26. Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Estonian J. of Earth Sci. 2013. V. 62. № 1. P. 33–41.
27. Lehtovaara A., Arvola L., Keskitao J., Olin M., Rask M., Salonen K., Sarvala J., Tulonen T., Vuorenmaa J. Responses of zooplankton to long-term environmental changes in a small boreal lake // Boreal Environment Research. 2014. V. 19 (suppl. A). P. 97–111.
28. Lenard T., Ejankowski W. Natural water brownification as a shift in the phytoplankton community in a deep hard water lake // Hydrobiologia. 2017. V. 787. P. 153–166.
29. Sarkkola S., Nieminen M., Koivusalo H., Laurén A., Kortelainen P., Mattsson T., Palviainen M., Piirainen S., Starr M., Finér L. Iron concentrations are increasing in surface waters from forested headwater catchments in eastern Finland // Science of the Total Environment. 2013. V. 463–464. P. 683–689.
30. Strock K.E., Saros J.E., Nelson S.J., Birkel S.D., Kahl J.S., McDowell W.H. Extreme weather years drive episodic changes in lake chemistry: implications for recovery from sulfate deposition and long-term trends in dissolved organic carbon // Biogeochemistry. 2016. V. 127. P. 353–365.
31. Vuori K.-M. Direct and indirect effects of iron on river ecosystems // Ann. Zool. Fennici. 1995. V. 32. P. 317–329.

REFERENCES

1. *Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, Kinetic and Calculation Methods in Hydrochemical Practice]. Lozovik P.A., Efremenko N.A., Eds. St.Petersburg: Nestor–Istoriya Publ., 2017. 272 p.
2. Belkina N.A. Chemical composition of bottom sediments. In *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* [State of Water Bodies of the Republic of Karelia. According to the Results of the 1998–2006 Monitoring]. Lozovik P.A., Kulikova T.P., Martynova N.N., Eds. Petrozavodsk: Karelskii Nauchn. Tsentr RAN, 2007, pp. 40–49. (In Russ.).

3. Vasilyeva E.P., Belkina N.A. General characteristics of bottom sediments. In *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy* [Onega Lake. Ecological Problems]. Filatov N.N., Ed. Petrozavodsk: Karelskii Nauchn. Tsentr RAN, 1999, pp. 120–145. (In Russ.).
4. Vislyanskaya I.G. Structure and dynamics of phytoplankton biomass. In *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy* [Onega Lake. Ecological Problems]. Filatov N.N., Ed. Petrozavodsk: Karelskii Nauchn. Tsentr RAN, 1999, pp. 146–157. (In Russ.).
5. Dzhamalov R.G., Safronova T.I., Telegina E.A. Annual distribution of river runoff with estimated contribution of winter low-water season. *Vodnye Resursy*, 2017, vol. 44, no. 6, pp. 785–792.
6. Kalinkina N.M., Sidorova A.I., Polyakova T.N., Belkina N.A., Berezina N.A., Litvinova I.A. Decline in the deep water benthic communities abundance in the Onego Lake under multi factor influence. *Printsipy Ekologii*, 2016, no. 2 (5), pp. 47–68. (In Russ.).
7. Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Syarki M.T. The lake Onego ecosystem: aquatic communities' response to anthropogenic factors and climate change. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*, 2017, no. 1, pp. 4–18. (In Russ.).
8. Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A. *Gidrofizicheskie protsessy na vodobore: eksperimental'nye issledovaniya i modelirovanie* [Hydrophysical Processes in the Catchment Area: Experimental Research and Modeling]. St.Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2012. 616 p.
9. Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh* [Migration of Metals Form sin Fresh Surface Waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1986. 273 p.
10. Lozovik P.A. Acid-base equilibrium in the surface waters of the humid zone. *Geochem. Int.*, 2007, no. 10 (45), pp. 1139–1144.
11. Lozovik P.A. Geochemical classification of surface water sin humid zone based on their acid-base equilibrium. *Vodnye Resursy*, 2013, no. 6 (40), pp. 583–592.
12. Meleshko V.P. Climate warming: causes and consequences. *Himiya i Zhizn'*, 2007, no. 4, pp. 6–12. (In Russ.).
13. Nazarova L.E. Precipitation over the territory of Karelia. *Tr. Karel'skogo Nauchn. Tsentra RAN*, 2015, no. 9, pp. 114–120. (In Russ.).
14. Nazarova L.E. Modern climatic conditions of the White Sea basin area. *Izv. Russ. Geogr. Obshch.*, 2017, no. 5 (149), pp.16–24. (In Russ.).
15. *Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee rezюме* [Assessment Reporton Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General Summary]. Moscow: Rosgidromet, 2008. 28 p.
16. Petrov M.P. Thermal regime. In *Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniya* [Lake Onega Ecosystem and Tendencies of its Change]. Kaufman Z.S., Ed. Leningrad: Karelskii Nauchn. Tsentr Akad. Nauk, 1990, pp. 32–37. (In Russ.).
17. Pirozhkova G.P. Chemical composition of fresh water in the Onega Lake basin. In *Pritoki Onezhskogo ozera* [In Flows of the Onega Lake]. Kaufman Z.S., Ed. Petrozavodsk: Karelskii Nauchn. Tsentr Akad. Nauk, 1990, pp. 4–37. (In Russ.).
18. Pyavchenko N.I., Nesterenko I.M., Chesnokov V.A. *Melioratsiya i priroda Severa* [Melioration and Nature of the North]. Petrozavodsk: Kareliya Publ., 1980. 76 p.
19. Ryzhakov A.V., Zobkova M.V., Lozovik P.A. Patternsin concentration and distribution of phosphorus form sin water bodies of the humid zone. *Tr. Karel'skogo Nauchn. Tsentra RAN*, 2016, no. 9, pp. 33–45. (In Russ.).
20. Sabylina A.V. External load on lake. In *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [Current State and Changes of Ecosystems of Large Lakes Reservoirs in the North-West of European Russia under Climate Change and Human Impact]. Filatov N.N., Ed. Petrozavodsk: Karelskii Nauchn. Tsentr RAN, 2015, pp. 68–72. (In Russ.).
21. Sabylina A.V. An inflow of organic carbon, total phosphorus and total nitrogen to Lake Onego with stream runoff, and their removal by Svir river water sin 1965–2008. *Tr. Karel'skogo Nauchn. Tsentra RAN*, 2016, no. 9, pp. 68–77. (In Russ.).
22. Stadnichenko A.P. The effect of iron sulphate on rapid behavioral and physiological responses of horn cores (Molluska: Gastropoda: Pulmonata). *Gidrobiologicheskii Zhurnal*, 2014, no. 4 (50), pp. 45–50. (In Russ.).
23. Tekanova E.V., Kravchenko I.Y., Potakhin M., Bogdanova M.S. Analysis of the natural factors of biological productivity of water bodies in the different lands capes of Karelia. *Printsipy Ekologii*, 2017, no.2, pp. 61–69. Available at: <http://ecopri.ru/journal/article.php?id=5802> (accessed 26.02.2018). (In Russ.).
24. Bartels P., Hirsch P.E., Svanback R., Eklov P. Dissolved organic carbon reduce shabitat coupling by top predators in lake ecosystems. *Ecosystems*, 2016, 19, pp. 955–967.
25. Brothers S., Köhler J., Attermeyer K., Grossart H.P., Mehner T., Meyer N., Scharnweber K., Hilt S. A feedback loop links brown I fication and anoxia in at emperate, shallow lake. *Limnol. Oceanogr.*, 2014, no. 4 (59), pp. 1388–1398.
26. Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Est. J. Earth Sci.*, 2013, no. 1 (62), pp. 33–41.
27. Lehtovaara A., Arvola L., Keskitao J., Olin M., Rask M., Salonen K., Sarvala J., Tulonen T., Vuorenmaa J. Responses of zoo plankton to long-term environmental changes in a small boreal lake. *Boreal Environ. Res.*, 2014, 19(suppl. A), pp. 97–111.
28. Lenard T., Ejankowski W. Natural water brownification as a shift in the phytoplankton community in a deep hard water lake. *Hydrobiologiya*, 2017, 787, pp. 153–166.
29. Sarkkola S., Nieminen M., Koivusalo H., Laurén A., Kortelainen P., Mattsson T., Palviainen M., Piirainen S.,

- Starr M., Finér L. Iron concentrations are increasing in surface waters from forested head water catchments in eastern Finland. *Sci. Total Environ.*, 2013, 463–464, pp. 683–689.
30. Strock K.E., Saros J.E., Nelson S.J., Birkel S.D., Kahl J.S., McDowell W.H. Extreme weather years drive episodic changes in lake chemistry: implications for recovery from sulfate deposition and long-term trends in dissolved organic carbon. *Biogeochemistry*, 2016, 127, pp. 353–365.
31. Vuori K.-M. Direct and indirect effect of iron on river ecosystems. *Ann. Zool. Fennici*, 1995, 32, pp. 317–329.

Changes in the Hydrochemical Regime of Onego Lake Since the Early 1990s

N. M. Kalinkina*, E. V. Tekanova**, A. V. Sabylina, and A. V. Ryzhakov

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

*e-mail: cerioda@mail.ru,

**e-mail: etekanova@mail.ru

Received February 27, 2018; revised August 27, 2018; accepted September 21, 2018

The supply of allochthonous organic matter with river water to the lakes rises in the new climatic conditions of Karelia (mild winters, an increase in the amount of liquid precipitation, less freezing of the soil). In connection with the geochemical peculiarities of Fennoscandia, more quantity of humic substances in a complex with iron and phosphorus enter the water bodies. These processes can lead to a change in the hydrochemical regime, water quality and habitat of the biota. For the first time for lakes of Karelia, long-term changes (1963–2017) of parameters, which are markers of allochthonous organic matter, were estimated on the example of Petrozavodsk Bay of Onego Lake. It was found that since the 1990s, the following characteristics significantly increase in Petrozavodsk Bay water: the color of water (from 56 to 73 degrees), the content of suspended matter (from 1.6 to 3 mg/l), iron (from 0.12 to 0.42 mg/l), phosphorus (from 12 to 22 µg/l). This leads to changes in the carbonate system of the bay water. The concentration of carbon dioxide increases significantly (from 1.2 to 3.0 mg/l), the pH value drops (from 7.22 to 7.12) and the oxygen content diminishes (from 101 to 92% of saturation). The Spearman correlation coefficients between the chemical characteristics and the year of study were the highest for the spring period, when the bay is separated from the open part of the lake by thermal bar and is strongly influenced by river water. Simultaneously with the change in the hydrochemical regime, there is an increase in the amount of iron in the upper layer of silts (from 0.65 to 4.8% of the air-dry sample). This led to a decrease in the number of macrozoobenthos 6–7 times.

Keywords: Karelia, Onego Lake, climate changing, river discharge, hydrochemical regime, allochthonous organic matter, iron, phosphorus, gas composition of water, pH.