

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 574.5:551.524(282.247.211)“324”

РЕАКЦИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД НА АНОМАЛЬНО ВЫСОКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗДУХА ЗИМЫ 2019/2020 ГОДОВ

© 2021 г. Н. М. Калинкина^а, *, Е. В. Теканова^а, **, Т. В. Ефремова^а, Н. И. Пальшин^а, Л. Е. Назарова^а, В. Н. Баклагин^а, Р. Э. Здореннов^а, В. С. Смирнова^а

^аФедеральный 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 06.04.2021 г.

После доработки 24.08.2021 г.

Принята к публикации 07.09.2021 г.

Изучение и прогноз последствий воздействия изменений климата на водные экосистемы является одной из актуальных задач гидроэкологии и гидробиологии. В последние 30 лет на метеостанциях в районе Онежского озера отмечается устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха. Зимой 2019/2020 гг. регистрировалась аномально высокая температура воздуха, которая превысила климатическую норму на 5–9°C. По спутниковым данным впервые за 65-летнюю историю наблюдений на большей части открытого плеса Онежского озера отсутствовал ледовый покров. Для оценки последствий для Онежского озера аномально теплой зимы изучено состояние его экосистемы в последующий весенне-летний период. В июне 2020 г. были измерены температура воды, концентрация хлорофилла “а”, фотосинтез, и изучены структурные показатели фитопланктона в озере общепринятыми методами. На основании данных температурных датчиков буйковой станции было установлено, что весенний термический бар прошел на 10–15 дней раньше среднемноголетних сроков, плотностная температурная стратификация воды установилась на 15–20 дней раньше. Температура поверхностного слоя воды в Онежском озере в июне 2020 г. была на 5–8°C выше среднемноголетних значений для периода весеннего перемешивания и соответствовала периоду летнего нагревания воды. В открытом плесе озера наблюдалось смещение фенологических фаз развития фитопланктона, в частности, на месяц раньше сформировался его летний состав, сезонный максимум хлорофилла “а” и первичной продукции. В Кондопожской губе озера, испытывающей наибольшую антропогенную фосфорную нагрузку, уровень развития фитопланктона в этот период впервые достиг α-эвтрофного состояния.

Ключевые слова: Онежское озеро, потепление климата, ледовитость, температура воды, фитопланктон, хлорофилл “а”, первичная продукция

DOI: 10.31857/S2587556621060078

ВВЕДЕНИЕ

Заметное потепление климата в Северном полушарии происходит начиная с 1980-х годов (Reid et al., 2016). В северо-западном регионе России (Карелия) в период 1991–2013 гг. средние значения температуры воздуха повысились на 0.08–1°C по сравнению с периодом климатической нормы 1961–1990 гг. (Назарова, 2015). Яркими индикаторами изменения климата являются процессы образования льда на озерах (Robertson et al., 1992).

Установлено, что за 150 лет наблюдения (1846–1995 гг.) на 26 озерах и реках Северного полушария – в Северной Америке (Канада, США) и в Евразии (Финляндия, Швейцария, Россия и

Япония) – сроки установления ледового покрова наступали позже на 5.8 сут/100 лет, сроки очищения ото льда смещались на более ранние на 6.5 сут/100 лет (Magnuson et al., 2000). В России реакция на потепление климата отмечена для таких крупных озер как Байкал, Таймыр, Онежское и Ладожское (Филатов и др., 2020; Karetnikov, Naumenko, 2008). Например, на Онежском озере продолжительность ледового покрова за 60-летний период наблюдения (1955–2015) уменьшилась на 50 дней (Filatov et al., 2019). Сходные тенденции перехода к более поздним срокам установления льда и ранним срокам его разрушения отмечаются на других крупных озерах Карелии – Топозеро, Выгозеро, Сегозеро (Efremova et al., 2013).

Потепление климата отражается в изменении термического режима озер, особенно в последние 30 лет (Woolway et al., 2017). Наиболее быстрыми темпами рост температуры поверхности воды происходит в водоемах северных регионов мира (O'Reilly et al., 2015). Например, в оз. Верхнее в Северной Америке скорость увеличения летней температуры воды (в июле–сентябре) за период 1979–2006 гг. составила 0.11°C/год, в оз. Мичиган — 0.065°C/год, в оз. Гурон — на 0.086°C/год (Austin, Colman, 2007). Для Онежского озера в 1959–2014 гг. средняя скорость роста температуры поверхности воды в период открытой воды составила 0.04°C в год, для Ладожского озера — 0.046°C в год (Филатов и др., 2020).

Наиболее сильная положительная аномалия температуры воздуха за последние 80 лет отмечалась в зимний период 2019/2020 гг. на севере Евразии. На Европейской территории России, в Западной и Средней Сибири температура воздуха зимой была на 7°C выше климатической нормы 1961–1990 гг.¹ В зимний период 2019/2020 гг. в Западной и Центральной Сибири отмечалось менее интенсивное зимнее промерзание грунта (Frolov, 2020). Зимой 2019/2020 гг. впервые за почти 100-летнюю историю наблюдений Псковско-Чудское озеро не покрылось льдом (Kangur et al., 2020).

Известно, что сокращение продолжительности ледостава на озерах приводит к установлению более ранней и устойчивой летней плотностной стратификации, и, как следствие, к более интенсивному прогреву поверхности воды за счет увеличения длительности периода летней стратификации (Austin, Colman, 2007). В бореальных озерах, в том числе таких больших, как Онежское озеро, сезонная динамика температуры воды является главным фактором, определяющим особенности сезонного цикла планктона. Поэтому изменение температурного режима непременно

отразится на закономерностях развития планктонных сообществ.

В связи с этим целью настоящих исследований стало изучение реакции экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимой 2019/2020 гг. Для этого был выполнен анализ метеорологических условий в районе Онежского озера в период с октября 2019 г. по июль 2020 г.; по данным спутниковых съемок рассмотрены ледовые явления на озере зимой 2019/2020 гг. в сравнении с периодом 2000–2018 гг.; изучен характер вертикального профиля температуры воды в различных районах Онежского озера в июне 2020 г. в сравнении со средними многолетними характеристиками температуры воды на различных горизонтах, дана оценка состояния экосистемы озера в июне 2020 г. по показателям фитопланктона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метеорологические условия в районе Онежского озера в период с октября 2019 по июль 2020 г. анализировались по данным метеостанции Петрозаводск системы Северо-западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды². Ледовые явления зимы 2019/2020 гг. изучались по наборам спутниковых данных NSIDC, NOAA NESDIS, датчика MODIS (каналы 1, 3, 4). Значения ледовитости Онежского озера за период январь–апрель 2020 г. рассчитаны по методике (Баклагин, 2018) на основе вышперечисленных наборов спутниковых данных.

Для оценки ледового режима получены индексы RICI (Relative Ice Cover Index) за период 2000–2020 гг., методика расчета которых использована для оценки статистических характеристик ледового режима Ладожского озера (Karetnikov, Naumenko, 2008):

$$RICI_y = \frac{\sum_{date=start\ date_y}^{finish\ date_y} ice_{date}}{\sum_{y=start\ year}^{finish\ year} \sum_{date=start\ date_y}^{finish\ date_y} ice_{date} / (finish\ year - start\ year)},$$

где ice_{date} — значение ледовитости, зафиксированное на дату $date$; $start\ date_y$ — дата начала периода ледовых явлений в году y ; $finish\ date_y$ — дата окончания периода ледовых явлений в году y ; $start\ year$ — начальный год наблюдаемого многолетнего периода

(в данном исследовании 2000 г.); $finish\ year$ — последний год наблюдаемого периода (2020).

Температурный режим в период прохождения термобара оценивался по данным автономной буйковой станции, установленной с октября 2019 г. до

¹ http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru (дата обращения 25.03.2021).

² www.meteo.ru/data (дата обращения 02.04.2021).

начала июня 2020 г. в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в районе станции P_2 (рис. 1). В период с 12 по 20 июня 2020 г. в разных районах Онежского озера было изучено состояние термического и биологического режимов (см. рис. 1).

Температура водной толщи измерялась мультипараметрическим гидрологическим зондом STD-90М. Содержание хлорофилла “а” в воде определялось по методике (ГОСТ 17.1.0402.90). Концентрации хлорофилла “а” измерялись до глубины 2-х прозрачностей воды, полученные величины усреднялись, так как ранее было установлено равномерное распределение хлорофилла в этом слое воды (Теканова и др., 2018). Первичная продукция измерялась в верхнем слое воды скляночным кислородным методом (Кузнецов, Дубинина, 1989). Видовой состав фитопланктона определялся общепринятыми методами (Кузьмин, 1975; Федоров, 1979).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика метеорологических условий в районе Онежского озера с октября 2019 г. по июль 2020 г. Главными особенностями погоды в этот период оказались повышенный температурный фон и возросшее количество осадков. Средняя месячная температура воздуха в октябре 2019 г. была в пределах нормы, в ноябре—декабре превысила норму на 1.4 и 6.9°C. С января по март 2020 г. ее средние месячные значения превышали климатические нормы на 9.4, 7.3 и 5.2°C. При этом число дней без оттепели (отрицательные значения температуры воздуха в течение суток по показаниям максимального термометра) в течение декабря 2019 г. — марта 2020 г. были значительно ниже средних многолетних значений. Так, в декабре 2019 г. температура воздуха была ниже нуля в течение 12 дней при норме 23 дня, в январе 2020 г. — 12 дней вместо 26, в феврале — 12 дней при среднем многолетнем показателе 24 дня. В марте 2020 г. отмечено всего 4 дня без повышения температуры воздуха выше нуля (норма 15 дней). По показаниям минимального термометра понижения температуры воздуха ниже -10°C за шесть месяцев наблюдений отмечены всего 15 раз. Абсолютный минимум температуры воздуха в течение указанного периода составил -17.3°C (27 января 2020 г.). Сумма выпавших атмосферных осадков за октябрь 2019 г. — март 2000 г. в районе г. Петрозаводска превысила климатическую норму примерно на 30% и составила 298 мм.

В апреле 2020 г. средняя месячная температура воздуха была в пределах климатической нормы ($+1.5^{\circ}\text{C}$), в мае — ниже средних многолетних значений на 0.8°C (рис. 2). При этом в дневные часы воздух прогревался до $+13$ и $+19^{\circ}\text{C}$ соответственно. В июне 2020 г. установилась жаркая погода, в

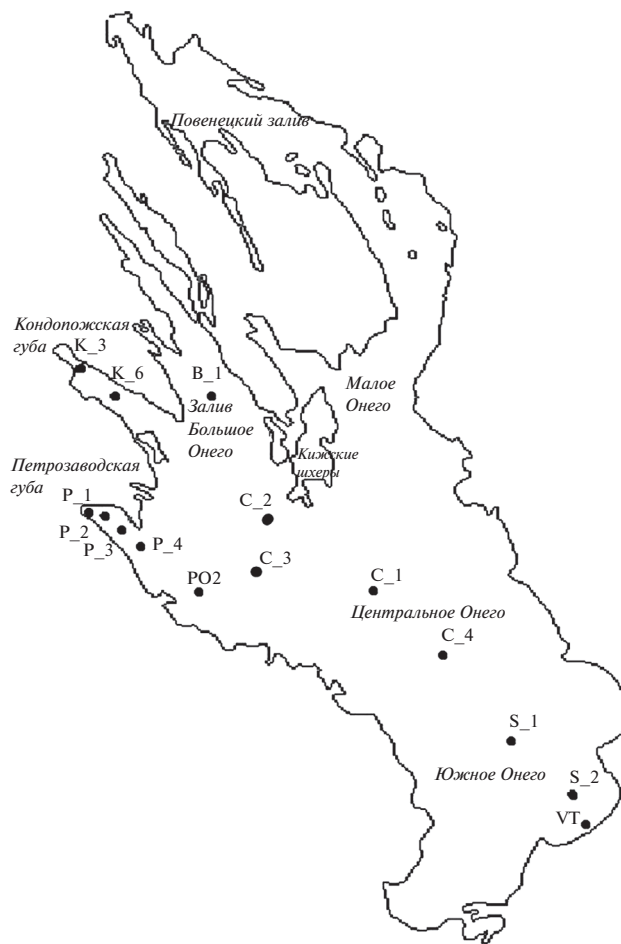


Рис. 1. Схема гидрологических и гидробиологических станций на Онежском озере в июне 2020 г.

дневные часы температура воздуха превышала 20°C в течение 16 дней. Значение средней месячной температуры воздуха на 2.5°C превысило климатическую норму.

Ледовые явления на Онежском озере в 2019/2020 гг. Анализ космических снимков показал, что значительная часть центральной части акватории Онежского озера зимой 2019/2020 гг. впервые за 65-летнюю историю наблюдений, в том числе последние 20 лет с использованием спутниковой информации, не покрывалась льдом (рис. 3). Ледовые образования зимы 2019/2020 гг. отмечались только в северо-западных заливах Онежского озера. Лишь в конце февраля полностью оказались подо льдом Повенецкий залив, Малое Онего, Кижские шхеры, вершинные части северо-западных заливов, прибрежная часть восточного берега Онежского озера. Пиковое значение ледовитости пришлось на 4 марта и составило лишь 58.5% акватории. В середине марта поля дрейфующего льда наблюдались у восточного берега залива Большое Онего и северо-восточного побережья открытой части озера, включая Ма-

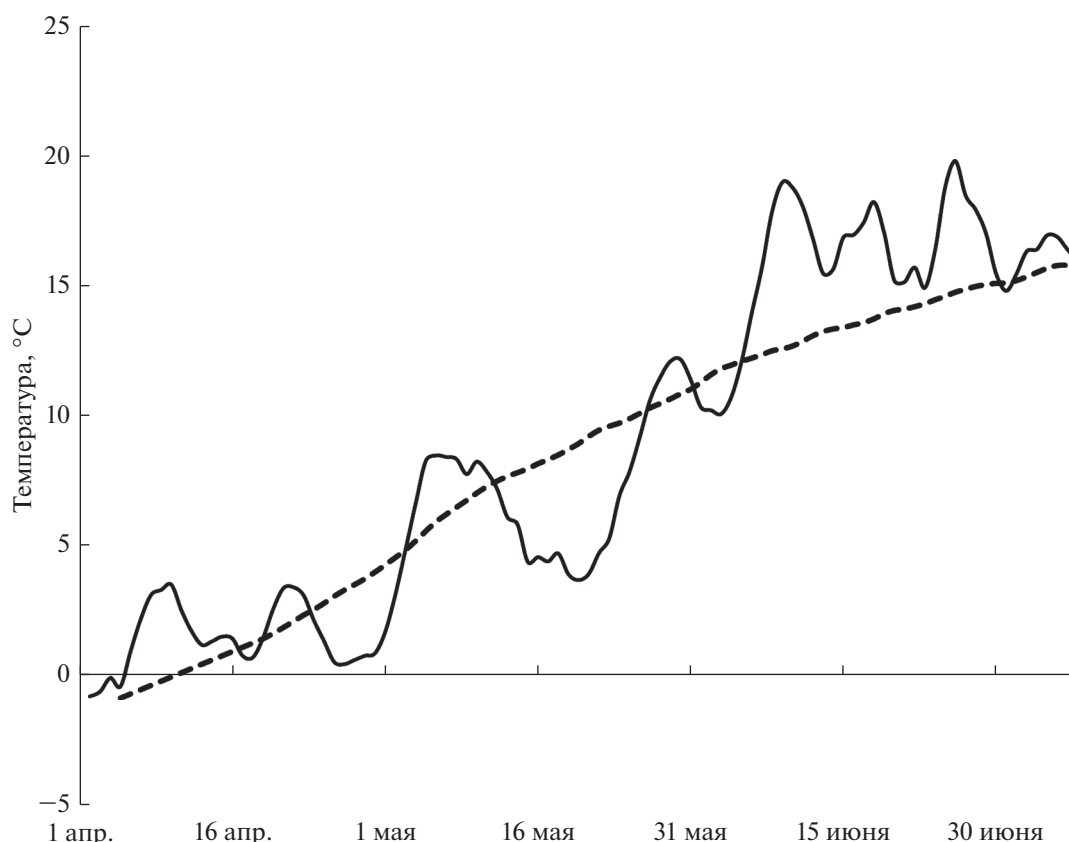


Рис. 2. Температура воздуха в апреле, мае и июне 2020 г. по данным метеостанции Петрозаводск: пунктирная линия — среднегодовая в весенне-летний период 1958–1989 гг.; сплошная линия — сглаженная фильтром центрального скользящего среднего (5 суток) в 2020 г.

лое Онего, в то время как Петрозаводская губа, Петрозаводское Онего, центральная и южная часть озера оставались свободными ото льда. В конце апреля практически вся акватория Онежского озера уже оказалась свободной ото льда. Сравнение полученных данных с данными по продолжительности периодов ледовых явлений на Онежском озере за последние 20 лет, когда стала использоваться спутниковая информация (Баклагин, 2018), показало сокращение этого периода зимой 2019/2020 гг. на 58 сут. Если в среднем продолжительность ледовых явлений в 2000–2018 гг. составляла 175 дней, то зимой 2020 г. — всего 117 дней.

Анализ индексов RICI за период 2000–2019 гг. показал, что его значения варьируют от 0.73 (2013–2014 гг.) до 1.40 (2002–2003 гг.). Коэффициент вариации составляет 24%, что свидетельствует об однородности ряда значений RICI за этот период. Однако зимой 2019–2020 гг. значение RICI составило лишь 0.29, что существенно ниже ранее достигнутого минимального значения зимой 2013/2014 гг.

Температура воды в Онежском озере в июне 2020 г. В период весеннего нагревания воды в Онежском

озере (апрель) метеорологические условия близко соответствовали климатической норме. В мае среднемесячная температура воздуха была ниже нормы 1960–1990 гг. (см. рис. 2), несмотря на это, отсутствие льда на основной акватории озера стало причиной более раннего прогрева водной толщи. По данным измерений на автономной буйковой станции (ст. Р_2), установленной с октября 2019 г. до начала июня 2020 г., температура воды в центральной части Петрозаводской губы достигла 4°C уже 5–7 мая, в то время как по среднегодовым данным за период 1960–1990 гг. термический бар в этом районе обычно проходит на две недели позже (Петров, 1990). С понижением температуры воздуха во второй декаде мая до 3–4°C (см. рис. 2) нагревание озера существенно замедлилось. Устойчивая термическая стратификация с образованием эпилимниона и слоя температурного скачка начала формироваться в Петрозаводской губе после 23 мая. В первых числах июня температура верхнего 3-х метрового слоя воды превысила 12°C, а на глубинах 18.5 и 19.5 м составляла 6.3–6.8°C, что выходит за верхние границы нормы (Петров, 1990).

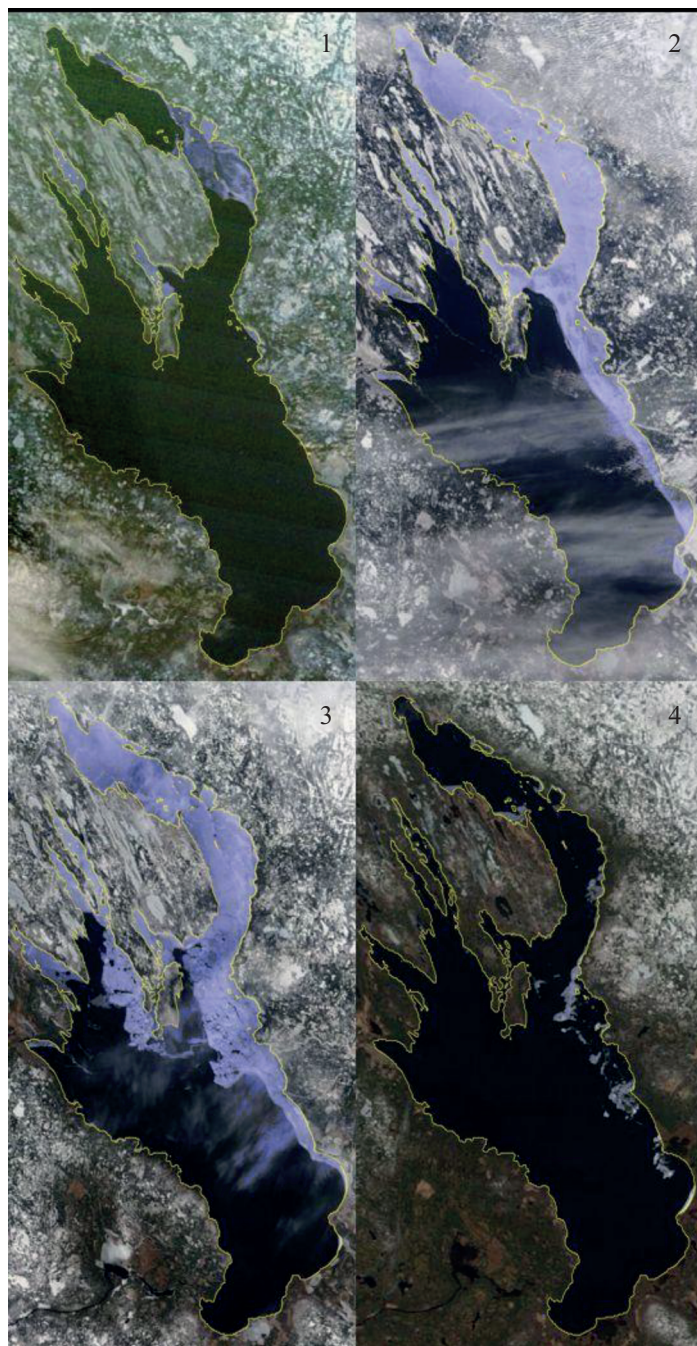


Рис. 3. Характер ледяного покрова на Онежском озере в январе–апреле 2020 г.: 1 – 10 января; 2 – 26 февраля; 3 – 17 марта; 4 – 22 апреля.

В первой декаде июня 2020 г. установилась теплая (см. рис. 2) и маловетренная погода (1–3 м/с по данным метеостанции г. Петрозаводск). Такая погода способствовала раннему установлению устойчивой термической стратификации на всей акватории озера и обострению градиентов плотности в термоклине, препятствующих перемешиванию с нижележащими слоями. Это привело к значительному нагреванию эпилимниона.

По среднемноголетним данным (1960–1990 гг.) время исследований в 2020 г. относится к периоду весеннего перемешивания вод Онежского озера в результате прохождения термического бара, который исчезал 14–28 июня (Петров, 1990). Однако на момент пространственной съемки на Онежском озере 12–19 июня 2020 г. термический бар уже прошел, на всей акватории установилась прямая термическая стратификация с температурами

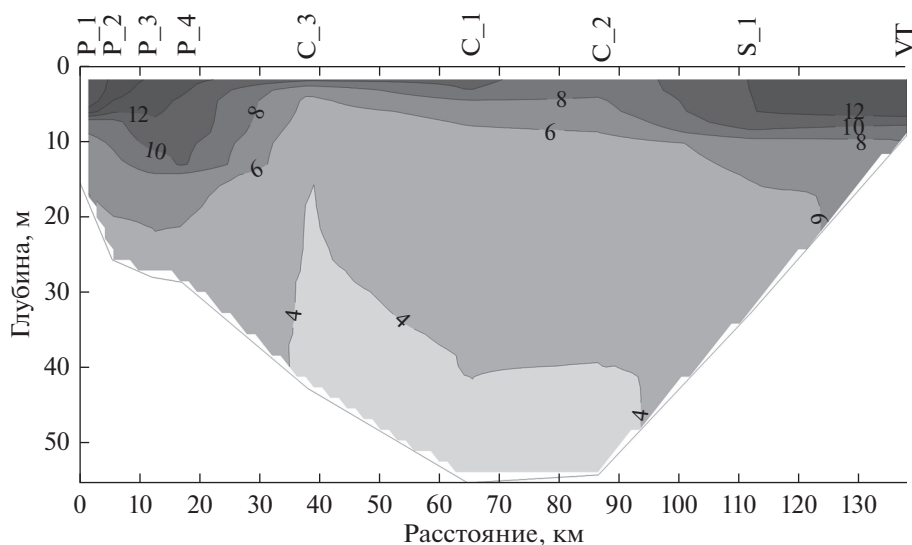


Рис. 4. Вертикальный профиль температуры воды в Онежском озере вдоль продольного разреза Петрозаводская губа (ст. P_1)—Южное Онего (ст. VT), 12–19 июня 2020 г., °C.

от 8.5 до 18.8 °C в верхнем слое воды 5–6 м, а на горизонтах больше 20–30 м температура уменьшалась до 3.9–5.2 °C (рис. 4). Таким образом, период исследований можно отнести к началу летнего нагревания, который, главным образом из-за отсутствия ледового покрова на основной акватории озера в 2020 г. установился на 10–15 сут раньше среднемноголетнего срока (1960–1990 гг.).

В Петрозаводской губе (ст. P_2) в период измерений (12 июня 2020 г.) температура в верхнем 5-метровом слое воды была примерно на 5 °C выше среднемноголетних значений, при относительно слабом ветре в слое 3–7 м сформировался термоклин, ниже которого температура воды отличалась от среднемноголетних значений меньше, чем на 1 °C (рис. 5а). В глубоководной части Кондопожской губы (ст. K_6) температура в эпилимнионе превышала 15 °C, что на 5–6 °C выше среднемноголетних значений (см. рис. 5б). Слой температурного скачка был хорошо выражен (вертикальный градиент температуры достигал 2.5 град./м) и расположен в слое 6–15 м. В толще воды ниже 15 м температура соответствовала среднемноголетним значениям.

В глубоководных участках озера — Центральном Онеге (см. рис. 5в) и заливе Большое Онего (см. рис. 5г) — температура верхнего перемешанного слоя была существенно ниже, чем в более мелководных районах и заливах. Так, на ст. C_2 она составляла 11.0–11.2 °C, в слое воды 4–7 м сформировался резкий термоклин с уменьшением температуры до 6 °C. На глубинах от 15 м и до самого дна происходило постепенное понижение температуры от 4.2 до 3.8 °C (см. рис. 5в). На ст. B_1 температура на поверхности достигала 14 °C и превышала многолетнюю норму на 8 °C. В слое

воды от 2 до 10 м располагался слой температурного скачка, ниже наблюдалось уменьшение температуры до 4 °C. В то же время, по среднемноголетним данным (1960–1990 гг.) во второй декаде июня в глубоководной части озера и заливе Большое Онего температура поверхностного слоя воды, как правило, составляла 3.2–3.9 °C, т.е., на 8–9 °C меньше, чем в июне 2020 г.

Состояние экосистемы Онежского озера в июне 2020 г. по показателям фитопланктона. Медленный прогрев воды в Онежском озере определяет асинхронность сезонной цикличности фитопланктона в прибрежных и глубоководных частях озера. В определенный период в водоеме одновременно могут присутствовать весенние и летние фазы сезонного цикла фитопланктона (Вислянская, 1999; Петрова, 1971). Весенний фитопланктон озера чрезвычайно беден по видовому разнообразию и на 98% представлен крупными холодноводными фотосинтетически слабоактивными диатомеями *Aulacoseira islandica* и *A. alpingena*. Летний комплекс, при сохранении руководящей роли летних мелкоклочных диатомовых (*Tabellaria fenestrata*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*) более разнообразен за счет золотистых р. *Dinobryon*, хлорококковых р. *Gemelliscystis*, синезеленых р. *Oscillatoria* и *Anabaena* (Вислянская, 1999; Петрова, 1971; Чекрыжева, 2012). В целом, в июне фитопланктон в заливах находится в ранне-летней фазе сезонного цикла, в это время его продукционные показатели (концентрация хлорофилла “а” и скорость фотосинтеза) достигают максимальных сезонных значений. В это же время в открытом плесе озера развивается весенний фотосинтетически слабоактивный фитопланктон. Сезонного максимума продукционные пока-

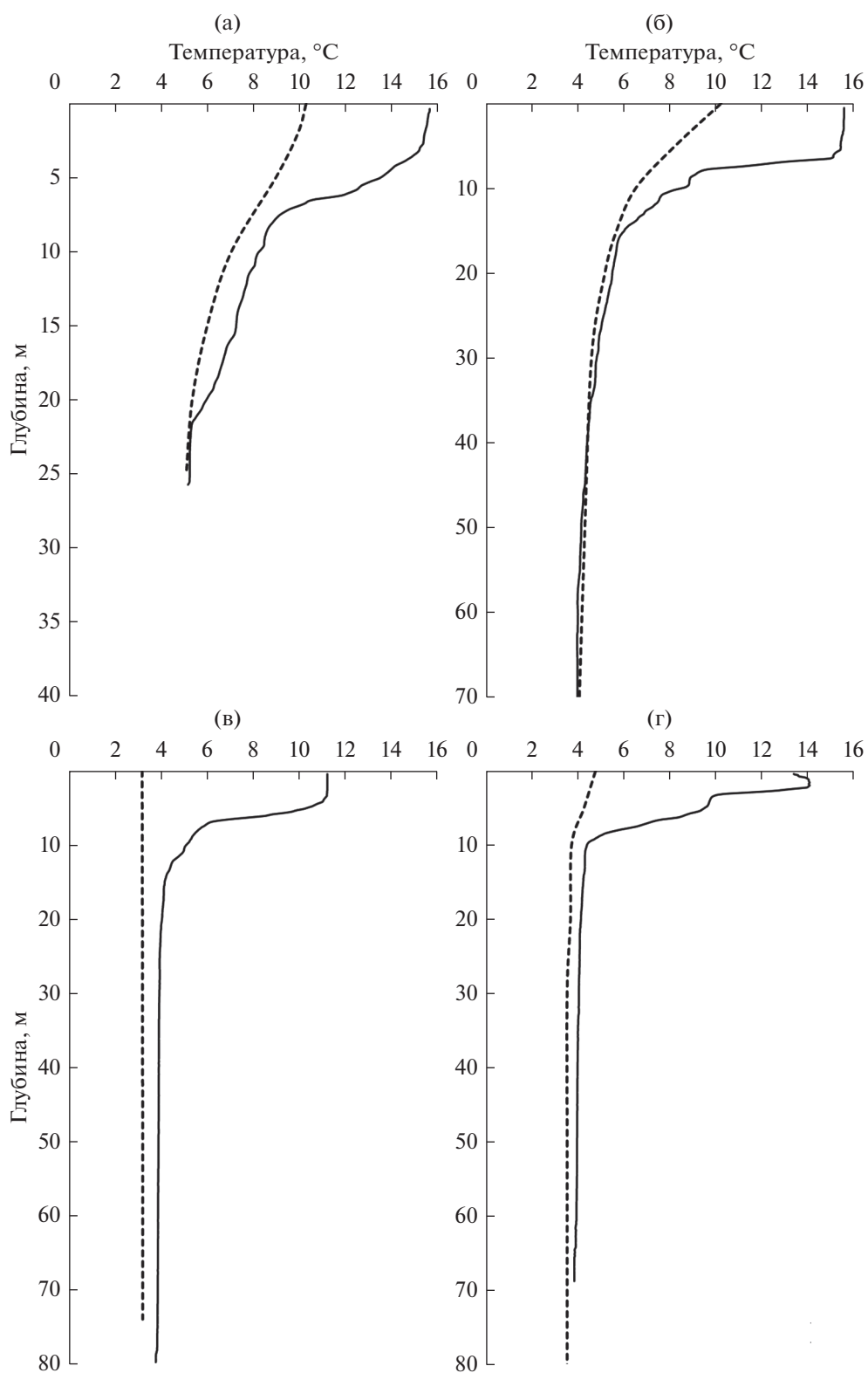


Рис. 5. Вертикальный профиль температуры воды 12–19 июня 2020 г.: (а) Петрозаводская губа (Р_2), (б) Кондопожская губа (К_6), (в) Центральное Онего (С_2), (г) залив Большое Онего (В_1). Сплошная линия — измерения в июне 2020 г., пунктирная линия — среднееголетние данные (1960–1990 гг.) на соответствующие даты.

Таблица 1. Средняя концентрация хлорофилла “а” (мкг/л) в Онежском озере в июне 2001–2019 гг. и в июне 2020 г.

Район озера	2001–2019 гг.		2020 г.
	X ± m (n)	Min–max	
Петрозаводская губа (ст. Р_2)	2.3 ± 0.2 (6)	1.5–4.3	6.4*
Кондопожская губа (ст. К_3)	5.4 ± 1.1 (4)	3.2–7.2	19.7*
Кондопожская губа (ст. К_6)	2.3 ± 0.3 (4)	1.3–2.8	7.1*
Центральное Онего (ст. С_1, С_2, С_3, С_4)	0.6 ± 0.1 (7)	0.3–0.9	2.1* (4)**
Залив Большое Онего (ст. В_1)	0.9 ± 0.1 (5)	0.5–1.1	3.3*

Примечания: * – концентрация хлорофилла “а” достоверно отличается ($p < 0.05$) от данных за 2001–2019 гг.; ** – средняя концентрация по 4 станциям.

затели альгоценозов в открытом плесе достигают лишь летом (в июле) при смене таксономического состава (Петрова, 1971; Теканова, Сярки, 2015; Тимакова, Теканова, 1999).

Исследование продукционных показателей фитопланктона на акватории Онежского озера в условиях аномального нагревания верхнего слоя воды в июне 2020 г. показало достоверное 3–4 кратное превышение концентрации хлорофилла “а” в фотическом слое воды по сравнению со средне-многолетним значением для июня за предшествующие 20 лет (табл. 1). В Петрозаводской и Кондопожской губах исследования в июне 2020 г. приходились на время сезонного максимума фитопланктона. Концентрации хлорофилла в Петрозаводской губе при температуре воды на 5°C выше средне-многолетних значений были лишь на 50% больше его максимальной величины, зарегистрированной в период 2001–2019 гг., хотя эти отличия и носят достоверный характер (см. табл. 1). Скорость фотосинтеза фитопланктона, измеренная в это же время, достигала 198.8 мкг С/л в сут, что вполне укладывается в интервал многолетних значений за 2007–2019 гг. для июня – 112.1–236.2 мкг С/л в сут при медианном значении 175.5 ± 29.7 мкг С/л в сут, $n = 7$ (рис. 6а).

Иная ситуация наблюдалась в июне 2020 г. в Кондопожской губе. Концентрация хлорофилла “а” здесь превышала максимальную величину, отмеченную за последние 20 лет, в 2.5–3 раза (см. табл. 1). Это было связано не только с более высокой температурой воды по сравнению со средне-многолетним значением, так как это превышение было таким же, как в Петрозаводской губе (на 5°C). Вторым фактором стала высокая антропогенная нагрузка на залив. Источником загрязнения фосфором долгое время являются сточные воды Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината и, с 2000-х годов, форелевые хозяйства (Калинкина и др., 2018). Совместное влияние климатического и антропогенного факторов в июне 2020 г. стало причиной критической ситуации в мезотрофной Кондопожской губе, когда впервые за 60-летний период исследований эко-

система по концентрации хлорофилла “а” достигла α-эвтрофного состояния.

В открытом плесе озера (Центральное Онего, Большое Онего), как и в эвтрофируемой Кондопожской губе, в июне 2020 г. было обнаружено 2–3-кратное превышение концентрации хлорофилла “а” по сравнению с максимальными величинами предшествующего периода 2001–2019 гг. (см. табл. 1). Температура верхнего слоя воды здесь была на 8°C выше средне-многолетнего значения. Это превышение оказалось больше, чем в заливах. При этом концентрации хлорофилла соответствовали уже не весеннему, а раннелетнему состоянию фитопланктона в период сезонного максимума в июле (Теканова, Сярки, 2015). Скорость фотосинтеза, измеренная в центральном районе озера (ст. С_3), достигала 153.3 мкг С/л в сут, что было достоверно выше средне-многолетней величины для июня за 2007–2019 гг. (60.0 ± 10.6 мкг С/л в сут, $n = 5$) и в 2 раза больше максимального значения за эти годы (32.7–70.0 мкг С/л в сут). Более того, скорость фотосинтеза в центральном районе озера в июне 2020 г. была значительно выше, чем даже в период многолетнего сезонного максимума в июле (рис. 6б). Анализ таксономического состава микроводорослей подтвердил, что в период исследований фитопланктон в открытом плесе озера уже достиг летней фазы сезонного развития. Вклад диатомовых в биомассу сообщества сократился до 80%, на их фоне активно развивались зеленые (8%), динофитовые (5%), хризодитовые (3.3%) и синезеленые водоросли (1.5%). Хотя мелкоклеточные зеленые и синезеленые водоросли не вносили значительного вклада в биомассу, однако выступали ведущими группами в численности сообщества – 44 и 17% соответственно. Среди диатомовых преобладающая роль принадлежала летней *Tabellaria fenestrata* и весенней *Aulacoseira italica*. Среди зеленых были многочисленны *Kirchneriella contorta*, *Coenochloris ovalis*, *C. pyrenoidosa*, *Monoraphidium contortum*, *Sphaerocystis schroeteri*, *Botryococcus braunii*, среди синезеленых – *Aphanizomenon flos-aquae*.

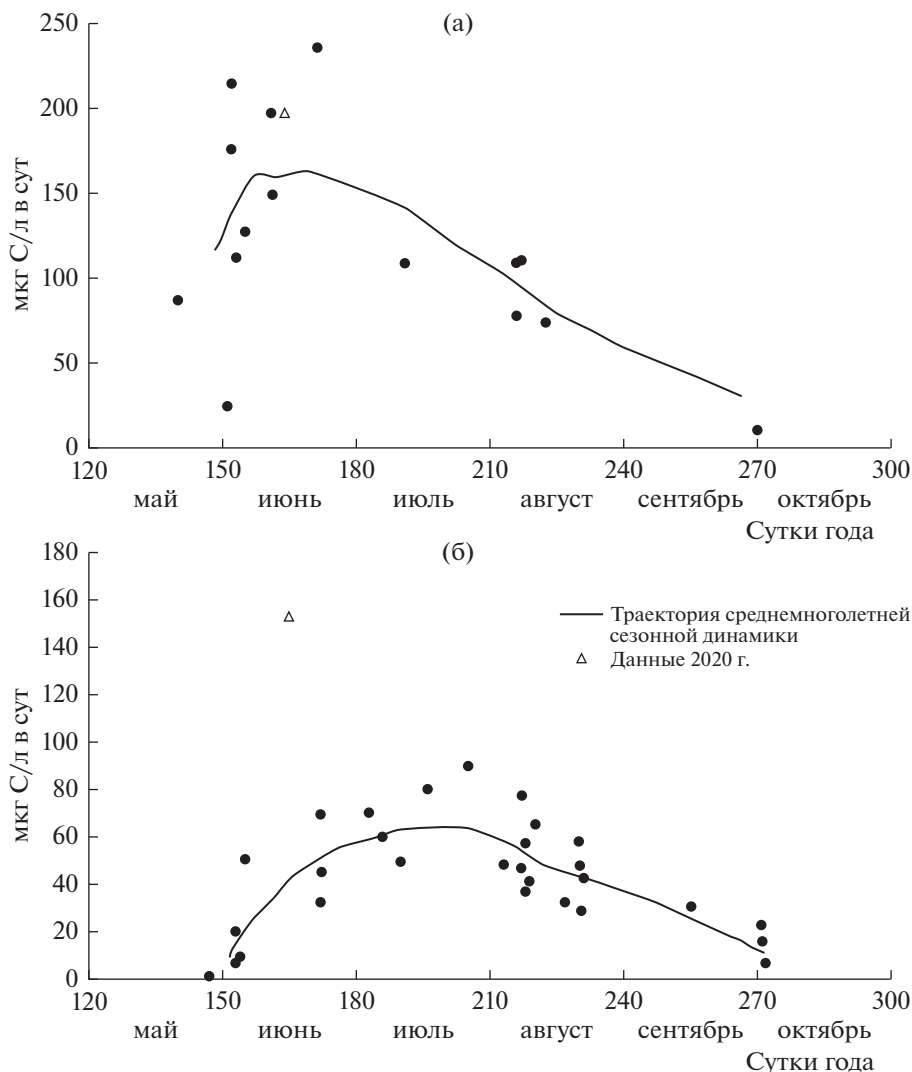


Рис. 6. Сезонная динамика фотосинтеза в верхнем слое воды Онежского озера в 2007–2020 гг.: (а) Петрозаводская губа (ст. P_2); (б) – Центральное Онего (ст. C_1, C_2, C_3, C_4).

Быстрый и значительный прогрев воды в Онежском озере сократил время прохождения термобара и временной разрыв в достижении сезонного максимума хлорофилла и первичной продукции в прибрежном и центральном районах озера. На основе полученных данных можно утверждать, что в июне 2020 г. продукционные показатели фитопланктона в открытом плесе озера достигли максимальных сезонных значений на месяц раньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях аномально теплой зимы 2019/2020 гг. впервые за 65 лет систематических наблюдений за ледовыми явлениями на Онежском озере обнаружено, что обширная область центральной и южной частей водоема не

покрылась льдом. Продолжительность ледовых явлений по сравнению с периодом 2000–2019 гг. сократилась на 58 суток, а значение индекса RCI составило лишь 0.29, обновив свой минимум (0.74) за последние 20 лет анализа космических снимков.

Отсутствие ледового покрова обусловило прохождение фронта термического бара в Онежском озере в 2020 г. на 10–15 дней раньше среднеголетних сроков. Июнь с температурой воздуха на 2.5°C выше климатической нормы и штилевые условия способствовали установлению устойчивой плотностной температурной стратификации воды при глубине эпилимниона 2–4 м на 15–20 дней раньше по сравнению со среднеголетними сроками. Небольшая мощность эпилимниона способствовала его перегреву. Поверхностный слой воды в июне прогрелся на 5–8°C выше среднеголетних

значений для периода весеннего перемешивания воды. Температура верхнего слоя воды соответствовала первой декаде июля, т.е. периоду летнего нагревания воды.

В условиях изменения термического режима была нарушена естественная асинхронность в развитии фитопланктона прибрежных и пелагических районов Онежского озера. В открытом плесе озера летний состав фитопланктона, сезонный максимум хлорофилла “а” и первичной продукции сформировались на месяц раньше среднемноголетнего срока. На всей акватории озера фитопланктон находился в раннелетней фазе развития. Концентрация хлорофилла “а” в июне 2020 г. в заливах и пелагической части достоверно превышала величины июня 2001–2019 гг. Увеличение температуры воды наиболее критично сказалось на развитии фитопланктона Кондопожской губы, дополнительным стимулятором которого служит фосфорная нагрузка со сточными водами ЦБК и с форелевых хозяйств. В июне 2020 г. трофический статус Кондопожской губы Онежского озера впервые достиг α -эвтрофного уровня.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках госзадания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН № 0218-2019-0085.

FUNDING

The study was conducted within the framework of the state assignment no. 0218-2019-0085 given to the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Northern Water Problems Institute, KRC, RAS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баклагин В.Н. Изменчивость ледовитости Онежского озера в период 2000–2018 гг. по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 552–558.
- Висянская И.Г. Фитопланктон // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 183–192.
- ГОСТ 17.1.0402.90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла “а”. М.: ФГУП “Стандартинформ”, 1990. 14 с.
- 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.
- Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 285 с.
- Кузьмин Г.В. Фитопланктон // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. С. 78–87.
- Назарова Л.Е. Современное состояние и изменчивость климата на водосборах Онежского озера и Выгозерско-Ондского водохранилища / Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 10–19.
- Петров М.П. Термический режим // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 32–37.
- Петрова Н.А. Фитопланктон Онежского озера // Растительный мир Онежского озера. Л.: Наука, 1971. С. 88–127.
- Теканова Е.В., Калинкина Н.М., Здорovenнов Р.Э., Макарова Е.М. Результаты исследования экосистемы Онежского озера в период летней стратификации по данным экспедиции 2017 г // Тр. Карел. науч. центра РАН. Сер. Лимнология. Океанология. 2018. № 9. С. 44–53.
- Теканова Е.В., Сярки М.Т. Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // Изв. РАН. Сер. биол. 2015. № 6. С. 661–667.
- Тимакова Т.М., Теканова Е.В. Характеристика процессов первичного продуцирования органического вещества // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 158–174.
- Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. М.: Наука, 1979. 166 с.
- Филатов Н.Н., Баклагин В.Н., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Изменчивость температуры воды и характеристик ледяного покрова Ладожского и Онежского озера // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. С. 53–67.
- Чекрыжева Т.А. Таксономическая и экологическая характеристика фитопланктона Онежского озера // Тр. Карел. науч. центра РАН. Сер. Биogeография. 2012. Вып. 13. № 1. С. 56–69.
- Austin J.A., Colman S.M. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. Iss. 6. P. 1–5.
- Efremova T., Palshin N., Zdorovennov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Estonian J. Earth Sci. 2013. V. 62. № 1. P. 33–41.
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // Inland Waters. 2019. V. 9. P. 130–141. <https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355>
- Frolov D. Peculiarities of weather and ground freezing conditions in Siberia and Russian Arctic in winter and spring period of 2019/2020 // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1614. P. 1–5.
- Kangur K., Ginter K., Kangur A., Kangur P., Möls T. How did the late 1980s climate regime shift affect temperature-sensitive fish population dynamics: case study of Vendace (*Coregonus albula*) in a large north-temperate lake // Water. 2020. V. 12. P. 1–16.

- Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiologia*. 2008. V. 599. P. 41–48.
- Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., et al. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere // *Science*. 2000. V. 289. P. 1743–1746.
- O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K., et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. Iss. 24. P. 10773–10781.
- Reid P.C., Hari R.E., Beaugrand G., et al. Global impacts of the 1980s regime shift // *Glob. Change Biol.* 2016. V. 22. Iss. 2. P. 682–703.
- Robertson D.M., Ragotzkie R.A., Magnuson J.J. Lake ice records used to detect historical and future climatic changes // *Climatic Change*. 1992. V. 21. P. 407–427.
- Woolway R.I., Dokulil M.T., Marszelewski W., Schmid M., Bouffard D., Merchant C.J. Warming of Central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift // *Clim. Change*. 2017. V. 142. Iss. 3–4. P. 505–520.

Response of Lake Onego Ecosystem in the Spring–Summer Period to Anomaly High Air Temperature in Winter 2019/2020

N. M. Kalinkina¹, *, E. V. Tekanova¹, **, T. V. Efremova¹, N. I. Palshin¹, L. E. Nazarova¹, V. N. Baklagin¹, R. E. Zdorovenov¹, and V. S. Smirnova¹

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*e-mail: cerioda@mail.ru

**e-mail: etekanova@mail.ru

Studying and forecasting the consequences of the climate change impact on aquatic ecosystems are among the important tasks of hydroecology and hydrobiology. Over the past 30 years, according to data of meteorological stations on the catchment area of Lake Onego—the largest reservoir of Northwestern Russia—the average annual air temperature is steadily increasing. In the winter of 2019–2020, an abnormally high air temperature was recorded, which exceeded the climatic norm by 5–9°C. According to satellite data, in winter 2020, for the first time in the 65-year history of observations, there was no ice cover on most of the open part of Onego. To assess the consequences of an abnormally warm winter for the ecosystem of Onego, its state in the spring–summer period was studied. In June 2020, the water temperature, the concentration of chlorophyll “a,” and photosynthesis were measured, and the structural parameters of phytoplankton in Onego were studied using standard methods. Based on the data from the temperature sensors of the buoy station, it was found that the spring thermal bar passed 10–15 days earlier than the average long-term periods, the temperature stratification of water was established 15–20 days earlier. The temperature of the surface water layer in Onego in June 2020 was 5–8°C higher than the average long-term values for the period of spring mixing and corresponded to the period of summer heating of water. In the open part of the lake, a shift in the phenological phases of phytoplankton development was observed, in particular, its summer composition, the seasonal maximum of chlorophyll “a,” and primary production were formed a month earlier. In the Kondopoga Bay of Onego, which was exposed to the highest anthropogenic phosphorus load, the level of phytoplankton development first reached the α -eutrophic state.

Keywords: Lake Onego, climate warming, ice cover, water temperature, phytoplankton, chlorophyll “a,” primary production

REFERENCES

- Austin J.A., Colman S.M. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34(6), pp. 1–5.
- Baklagin V.N. Variability of the ice coverage of Lake Onego in the period 2000–2018 by satellite data. *Led i Sneg*, 2018, vol. 58, no. 4, pp. 552–558. (In Russ.).
- Chekryzheva T.A. Taxonomic and ecological characteristics of the phytoplankton of Lake Onego. *Tr. Karel. Nauchn. Tsentra RAN, Ser. Biogeogr.*, 2012, vol. 13, no. 1, pp. 56–69. (In Russ.).
- Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Est. J. Earth Sci.*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 33–41. doi 10.3176/earth.2013.04
- Fedorov V.D. *O metodakh izucheniya fitoplanktona i ego aktivnosti* [About Methods of Studying Phytoplankton and its Activity]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 166 p.
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 130–141.
- Filatov N.N., Baklagin V.N., Efremova T.V., Pal'shin N.I. Variability of water temperature and characteristics of the ice cover of Ladoga and Onego lakes. In *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii* [Diagnosis and Forecast of Thermohydrodynamics and Ecosystems of the Great Lakes of Russia]. Filatov N.N., Ed. Petrozavodsk: Karel. Nauchn. Tsentr RAN, 2020, pp. 53–67. (In Russ.).

- Frolov D. Peculiarities of weather and ground freezing conditions in Siberia and Russian Arctic in winter and spring period of 2019/2020. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1614, no. 1, pp. 1–5.
- GOST 17.1.4.02-90. Water. Method of Spectrophotometric Determination of Chlorophyll A. Moscow: FGUP "Standartinform", 1990. (In Russ.).
- Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Syarki M.T. The lake Onego ecosystem: aquatic communities response to anthropogenic factors and climate change. *Vodn. Khozyaistvo Rossii: Probl., Tekhnol., Upravlenie*, 2017, no. 1, pp. 4–18. (In Russ.).
- Kangur K., Ginter K., Kangur A., Kangur P., Möls T. How did the late 1980s climate regime shift affect temperature-sensitive fish population dynamics: case study of Vendace (*Coregonus albula*) in a large north-temperate lake. *Water*, 2020, vol. 12, no. 10, pp. 1–16.
- Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover. *Hydrobiol.*, 2008, vol. 599, no. 1, pp. 41–48.
- Kuz'min G.V. Phytoplankton. In *Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov* [Methods for Studying Biogeocenoses of Inland Water Bodies]. Moscow: Nauka Publ., 1975, pp. 73–84. (In Russ.).
- Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. *Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov* [Methods for Studying Aquatic Microorganisms]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 285 p.
- Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J. et al. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science*, 2000, vol. 289, pp. 1743–1746.
- Nazarova L.E. Current state and climate variability in the catchments of Lake Onego and the Vygozersko-Ondskoe reservoir. In *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The Largest Lakes-Reservoirs of the North-West European Part of Russia: Current State and Changes of Ecosystems under Climatic Variability and Anthropogenic Impact]. Filatov N.N., Ed. Petrozavodsk: Karel. Nauchn. Tsentr RAN, 2015, pp. 10–19. (In Russ.).
- O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, no. 24, pp. 10773–10781.
- Petrov M.P. Thermal regime. In *Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniya* [Ecosystem of Lake Onego and Tendencies of its Change]. Leningrad: Nauka Publ., 1990, pp. 32–37. (In Russ.).
- Petrova N.A. Phytoplankton of Lake Onego. *Rastitel'nyi mir Onezhskogo ozera* [The Vegetation of Lake Onego]. Leningrad: Nauka Publ., 1971, pp. 88–127. (In Russ.).
- Reid P.C., Hari R.E., Beaugrand G. et al. Global impacts of the 1980s regime shift. *Glob. Change Biol.*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 682–703.
- Robertson D.M., Ragotzkie R.A., Magnuson J.J. Lake ice records used to detect historical and future climatic changes. *Clim. Change*, 1992, vol. 21, no. 4, pp. 407–427.
- Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Zdorovenov R.E., Markarova E.M. Results of the study of the ecosystem of Lake Onego during the period of summer stratification according to the 2017 expedition data. *Tr. Karel. Nauchn. Tsentra RAN. Ser. Limnol., Okeanol.*, 2018, no. 9, pp. 44–53. (In Russ.).
- Tekanova E.V., Syarki M.T. Features of the phenology of the primary production process in the pelagic zone of Lake Onego. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Biol.*, 2015, no. 6, pp. 661–667 (In Russ.).
- Timakova T.M., Tekanova E.V. Characterization of the processes of primary production of organic matter. In *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy* [Lake Onego. Ecological Problems]. Petrozavodsk: Karel. Nauchn. Tsentr RAN, 1999, pp. 158–174. (In Russ.).
- Vislyanskaya I.G. Phytoplankton. In *Ekosistema Onezhskogo ozera i tendentsii ee izmeneniya* [Ecosystem of Lake Onego and Tendencies of its Change]. Leningrad: Nauka Publ., 1990, pp. 183–192. (In Russ.).
- Woolway R.I., Dokulil M.T., Marszelewski W., Schmid M., Bouffard D., Merchant C.J. Warming of Central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Climat. Change*, 2017, vol. 142, nos. 3–4, pp. 505–520.