

---

---

**ФИТОПЛАНКТОН,  
ФИТОБЕНТОС, ФИТОПЕРИФИТОН**

---

---

УДК 574.522

**ОСОБЕННОСТИ МЕТАБОЛИЗМА ПЛАНКТОНА:  
РЕЗУЛЬТАТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

© 2023 г. А. В. Гончаров<sup>а</sup>, \*, В. В. Пуклаков<sup>а</sup>, М. Г. Гречушникова<sup>а</sup>, Н. М. Юмина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: tana15333@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2021 г.

После доработки 23.06.2022 г.

Принята к публикации 27.06.2022 г.

Метаболизм планктона определяет кислородный режим водоема, его экологическое состояние, обмен CO<sub>2</sub> с атмосферой. Нами использовано автоматизированное устройство, которое позволило провести массовые измерения внутрисуточных значений валовой первичной продукции (ВП) и дыхания (Д) планктона. В работе на Можайском водохранилище летом 2017 г. выявлен важный факт: максимумы ВП существенно опережают таковые Д в дневное время. Это объясняется тем, что ВП связана с солнечной радиацией (максимум в середине дня), а Д – с температурой воды (максимум во второй половине дня). Соответственно, наибольшее содержание растворенного кислорода наблюдается во второй половине дня, когда ВП и Д уравниваются. Рассматриваемый метод может использоваться для непрерывного мониторинга метаболизма планктона и его реакции на различные гидрометеорологические, гидрохимические и антропогенные факторы.

*Ключевые слова:* первичная продукция, дыхание планктона, растворенный кислород, температура воды, солнечная радиация, изменение погоды, Можайское водохранилище, автоматизированные измерения

**DOI:** 10.31857/S0320965223010060, **EDN:** KSGSFO

## ВВЕДЕНИЕ

Первичная продукция и дыхание, составляющие метаболизм сообщества, определяют особенности функционирования, а также состав и структуру различных экосистем (Odum, 1983; Wetzel, 2001). Существует множество методов изучения метаболизма планктона; каждый из них имеет свои достоинства и недостатки (Винберг, 1960; Wetzel, Likens, 2000; Staehr et al., 2011; Vinçon-Leite, Casenave, 2019). Например, в широко известном скляночном радиоуглеродном методе определения первичной продукции фитопланктона часть вносимого изотопа C-14 может использоваться фитопланктоном повторно, занижая результат (Williams et al., 2002). Исследования метаболизма планктона по суточному ходу кислорода в водоеме осложняется вертикальным перемешиванием водной массы и обменом кислорода с атмосферой (McNair et al., 2015).

Имеющиеся подходы и методы нацелены, как правило, на определение ВП и Д за достаточно

длительные промежутки времени – сутки, месяцы, сезоны. При рассмотрении внутрисуточных изменений возникают методические проблемы: обычный кислородный скляночный метод слишком трудоемок для проведения постоянных круглосуточных наблюдений (Depew et al., 2006, Минеева и др., 2016). Исследование суточного хода кислорода, измеряемого непосредственно в водоеме с помощью логгеров O<sub>2</sub>, дает возможность оценивать короткопериодические (например, почасовые) изменения чистой первичной продукции днем и дыхания сообщества ночью (Staehr et al., 2010; La-Buhn, Klump, 2016). Однако получить почасовые изменения таких основных параметров, как ВП и Д, при этом не удается (Hanson et al., 2008).

Суточные или месячные изменения метаболизма планктона состоят из короткопериодических внутрисуточных изменений, которые постоянно происходят в водоемах при изменении гидрометеорологических условий – солнечной радиации, температуры, ветра, атмосферных осадков. Чтобы восполнить имеющийся пробел в методах изучения метаболизма планктона, нами была разработана автоматизированная установка, позволяющая круглосуточно измерять ЧП, Д и определять

---

**Сокращения:** ВП – валовая первичная продукция, Д – дыхание планктонного сообщества, ФАР – фотосинтетическая активная солнечная радиация, ЧП – чистая первичная продукция.

ВП в водоеме (Гончаров и др., 2018). С помощью такой установки нами проведены исследования на Можайском водохранилище – с целью изучить метаболизм планктона при краткосрочных изменениях гидрометеорологических условий.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работу проводили в августе 2017 г. на Можайском водохранилище, расположенном в 100 км к северо-западу от г. Москвы и служащим одним из источников водоснабжения столицы. Длина водоема 28 км, площадь 30.7 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 7 м, у плотины – до 22 м, водообмен ~2 раза за год. Водоем хорошо изучен (Goncharov, 2007; Belova, Kremenetskaya, 2010; Пуклаков и др., 2015), характеризуется высокой биологической продуктивностью с концентрацией хлорофилла *a* 13–67 мкг/л, биомассой фитопланктона в период массового развития водорослей ~5–10 мг/л, ВП ~1 г С/(м<sup>2</sup> · сут). Концентрация фосфора фосфатов – 0.01–0.54 Р мг/л. В летний период водохранилище стратифицировано, при этом в гипolimнионе ежегодно наблюдается аноксия, однако в поверхностном слое содержание кислорода может значительно превышать 100% насыщения. Прозрачность воды по диску Секки летом обычно 1–2 м.

Для регистрации внутрисуточных значений ВП и Д нами разработана автоматизированная производственная установка, описанная ранее (Гончаров и др., 2018). В основе ее работы лежит кислородный скляночный метод, в котором автоматизирована смена воды и измерение растворенного кислорода. Вода в сосудах менялась каждые 3 ч, кислород измеряли каждые 15 мин. Разность последовательно измеренных значений кислорода в темном сосуде представляет собой Д, аналогичная разница в светлом сосуде – ЧП. Сумма Д и ЧП равна ВП. Следует учитывать, что дыхание в темноте и на свету неодинаковы, и это вносит некоторую неопределенность в ВП и Д. При анализе рассматривали часовые и трехчасовые значения показателей, полученные суммированием данных за 15-минутные интервалы.

Кроме того, каждый час регистрировали температуру воды на глубинах 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 14 м и ФАР – с помощью приборов фирмы Onset, США (<http://www.onsetcomp.com>). Продукциометр и основные приборы были установлены на плавучей платформе в середине Красновиловского плеса Можайского водохранилища (координаты 55°34.958' с.ш., 035°51.536' в.д.), сосуды располагались на глубине 0.5 м. Обслуживание продукциометра заключалось в еженедельной промывке сосудов.

При анализе изменений погоды использовали данные метеостанции г. Можайска, расположенной в 12 км от пункта наблюдений; проводили

единичные измерения концентрации фосфатов в воде методом Морфи-Райли<sup>1</sup>. Результаты наблюдений обрабатывали с помощью стандартных статистических программ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Гидрометеорологические условия.** По погодным условиям время наблюдений четко делится на два периода: антициклональный (с 12 по 21 августа при средних значениях атмосферного давления  $P_{\text{атм}}$  1000 гПа, температуры воздуха  $T_{\text{в}}$  20.4°C, скорости ветра  $W$  1.5 м/с, общей облачности  $N$  3 балла) и циклональный (с 22 по 31 августа при  $P_{\text{атм}}$  990 гПа,  $T_{\text{в}}$  14.4°C,  $W$  2.4 м/с,  $N$  8 баллов).

При антициклональном типе погоды суточная амплитуда изменений температуры воды в поверхностном слое достигала в среднем 1.4°C, при циклональном – почти не заметна на фоне общего плавного снижения температуры воды поверхностного слоя к концу периода до 18.2°C (рис. 1а).

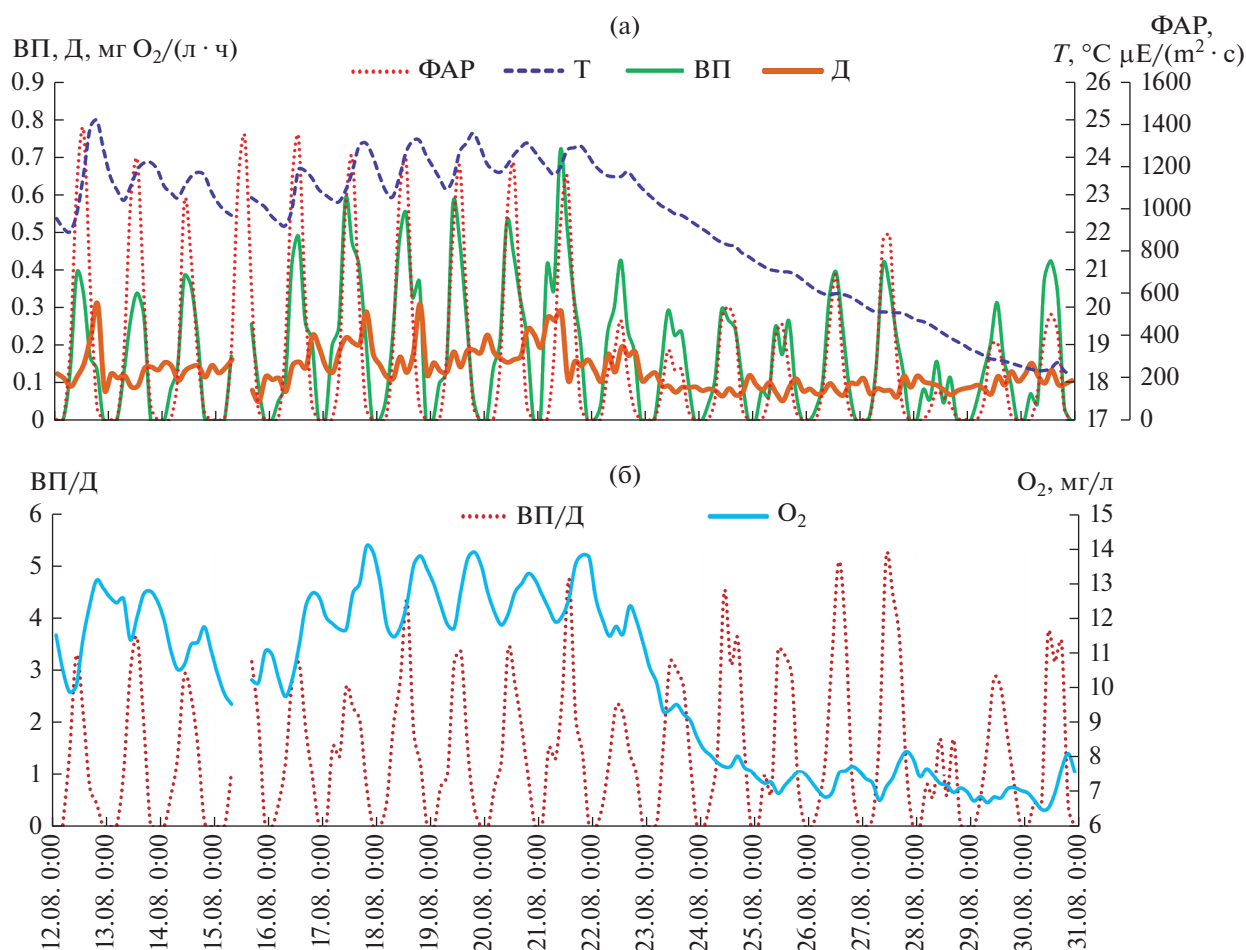
Режим поступления ФАР резко изменялся. В первый период среднесуточное поступление ФАР было достаточно стабильным (в среднем 438 мЕ/(м<sup>2</sup> · с)), максимум ФАР приходился на 12–13 ч и достигал 1541 мЕ/(м<sup>2</sup> · с). Во второй период при прохождении циклона с 22 по 31 августа среднее значения ФАР снизилось до 186 мЕ/(м<sup>2</sup> · с), максимум ФАР в большинстве случаев по-прежнему приходился на 12–13 ч, а его значения не превышали 1000 мЕ/(м<sup>2</sup> · с).

Такие различия погодных условий сказались не только на характеристиках поверхностного слоя воды, но и на вертикальной структуре водных масс, которая имеет существенное значение для протекающих в водоеме процессов продукции и дыхания. Во время антициклональной погоды наблюдали усиление вертикальной стратификации вод (рис. 2). Разность среднесуточных значений поверхностной и придонной температуры воды увеличилась с 7.1°C 12 августа до 7.6°C 21 августа. Сезонный слой скачка температуры располагался на глубине 7 м.

Приход циклона сопровождался усилением облачности до 10 баллов, скорости ветра до 4–5 м/с, выпадением атмосферных осадков. Это привело к быстрому охлаждению верхних слоев воды. К 30 августа в Красновиловском плесе сформировался почти однородный эпилимнион до глубины 10 м: разность поверхностной и придонной температуры воды уменьшилась до 1.8°C.

Результаты измерений 11 и 20 августа показали, что содержание фосфора фосфатов достигало 4–5 мкг Р/л у поверхности и 240–390 мкг Р/л у дна.

<sup>1</sup> РД 52.10.738–2010. Массовая концентрация фосфатов в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом. Москва: ФГБУ ГОИН

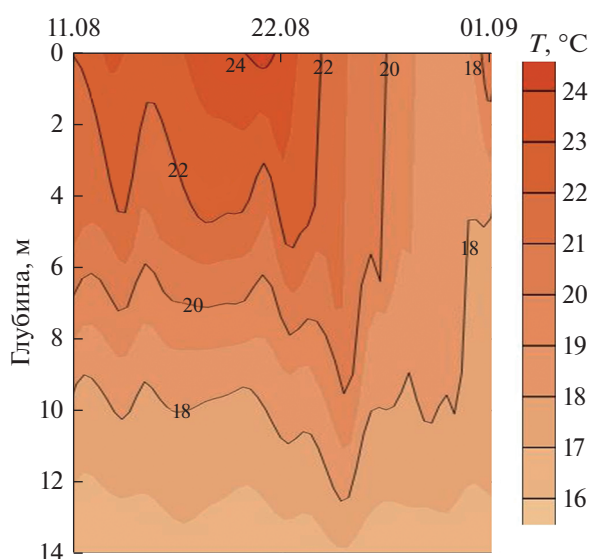


**Рис. 1.** Гидрометеорологические (а) и продукционно-биологические (б) показатели в поверхностном слое Можайского водохранилища в августе 2017 г.  $T$  – температура, ВП – валовая первичная продукция, Д – дыхание планктонного сообщества, ФАР – фотосинтетическая активная солнечная радиация;  $O_2$  – концентрация кислорода.

В конце второго периода (28 августа) концентрация у поверхности увеличилась до 20 мкг Р/л за счет перемешивания водной массы.

**Валовая первичная продукция и дыхание планктона.** Внутрисуточные изменения ВП и Д в водоеме представлены на рис. 1а. Видно, что в циклональный период продукция снижается в 1.5 раза по сравнению с таковой в антициклональный (табл. 1), дыхание тоже снижается в ~1.6 раза. Вместе с тем, во время похолодания в циклональный период (26, 27, 30 августа) наблюдали довольно высокие значения ВП, как и в начале антициклонального периода (рис. 1а). По-видимому, температура воды, в данном случае, не была решающим фактором продукционного процесса. Об этом свидетельствует и то, что максимумы ВП в антициклональный период не совпадают с таковыми температуры воды (рис. 1а). Они опережают температуру воды на несколько часов.

ВП тесно связана с ФАР (рис. 1а, табл. 2); коэффициент корреляции  $r = 0.85$  (табл. 2), однако



**Рис. 2.** Вертикальное распределение температуры воды ( $T$ ) в Можайском водохранилище в августе 2017 г.

**Таблица 1.** Средние значения показателей за антициклональный (I) и циклональный (II) периоды исследования и соотношение между ними в августе 2017 г. на Можайском водохранилище

Показатель	I (12.08–21.08)		II (22.08–31.08)		I/II
	среднее	$C_v$ , %	среднее	$C_v$ , %	
$T$ , °C	23.5	2	20.6	8	1.14
ВП, мг $O_2$ /(л · ч)	0.200	36	0.134	26	1.49
Д, мг $O_2$ /(л · ч)	0.158	19	0.099	23	1.60
ФАР, $\mu E/(m^2 \cdot c)$	438	11	186	44	2.35
Содержание $O_2$ , мг $O_2$ /л	12.01	8	8.03	21	1.50
ВП/Д	1.32	15	1.46	27	0.90

Примечание. Здесь и в табл. 2, ВП – валовая первичная продукция, Д – дыхание планктонного сообщества, ФАР – фотосинтетическая активная солнечная радиация,  $T$  – температура воды,  $O_2$  – растворенный кислород,  $C_v$  – коэффициент вариации.

связь ВП с температурой воды очень слабая ( $r = 0.22$ ). Максимумы температуры существенно отстают от таковых ФАР (рис. 1а). Причина этого в том, что максимум ФАР наблюдался в 12–13 ч, а температура воды достигала суточного максимума значительно позже, поскольку вода из-за высокой теплоемкости прогревается медленно (кроме того, температура воды зависит от факторов, влияющих на теплообмен с атмосферой и нижележащими слоями воды). Поэтому, когда во второй половине дня (~17 ч) температура воды достигает максимума, солнце уже садится и освещенность становится лимитирующим фактором продукционного процесса.

Выявлена умеренная корреляция ( $r = 0.59$ ) Д с температурой (табл. 2). Максимумы Д обычно наблюдаются позже таковых ВП и чаще совпадают с температурой (рис. 1а). Это дает основание утверждать, что не только температура и ФАР разнесены во времени, но и биологические процессы, которые от них зависят. Такое несовпадение во времени процессов выделения и поглощения кислорода может иметь очень существенное значение для кислородного и вообще гидрохимиче-

ского режима водоема. Дополнительной причиной временного несовпадения ВП и Д в течение суток может быть большая чувствительность гетеротрофных процессов (ответственных за Д) к изменению температуры, чем фотосинтетических (Минева, 2009). Это обусловлено различием ферментов в клеточных структурах, ответственных за протекание рассматриваемых процессов.

#### Растворенный кислород ( $O_2$ ) и отношение ВП/Д.

Отношение ВП/Д считается фундаментальным экосистемным параметром (Odum, 1983). При ВП/Д = 1 основные процессы в системе сбалансированы; ВП/Д > 1 свидетельствует о накоплении органического вещества, ВП/Д < 1 – о его расходовании, сопровождаемом, в частности, потреблением  $O_2$  и выделением  $CO_2$  в атмосферу (Hanson et al., 2004). Рассмотрением этого параметра в водоемах занимались разные исследователи (Derew et al., 2006; Hoellein et al., 2013). При этом речь шла о данных за сутки, месяцы, сезоны. Возможность проведения массовых внутрисуточных измерений появилась лишь благодаря разработанному нами автоматизированному методу (Гончаров др., 2018).

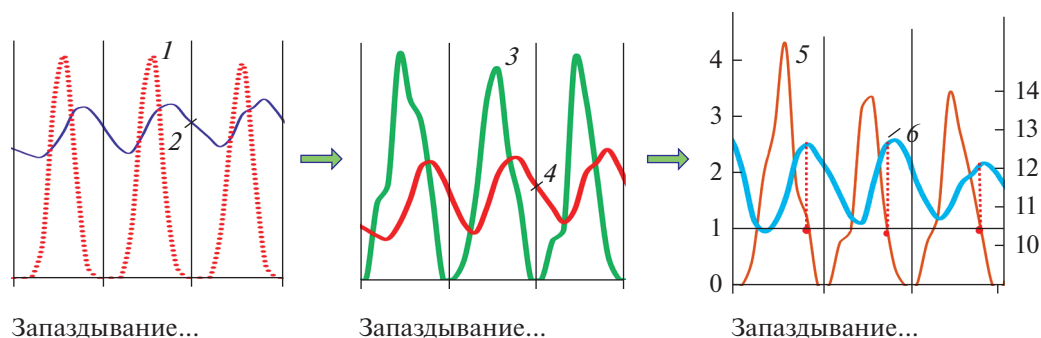
Внутрисуточные изменения отношения ВП/Д в поверхностном слое водоема представлены рис. 1б. Максимальные значения ВП/Д приходятся на середину дня. Этот показатель коррелирует с ВП и ФАР (табл. 2), поскольку в полдень продукция максимальна, а наибольшее дыхание наблюдается во второй половине дня. Средние суточные значения ВП/Д мало различаются в теплый и прохладный периоды (табл. 1). Это связано с тем, что первичная продукция во второй период активизируется, по нашему мнению, с увеличением содержания фосфатов у поверхности (с 4–5 до 20 мкг P/л из-за вертикального перемешивания воды), кроме того, при похолодании уменьшается Д.

Несколько неожиданны максимумы кислорода, приуроченные ко второй половине дня (рис. 1б) – предполагалось, они тоже должны

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между рассматриваемыми показателями по данным за каждые 3 ч в период с 12 по 30 августа 2017 г.

Показатель	ФАР	$T$	ВП	Д	ВП/Д	$O_2$
ФАР	1.00	–	–	–	–	–
$T$	0.23	1.00	–	–	–	–
ВП	0.85	0.22	1.00	–	–	–
Д	0.10*	0.59	0.30	1.00	–	–
ВП/Д	0.77	–0.03*	0.84	–0.15*	1.00	–
$O_2$	0.17	0.92	0.18	0.69	–0.12*	1.00

Примечание. Использовано 150 пар значений. Коэффициенты корреляции статистически достоверны при  $p = 0.05$ , кроме отмеченных\*.



**Рис. 3.** Схема связи метаболизма планктона с гидрометеорологическими показателями: 1 — ФАР,  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ ; 2 — температура воды,  $^{\circ}\text{C}$ ; 3 — ВП; 4 — Д,  $\text{мг O}_2/(\text{л} \cdot \text{ч})$ ; 5 — ВП/Д; 6 — содержание  $\text{O}_2$ ,  $\text{мг/л}$ . Сокращения см. рис. 1.

быть в полдень. Это особенно заметно в первый период (антициклональный) с очень слабым перемешиванием воды, когда выделяющийся в течение дня кислород накапливается (до 130–170% насыщения) в воде и лишь в малой степени уходит в атмосферу и нижележащие слои водоема. Действительно, как показывает расчет, разность между измеренной чистой первичной продукцией днем и наблюдаемым ежедневным увеличением  $\text{O}_2$ , в среднем за первый период достигает лишь  $0.021 \text{ мг O}_2/(\text{л} \cdot \text{ч})$ . Это тот кислород, который уходит в атмосферу или в нижележащие слои, и он не может оказать существенного влияния на концентрацию  $\text{O}_2$  в изучаемом поверхностном горизонте водоема.

Сходный характер суточного изменения  $\text{O}_2$  с максимумом во второй половине дня наблюдался в датском оз. Фредериксборг в конце июня 2004 г. (Staehr, Sand-Jensen, 2007). Аналогичные изменения кислорода отмечены летом в Форелевом и Кристальном озерах в штате Винконсин (Hanson et al., 2008). По нашим данным, представленным на рис. 16, такая ситуация объясняется возрастанием концентрации кислорода днем до тех пор, пока  $\text{ВП} > \text{Д}$ . Как только  $\text{ВП}/\text{Д}$  станет  $< 1$ , потребление кислорода превысит его выделение, и концентрация газа начнет снижаться. Рассматриваемая особенность также видна в табл. 2, где содержание кислорода коррелирует с температурой воды и Д и почти не связано с ВП и ФАР.

Однако во второй (циклональный) период процессы ВП и Д оказывают меньшее влияние на газовый состав воды, поскольку происходит интенсивное перемешивание водной массы, и богатые кислородом поверхностные воды уходят вниз. Расчет, аналогичный приведенному выше, показывает, что поток кислорода, который уходит в нижележащие слои водоема или в атмосферу, в этот период днем составляет в среднем  $0.087 \text{ мг O}_2/(\text{л} \cdot \text{ч})$ , т.е. в ~4 раза больше, чем в первый период. Особенно сильное снижение концен-

трации кислорода было 22–23 августа (рис. 16), когда поток кислорода достигал  $0.186 \text{ мг O}_2/(\text{л} \cdot \text{ч})$ .

**Метаболизм планктона и изменение гидрометеорологических условий.** Изученная связь между метаболизмом планктона и гидрометеорологическими условиями может быть показана в виде схемы (рис. 3). Отставание максимума температуры воды от максимума солнечной радиации, в течение суток, приводит к соответствующему смещению пиков ВП и Д, которые зависят от них. Превышение ВП над Д в течение дня влечет за собой возрастание концентрации растворенного кислорода, содержание которого начинает снижаться только к вечеру, когда ВП и Д уравниваются.

По-видимому, в других условиях, например при сильном охлаждении и перемешивании водной массы водохранилища осенью, может наблюдаться несколько иной отклик метаболизма планктона.

Представляет интерес также сопоставление внутрисуточных и сезонных изменений метаболизма планктона. В.Г. Девяткин с соавт. (Девяткин и др., 2000, 2012) при изучении Рыбинского водохранилища отмечали, что максимум солнечной радиации в течение года наступает значительно раньше, чем максимум температуры воды. При этом существенного расхождения во времени фотосинтеза и дыхания не происходит — оба параметра коррелируют с температурой воды, и их максимумы наблюдаются в середине лета.

По-видимому, причиной такого отличия от полученных нами результатов является то, что в сезонном аспекте большую роль играют дополнительные факторы — биогенные элементы и биотические взаимодействия, которые в течение суток изменяются мало. Кроме того, влияние солнечной радиации на фотосинтез в рассматриваемые временные интервалы совершенно различно. Это связано с тем, что в течение суток освещенность меняется очень резко (от 0 до  $1500 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$  в нашем исследовании), однако в течение вегетационного сезона изменение среднесуточных значений освещенности происходит плавно (от 50 до

600  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ ), а для большей части сезона – еще меньше (Девяткин и др., 2012).

**Выводы.** Выявлено существенное отставание максимума дыхания сообщества днем по сравнению с первичной продукцией, вызванное соответствующим расхождением суточного хода солнечной радиации и температуры воды. Это приводит к смещению максимальных концентраций растворенного кислорода на конец дня. Ухудшение погоды, при котором ФАР уменьшилось в 2.4 раза, а температура воды – почти на 3°C, привело к уменьшению ВП, Д и  $\text{O}_2$  в ~1.5 раза. Концентрация кислорода снизилась из-за подъема глубинных вод, содержащих малое количество этого газа. Использованное автоматизированное устройство может применяться для непрерывного мониторинга состояния водных объектов, при изучении газообмена в системе водоем–атмосфера.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках научно-исследовательских работ кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (тема ГЗ I.10, ЦИТИС: 121051400038-1).

Подготовка статьи выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Винберг Г.Г. 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.
- Девяткин В.Г., Метелева Н.Ю., Митропольская И.В. 2000. Гидрофизические факторы продуктивности литорального фитопланктона: корреляционные связи между гидрофизическими факторами и продуктивностью фито планктона // Биология внутр. вод. № 3. С. 42.
- Гончаров А.В., Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В. 2018. Новые возможности классического метода: автоматизированное определение первичной продукции и деструкции органического вещества в водоеме // Биология внутр. вод. № 4. С. 107. <https://doi.org/10.1134/S0320965218040083>
- Девяткин В.Г., Метелева Н.Ю., Вайновский П.А. 2012. О роли фитопланктона в формировании кислородного режима водоема в связи с климатическими вариациями. Вода: Химия и экология. № 12. С. 68.
- Минеева Н.М. 2009. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус.
- Минеева Н.М., Корнева Л.Г., Соловьева В.В. 2016. Фотосинтетическая активность фитопланктона водохранилищ р. Волги // Биология внутр. вод. № 2. С. 11. <https://doi.org/10.7868/S0320965216020121>
- Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Гончаров А.В. и др. 2015. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз). Москва: Изд-во “Перо”.
- Belova S.L., Kremenetskaya E.R. 2010. The effect of water level variations on production destruction processes in the Mozhaik reservoir // Water Res. V. 34. № 1. P. 70. <https://doi.org/10.1134/S0097807810060060>
- Depew D., Smith R., Guildford S., 2006. Production and Respiration in Lake Erie Plankton Communities // J. Great Lakes Res. V. 32. Issue 4. P. 817.
- Goncharov A.V. 2007. Comparison of reservoirs in the Moskva-Vazuza water system in terms of phytoplankton abundance and eutrophication degree // Water Res. V. 34. № 1. P. 78. <https://doi.org/10.1134/S0097807807010071>
- Hanson P.C., Pollard D.L., Bade K. et al. 2004. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes // Global Change Biol. V. 10. P. 1285. <https://doi.org/10.1111/J.1529-8817.2003.00805.X>
- Hanson P.C., Carpenter S.R., Kimura N. et al. 2008. Evaluation of metabolism models for free-water dissolved oxygen methods in lakes // Limnol., Oceanogr. Methods 6: P. 454. <https://doi.org/10.4319/lom.2008.6.454>
- Hoellein T.J., Bruesewitz D.A., Richardson D.C. 2013. Revisiting Odum (1956): A synthesis of aquatic ecosystem metabolism // Limnol., Oceanogr. V. 58. № 6. P. 2089. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.6.2089>
- LaBuhn S., Klump J.V. 2016. Estimating summertime epilimnetic primary production via in situ monitoring in a eutrophic freshwater embayment, Green Bay, Lake Michigan // Journal of Great Lakes Research. V. 42. Issue 5. P. 1026. <https://doi.org/10.1016/J.JGLR.2016.07.028>
- McNair J., Sesselmann M., Kendall S. et al. 2015. Alternative approaches for estimating components of lake metabolism using the free-water dissolved-oxygen (FWDO) method // Fundamental and Applied Limnology. V. 186 (1–2). P. 21. <https://doi.org/10.1127/fal/2015/0626>
- Odum E.P. 1983. Basic ecology. USA: Philadelphia Saunders College Publ.
- Staehr P.A., Sand-Jensen K. 2007. Temporal dynamics and regulation of lake metabolism // Limnol., Oceanogr. V. 52 (1). P. 108. <https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.1.0108>
- Staehr P.A., Bade D., Van de Bogert M.C. et al. 2010. Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science // Limnol., Oceanogr. Methods 8. P. 628. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.0628>
- Staehr P.A., Testa J.M., Kemp W.M. et al. 2011. The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges // Aquat. Sci. V. 74. P. 15. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0199-2>
- Vinçon-Leite B., Casenave C. 2019. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review // Science of The Total Environment. V. 651. Part 2. P. 2985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.320>
- Wetzel R.G. 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. San Diego: Acad. Press.
- Wetzel R.G., Likens G.E. 2000. Limnological analyses. New York: Springer.
- Williams P., Jle B., Thomas D.N., Reynolds C.S. 2002. Phytoplankton Productivity. Carbon assimilation in marine and freshwater ecosystems. Oxford: Blackwell Science.

## Features of Plankton Metabolism: Results of Automated Measurements in the Mozhaisk Reservoir

A. V. Goncharov<sup>1</sup>, \*, V. V. Puklakov<sup>1</sup>, M. G. Grechushnikova<sup>1</sup>, and N. M. Yumina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*\*e-mail: mama15333@mail.ru*

Plankton metabolism determines fluctuations in the oxygen concentrations of a water body, its ecological condition, and exchange of CO<sub>2</sub> with the atmosphere. We used an automated device that allowed us to make mass measurements of intraday values of the gross primary production (GPP) and respiration (R) of plankton. During our studies of the Mozhaisk reservoir (Russia) in the summer of 2017, we established an important fact: the maximum values of GPP are observed essentially earlier in the daytime than those of R. This is explained by the fact that GPP is related to solar radiation (the maximum values are observed at noon), whereas R is related to the temperature of water, which reaches its maximum several hours after in the afternoon. As a result, the maximum value of dissolved oxygen is observed in the second half of the day, when GPP and R become even. The device we have designed may be used for continuous monitoring of metabolism of plankton and of its responses to various hydrometeorological, hydrochemical and anthropogenic impacts.

*Keywords:* primary production, respiration of plankton, intraday changes, automated measurement, dissolved oxygen, Mozhaisk reservoir