

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ*

На основании анализа данных измерений 2013–2014 гг. рассматривается пространственно-временная изменчивость потока фотосинтетически активной солнечной радиации в водной толще небольшого мелководного карельского озера в начале лета. Рассмотрены особенности распределения температуры водной толщи озера на этапе освобождения озера ото льда и формирования сезонного термоклина. Распределение коэффициента экстинкции по вертикали характеризовалось максимальными значениями в поверхностном слое озера и практически постоянными значениями, близкими к единице, глубже 1–1,5 м. Максимальные значения коэффициента наблюдались в поверхностном метровом слое водной массы озера в мае (1,9–2,1 м⁻¹) и июне (1,5–1,75 м⁻¹) 2013 г., когда прозрачность водной толщи была минимальной. Глубже 1,5 м значения k_w изменялись в пределах от 0,9 до 1,25 м⁻¹.

Ключевые слова:

коэффициент экстинкции, мелководное озеро, фотосинтетически активная радиация.

Гавриленко Г.Г., Здорovenнова Г.Э., Здорovenнов Р.Э., Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Тержевик А.Ю. Пространственно-временная изменчивость потока фотосинтетически активной солнечной радиации в мелководном озере в период открытой воды // Общество. Среда. Развитие. – 2015, № 3. – С. 186–192.

- © Гавриленко Галина Геннадиевна – аспирант, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск; e-mail: south.sun.cr@gmail.com
- © Здорovenнова Галина Эдуардовна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск; e-mail: south.sun.cr@gmail.com
- © Здорovenнов Роман Эдуардович – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск; e-mail: south.sun.cr@gmail.com
- © Пальшин Николай Иннокентьевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск; e-mail: south.sun.cr@gmail.com
- © Ефремова Татьяна Владимировна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск; e-mail: south.sun.cr@gmail.com
- © Тержевик Аркадий Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией гидрофизики, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск; e-mail: south.sun.cr@gmail.com

Солнечная радиация, проникающая непосредственно в водную толщу озер, является одним из важнейших факторов, регулирующих функционирование озерной экосистемы. Распределение фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) с диапазоном длины волны от 400 до 700 нм в водной толще водоемов определяет активность планктонного сообщества и представляет особый интерес в экологических исследованиях. Понимание факторов, ограничивающих проникновение ФАР в водную толщу водоемов, необходимо для решения ряда экологических задач, таких, например, как прогноз начала весенней вспышки цветения фитопланктона в озере. Параметризация ослабления потока ФАР в водной толще мелководных озер остается актуальной задачей современной физической лимнологии.

В период открытой воды проникновение ФАР лимитируется, главным образом, прозрачностью воды. Степень ослабления потока солнечной радиации в среде можно охарактеризовать с помощью коэффициента ослабления (экстинкции). Значения коэффициента экстинкции, полученные в результате лабораторных или полевых измерений, позволяют рассчитывать значения ФАР на заданной глубине в водной толще по значениям на поверхности воды в предположении экспоненциального затухания света в среде. По оценкам, приведенным в работе [8, с. 140], коэффициент экстинкции разнотипных озер Финноскандии изменяется в пределах от 0,5 до 28 м⁻¹, при глубине диска Секки от 13 до 0,35 м.

В целях расширения существующих представлений о распределении света в водной толще мелководных бореальных озер в условиях открытой воды были про-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-05-00338_a, 14-05-91761_АФ_a, 14-05-00787_a).

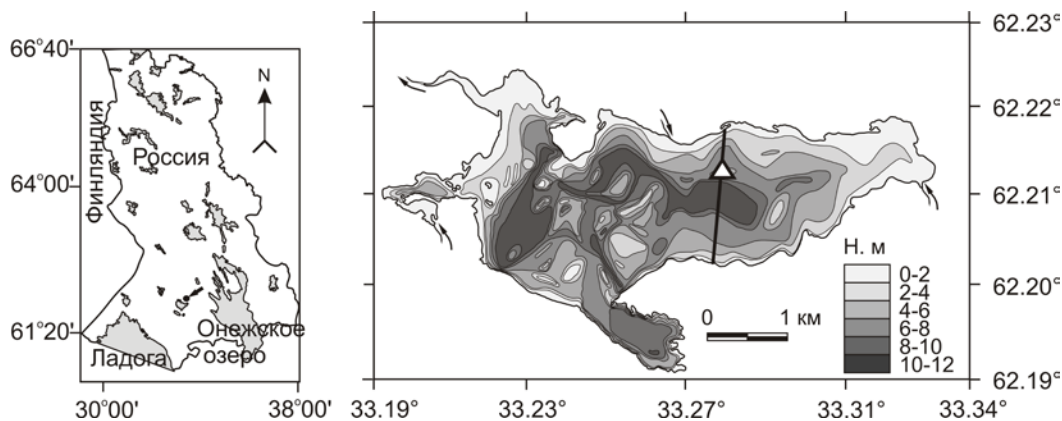


Рис. 1. Географическое положение озера Вендюрского, батиметрия озера и положение станции измерений (белый треугольник) и разреза.

ведены полевые измерения потоков ФАР в водной толще небольшого озера Вендюрского (Карелия, Россия). Задачей исследований было изучение пространственно-временной динамики потоков ФАР в водной толще и эволюции коэффициента экстинкции на этапе раннего лета. В этот период за счет роста биопродуктивности уменьшается прозрачность воды, определяющая степень прогрева водного столба и его стратификацию, и играющая, таким образом, существенную роль в формировании вертикального распределения таких важнейших экологических параметров, как температура воды и содержание растворенного кислорода.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования было выбрано оз. Вендюрское, расположенное в южной части Карелии (широта 62°10'–62°20'N, долгота 33°10'–33°20'E) (рис. 1). Физико-географическая характеристика озера, описание донных отложений и особенностей водообмена приведены в работе [4, с. 414].

В мае и июне 2013 и 2014 гг. на измерительной станции на глубине порядка семи метров вблизи северного берега оз. Вендюрского (рис. 1) проводилось измерение потоков ФАР в водной толще на разных глубинах. На заякоренный фал, подвешенный на бусе, через 0,5–1 м крепились датчики ФАР до глубины 7,2 м. Временной интервал измерений составлял одну минуту. Верхний датчик располагался на глубине 0,2–0,7 м. Для измерений были использованы датчики ФАР (длина волны 400–700 нм) производства фирмы «Alec Electronics», Япония, диапазон чувствительности которых находится в преде-

лах от 0 до 5000 $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, разрешение составляет 0,1 $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, точность $\pm 1\%$. Определение глубины диска Секки проводилось в мае и июне 2013 г. на 3–5 станциях разреза. Измерение температуры водной толщи выполнялось в период измерений ФАР в мае и июне 2013 и 2014 гг. с использованием зонда STD-90M («Sea & Sun Technology», Германия).

Коэффициент экстинкции рассчитывался по формуле:

$$k_w(z, z_1) = -\frac{1}{z_1 - z} \ln \left(\frac{E_d(z_1)}{E_d(z)} \right),$$

где z и z_1 – горизонты измерений, м, E_d – поток падающей радиации, $\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$.

В анализе климатических и синоптических условий района исследований использовались данные по одной из наиболее близких расположенных к оз. Вендюрскому метеостанций Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу природной среды – МС «Петрозаводск».

Результаты и выводы

Синоптические условия района исследований и температура водной массы озера Вендюрского в мае–июне 2013 и 2014 гг.

После освобождения ото льда водная масса озера некоторое время (порядка 1–3 недель) находится в состоянии, близком к гомотермии [3]. По мере радиационного прогрева температура поверхностных слоев водной массы озера увеличивается. Поскольку в районе исследований в мае нередко низкие ночные температуры, усиления ветра, похолодания продолжительностью в несколько дней, способствующие развитию конвективно-ветрового перемешивания, может происходить постепен-

188 ное выравнивание температуры водной массы.

Май–июнь 2013 г. Во второй–третьей декадах мая и первой половине июня преобладала прохладная ветреная погода, днем температура воздуха не поднималась выше $+20^{\circ}\text{C}$ (за исключением нескольких дней в конце мая, когда температура воздуха достигала $+25\text{--}28^{\circ}\text{C}$), ночью опускалась до $+4^{\circ}\text{C}$, восточный и северный ветер достигал $6\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Разрушение льда и освобождение акватории озера от плавающих льдин продолжалось в течение 1–3 мая 2013 г. Через несколько дней после освобождения ото льда температура воды в центральной части озера от поверхности до дна была однородна и не превышала $+4,2^{\circ}\text{C}$, у южного берега достигала $+4,7^{\circ}\text{C}$ и $+4,8^{\circ}\text{C}$ – у северного. В течение второй половины мая и июня происходило активное перемешивание водной толщи озера. Так, 17 июня водная толща озера находилась в состоянии гомотермии с температурой $+16\text{--}16,2^{\circ}\text{C}$, и только в придонном слое метровой толщины в центральной части озера температура резко уменьшалась до $+12^{\circ}\text{C}$. Градиент придонного термоклина достигал $7\text{--}9^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$.

Май–июнь 2014 г. Две температурные съемки были выполнены с интервалом в три недели: 19 мая и 11 июня 2014 г. В течение времени между двумя съемками погодные условия характеризовались существенной изменчивостью: 20–25 мая стояла жаркая погода, воздух днем прогревался до $+28\text{--}+32^{\circ}\text{C}$, ночью охлаждался до $+14\text{--}18^{\circ}\text{C}$. При этом поверхностные слои водной массы озера активно прогревались. Однако 27 мая наступило резкое похолодание, температура воздуха в течение дня понизилась до $+4\text{--}7^{\circ}\text{C}$, скорость северо-восточного ветра достигала $10\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, прошла гроза с ливнем. Затем в течение недели стояла холодная ветреная погода с дождями. В период с 4 по 11 июня стояла теплая, но ветреная погода (скорость ветра $3\text{--}5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$), температура воздуха днем поднималась до $+15\text{--}26^{\circ}\text{C}$, ночью опускалась до $+7\text{--}17^{\circ}\text{C}$. На момент проведения первой съемки (19 мая) была выявлена выраженная изменчивость температуры воды поверхностного 1,5-метрового слоя озера: вблизи северного берега температура достигала $+16,4^{\circ}\text{C}$, вблизи южного – $+10,5^{\circ}\text{C}$, в центральной части озера – $+12^{\circ}\text{C}$. Термоклин располагался на глубинах 1,5–2 м, градиент температуры достигал $4,5\text{--}6^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$. Глубже 6 м температура воды была однородна и не превышала $8,5^{\circ}\text{C}$. К началу второй декады июня температура поверхностного 0,5-

метрового слоя водной массы повысилась до $+18,5\text{--}20^{\circ}\text{C}$. Термоклин располагался на 0,5–1,5 м. Глубже 6 м температура воды была распределена равномерно и составляла около $+13^{\circ}\text{C}$.

Потоки ФАР в водной толще озера Вендюрского в период открытой воды в 2013–2014 гг.

Май 2013 г. Измерения прозрачности 8 мая 2013 г. на трех станциях разреза показали, что глубина диска Секки изменяется в пределах 2,5–2,8 м. Измерения ФАР проводились с 9 до 15 ч 8 мая 2013 г. в слое 0–3 м через 0,5 м, глубже до 6 м – через 1 м. Поток ФАР в поверхностном слое характеризовался резкими скачками интенсивности, изменяясь в пределах $500\text{--}3000\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, со средним значением $\sim 1500\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ (рис. 2, а). Интенсивность облучения быстро убывала с глубиной: на горизонте измерений 0,7 м поток ФАР не превышал $500\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, на 1,7 м был менее $100\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, глубже 3 м был близок к нулю.

Июнь 2013 г. Измерения глубины диска Секки на пяти станциях разреза, проведенные в июне 2013 г., показали, что прозрачность увеличилась почти на метр, по сравнению с майскими измерениями, и изменялась в пределах от 2,9 до 3,7 м. Измерения потоков ФАР в водной толще проводились с 10 ч утра 17 июня до 10 ч вечера 18 июня 2013 г. на глубинах 0,2–2,2 через 0,5 м, глубже до 7,2 м – через 1 м. Поток ФАР достигал $3000\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ в поверхностном слое озера. При часовом осреднении данных поток ФАР на глубине 1,7 м достигал $250\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, на глубине 3 м $100\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, глубже 4 м был близок к нулю (рис. 2, б).

Май 2014 г. Измерения потоков ФАР проводились с 20 ч 19 мая до 20 ч 21 мая 2014 г. до глубины 2 м через 0,5 м, глубже до 7 м – через 1 м. В поверхностном 0,5 м слое поток ФАР достигал $2000\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ (при часовом осреднении $950\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$), на горизонте 1 м – $750\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ (при часовом осреднении $450\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$), на горизонте 3 м – $90\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ (при часовом осреднении $60\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$), на 4 м – $35\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ (при часовом осреднении $20\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$) (рис. 2, в), глубже 5 м был близок к нулю.

Июнь 2014 г. Измерения потоков ФАР проводились с 16 ч 11 июня до 19 ч 15 июня на тех же горизонтах, что и в мае 2014 г. (рис. 2, г). Поток ФАР в поверхностном слое достигал $2500\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, на глубине 1 м не превышал $1000\text{ }\mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$. Прозрачность водной толщи стала больше:

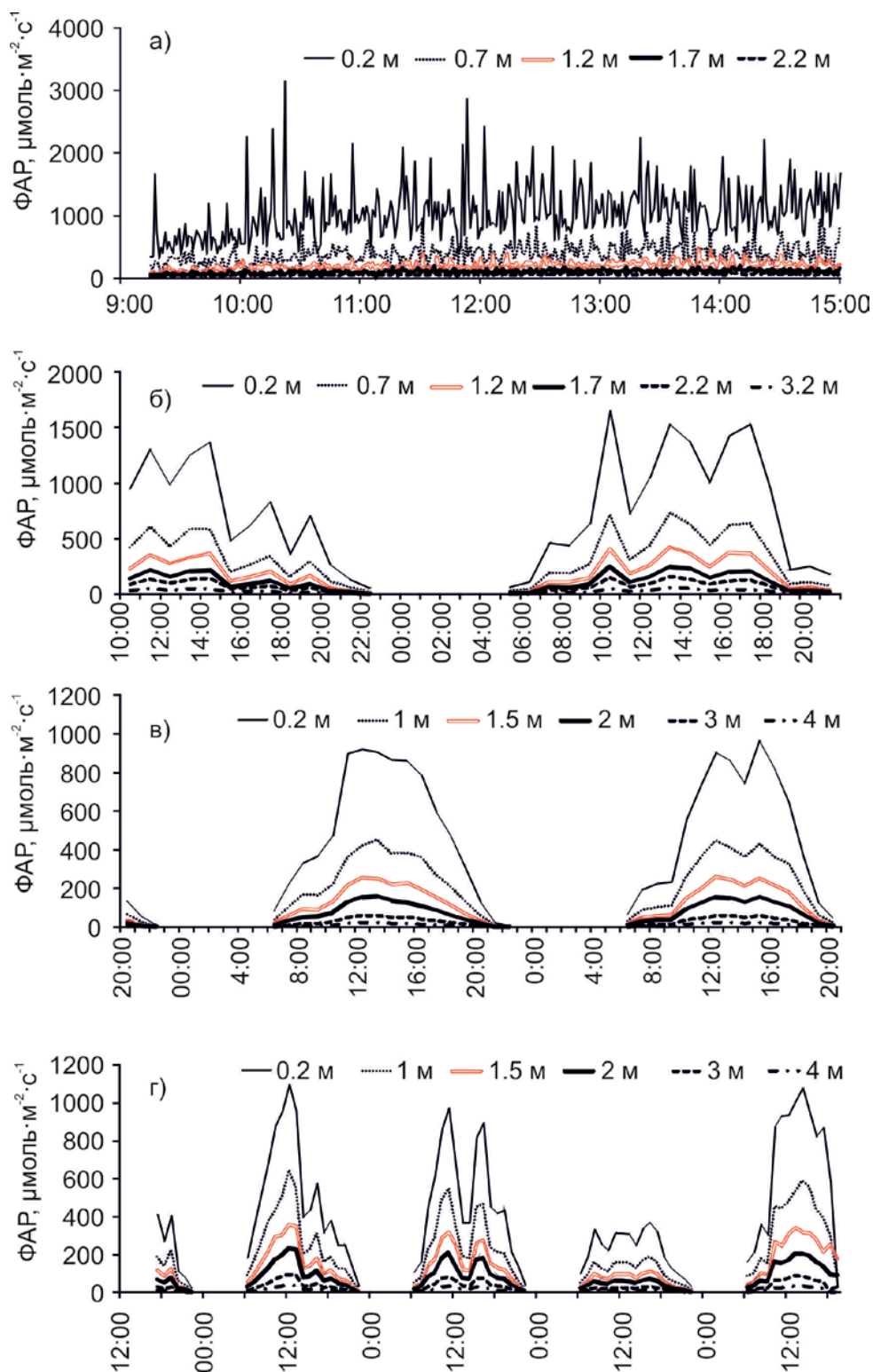


Рис. 2. Потоки ФАР на разных глубинах водной толщи озера Вендюрского: (а) – 8 мая 2013 г., (б) – 17–18 июня 2013 г., (в) – 19–21 мая 2014 г., (г) – 11–15 июня 2014 г. б–г – часовое осреднение данных.

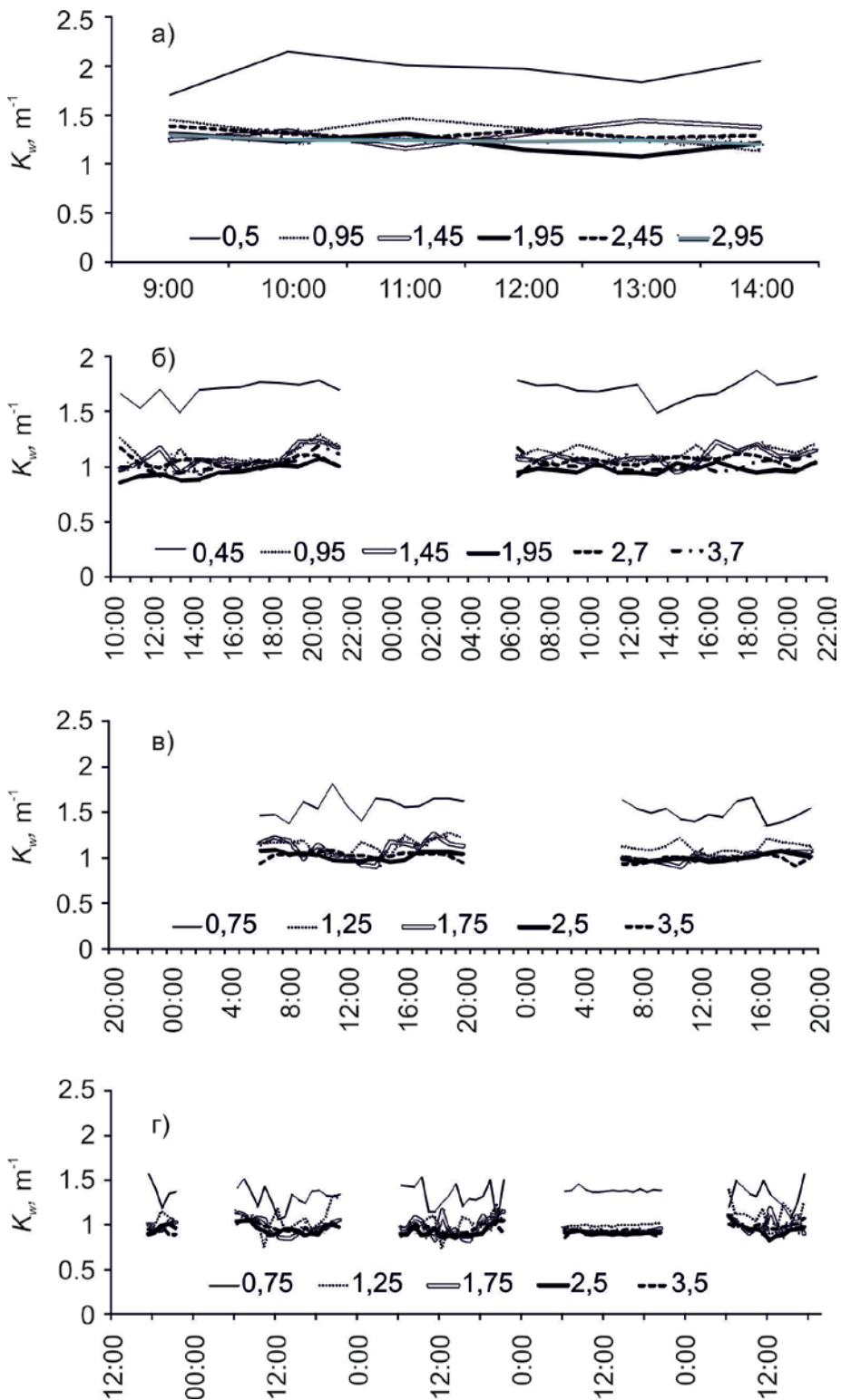


Рис. 3. Коэффициенты экстинкции (среднечасовые значения) на разных глубинах водной толщи озера Вендюрского: (а) – 8 мая 2013 г., (б) – 17–18 июня 2013 г., (в) – 19–21 мая 2014 г., (г) – 11–15 июня 2014 г. Числа – глубины наблюдений, м.

при среднечасовом осреднении поток ФАР достигал $150 \mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ на глубине 3 м, на 4 м – $75 \mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, на 5 м – $20 \mu\text{моль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, глубже был близок к нулю.

Коэффициент экстинкции. При расчетах коэффициента экстинкции использовались среднечасовые значения потоков ФАР на горизонтах наблюдений. Максимальные значения коэффициента k_w наблюдались в поверхностном метровом слое водной массы озера в мае ($1,9\text{--}2,1 \text{ м}^{-1}$) и июне ($1,5\text{--}1,75 \text{ м}^{-1}$) 2013 г., когда прозрачность водной толщи была минимальной (рис. 3а, б). В мае и июне 2014 г. в поверхностном слое значения k_w не превышали $1,35\text{--}1,5 \text{ м}^{-1}$ (рис. 3в, г). В мае 2014 г. и июне 2013 и 2014 гг. глубже $1,5 \text{ м}$ значения k_w изменялись в пределах от $0,9$ до $1,1 \text{ м}^{-1}$, в мае 2013 г. были немного больше и достигали $1,25 \text{ м}^{-1}$. Существенная изменчивость коэффициента экстинкции в течение дня была отмечена для всех периодов измерений в поверхностном $0,5\text{--}1 \text{ м}$ слое водного столба.

Распределение коэффициента экстинкции по вертикали характеризовалось максимальными значениями в поверхностном метровом слое озера и практически постоянными значениями, близкими к единице, глубже $1\text{--}1,5 \text{ м}$ (рис. 4). Какой либо зависимости вертикального распределения коэффициента экстинкции от температуры воды выявлено не было: наиболее резкий градиент коэффициента в поверхностном слое был обнаружен в мае и июне 2013 г., когда водная толща озера находилась в состоянии, близком к гомотермии. В то же время, наличие подповерхностного тер-

моклина на глубинах $0,5\text{--}2 \text{ м}$ в мае и июне 2014 г. не оказало заметного влияния на изменение коэффициента экстинкции по вертикали. Приповерхностный максимум коэффициента, по всей видимости, обусловлен скоплением клеток фитопланктона в наиболее благоприятном по условиям освещенности слое.

Изменения коэффициента экстинкции в период открытой воды происходят при изменении прозрачности. Вариации вертикального распределения прозрачности водных масс в период открытой воды определяются сезонным развитием планктона и количеством и перераспределением взвешенного и растворенного вещества, поступающего с водосбора. На примере ряда малых озер Забайкалья показано, что динамика прозрачности обусловлена сезонным развитием планктона и характеризуется максимумом после освобождения ото льда (на этапе перестройки видовой структуры фитопланктона и замены зимних видов на летние) и минимумом в конце лета (на фоне массового скопления водорослей в поверхностных слоях [2, с. 115–116]. Суточные миграции зоопланктона и выедание им фитопланктона также оказывают определенное влияние на изменение прозрачности поверхностных слоев водоемов [2, с. 118]. Измерения на малопрозрачном Алтайском озере Красиловском (глубина диска Секки около одного метра) показали существенную пространственную (между поверхностными и придонными слоями) и временную (внутрисуточную и межгодовую) изменчивость показателя

ослабления света в широком диапазоне от 5 до 10 м^{-1} , с выбросами в придонных слоях до $25\text{--}30 \text{ м}^{-1}$ [6, с. 66–67]. В ходе наших измерений также была отмечена как внутрисуточная, так и межгодовая изменчивость коэффициента экстинкции, максимальная в поверхностных слоях озера, и обусловленная, по всей видимости, вертикальным распределением планктона.

Исследования на ряде разнотипных озер юга Западной Сибири показали, что наибольший вклад (30–90%) в показатель

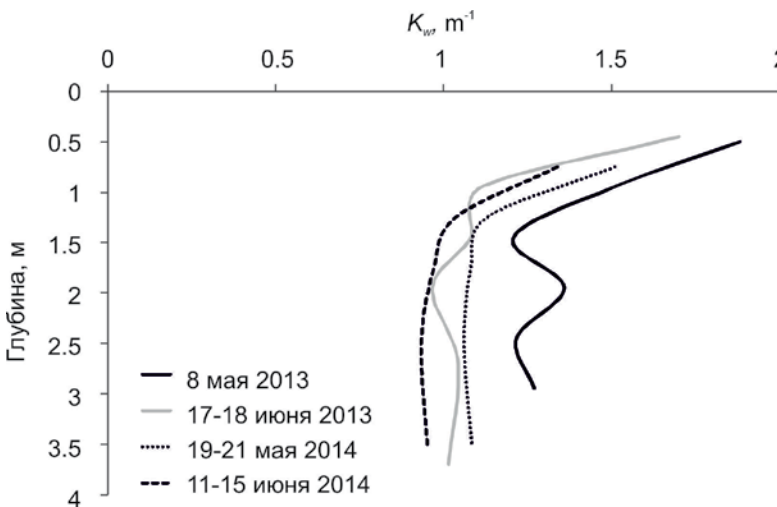


Рис. 4. Вертикальное распределение коэффициента экстинкции в водной толще озера Вендурского в период открытой воды в 2013–2014 гг. Осредненные за период измерений значения.

ослабления света летом вносит взвесь, в то время как вклад желтого вещества (6–40%) и хлорофилла (2–35%) заметно меньше [5, с. 62]. В то же время, авторами отмечен существенный рост доли вклада хлорофилла в показатель ослабления света летом по сравнению с зимой. Диапазон показателя ослабления света, определенный авторами для летнего периода (от 3,7 до 26,2 м⁻¹) [5, с. 62] существенно превосходит полученные нами значения, что связано, вероятно, с более высоким трофическим статусом водоемов и повышенным содержанием в них взвеси.

Измерения подводной облученности на озерах Вендюрской группы в начале 1980-х гг. показали, что осредненные по глубине значения показателя ослабления света для летнего периода составляют для центральной части озера Вендюрского 0,82 м⁻¹, для озера Риндозеро 2,07 м⁻¹, для озера Урос 0,41 м⁻¹ [7, с. 53]. Для периода открытой воды показатель ослабления потока солнечной радиации водной толщей озера Урос оценивается также в 0,81 м⁻¹ [1, с. 191].

Полученные нами для вод озера Вендюрского значения коэффициента экстинкции достаточно близки к этим оценкам.

Показатель ослабления солнечной радиации используется в математическом моделировании для решения широкого круга задач, в частности, для расчетов вертикального профиля температуры в моделях теплового бюджета перемешанного слоя [9; 10]. Проведенные нами измерения и анализ опубликованных данных исследований других озер позволяют говорить о высокой вариабельности показателя ослабления солнечной радиации в водной толще водоема в период открытой воды. Для получения статистически достоверных оценок показателя ослабления необходимо проведение длительных измерений с последующим осреднением значений. Использование рассчитанного по «мгновенному» профилю ФАР показателя ослабления может приводить к ошибкам в математическом моделировании, в частности, занижение этого показателя приводит к перегреву «нижних» слоев воды.

Список литературы:

- [1] Адаменко В.Н., Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В., Чехин Л.П. Радиационный режим и оптические свойства озер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 300 с.
- [2] Вологдин М.П. Гидрооптические особенности малых озер Забайкалья (на примере Ивано-Арахлейских). – Новосибирск: Наука, 1981. – 136 с.
- [3] Гавриленко Г.Г., Здоровеннова Г.Э., Здоровеннов Р.Э. Термический и кислородный режимы мелководного озера после взлома льда // География: традиции и инновации в науке и образовании. – СПб.: Изд-во РГПУ, 2014. – С. 142–144.
- [4] Гавриленко Г.Г., Здоровеннова Г.Э., Здоровеннов Р.Э., Пальшин Н.И., Тержевик А.Ю. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014, № 10 (1). – С. 414–421.
- [5] Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б. Спектральный вклад компонентов озерной воды в показатель ослабления света в разнотипных водоемах юга Западной Сибири // Изв. АлтГУ, серия «Физика». – 2015, № 1–1(85). – С. 59–63.
- [6] Суторихин И.А., Букатый В.И., Янковская У.И., Акулова О.Б. Суточная изменчивость спектрального показателя ослабления света в пресноводном водоеме (на примере оз. Красиловского) // Изв. АлтГУ, серия «Физика». – 2015, 1–1(85). – С. 64–69.
- [7] Чехин Л.П. Световой режим водоемов. – Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. – 130 с.
- [8] Arst H., Erm A., Herlevi A., Kutser T., Leppdranta M., Reinart A., Virta J. Optical properties of boreal lake water in Finland and Estonia // Boreal Env. Research. – 2008, №13. – P. 133–158.
- [9] Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J. & Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model // J. Geophys. Res. – 2002, № 107(C4). – С. 7-1–7-16.
- [10] Zaneveld J.R.V., Kitchen J.C. & Pak H. The influence of optical water type on the heating rate of a constant depth mixed layer // Journal of Geophysical Research. – 1981, № 86(C7). – С. 6426–6428.