

## ФИЗИКА

УДК 577.355:535.23

### Фотосинтетически активная солнечная радиация в Телецком озере в период открытой воды

О.Б. Акулова, В.И. Букатый, А.А. Вагнер, А.В. Дьяченко, А.А. Коломейцев,  
А.Т. Зиновьев

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

### Photosynthetic Active Solar Radiation in Lake Teletskoye During the Open Water Period

O.B. Akulova, V.I. Bukaty, A.A. Vagner, A.V. Dyachenko, A.A. Kolomeytsev,  
A.T. Zinoviev

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Barnaul, Russia)

На основании экспериментальных данных за 2016–2021 гг. рассматривается пространственно-временная изменчивость плотности потока фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) в воде крупного глубоководного олиготрофного озера Телецкое (Республика Алтай). В начале и конце периода летнего нагревания выполнено зондирование водной толщи озера с использованием датчика ФАР Satlantic PAR в составе CTD зонда SBE 25plus. На примере двух станций на водоеме в пелагиальной зоне рек Чулышман и Кокши соответственно показано, что величина ФАР монотонно убывает с увеличением глубины в озере и практически становится равна нулю в различные годы исследований на горизонтах от 3 до 14,8 м. В верхнем слое воды в период наблюдений значения плотности потока фотосинтетически активной солнечной радиации составили 27–1000 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с). В Телецком озере глубина фотической зоны (на уровне однопроцентной освещенности) на станции р. Чулышман достигала в солнечные дни 14,8 м, на станции р. Кокши — 11,7 м. По данным измерений ФАР оценены значения показателя ослабления (коэффициента экстинкции) по вертикали, которые в период исследования составили 0,1–2,6 м<sup>-1</sup>. Максимальные значения показателя ослабления наблюдались в поверхностном трехметровом слое озера в июне 2016 г. на станции р. Чулышман — 1,8–2,6 м<sup>-1</sup>, глубже 3 м величины изменялись в пределах от 0,1 до 1,9 м<sup>-1</sup>. На станции р. Кокши значения показателя ослабления изменялись в диапазоне от 0,1 до 1,6 м<sup>-1</sup>.

Spatial and temporal variability of flux density of photosynthetic active solar radiation (PAR) in the waters of large deep-water oligotrophic Lake Teletskoye (Republic of Altai) is considered based on the analyzed experimental data for the years 2016–2021. Probing of the lake water column was implemented using *Satlantic PAR sensor* as a part of *CTD* of the *SBE 25plus* probe at the beginning and the end of the summer heating period. During various years of studying, PAR magnitude monotonically decreased with lake depth increase and practically became zero at horizons from 3 to 14,8 m according to the data received from two weather stations at the reservoir, i.e. in the pelagic zone of rivers Chulyshman and Kokshi. Flux density of photosynthetic active solar radiation in the upper layer made up to 27–1000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  during the observation period. The photic depth zone (at one percent irradiation) in Lake Teletskoye at the Chulyshman station on sunny days reached 14.8 m, while at the Kokshi one — 11.7 m. According to PAR measurements, the attenuation coefficient (extinction coefficient) along the vertical was estimated as 0.1–2.6  $\text{m}^{-1}$ . The maximum weakening coefficient at the Chulyshman station was recorded in June 2016 in the surface 3-m layer of the lake (1.8–2.6  $\text{m}^{-1}$ ), while below 3 m it had values of 0.1–1.9  $\text{m}^{-1}$ . The attenuation coefficient varied within 0.1–1.6  $\text{m}^{-1}$  at the Kokshi station. Relative transparency of the Secchi white disk at the Chulyshman and Kokshi stations ranged within 1.3–5.3 and 2.4–6.5 m, respectively. The paper also presents vertical lake profiles of water temperature in June–July — characteristic of direct summer stratification of the reservoir.

Относительная прозрачность по белому диску Секки на исследуемых станциях варьировала в пределах от 1,3 до 5,3 м (станция р. Чулышман) и от 2,4 до 6,5 м (станция р. Кокши). Также приведены вертикальные профили температуры воды в июне-июле на озере, характерные для прямой летней стратификации водоема.

**Ключевые слова:** фотосинтетически активная радиация (ФАР), солнечная радиация, показатель ослабления, прозрачность, период открытой воды, крупное озеро.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-01

### Введение

Как известно [1, с. 6–23; 2, с. 159–168], поток фотосинтетически активной солнечной радиации является важнейшей физической характеристикой при рассмотрении процесса воздействия света на развитие гидробионтов в различных природных водоемах, влияя на их экологическое состояние. Плотность потока фотосинтетически активной солнечной радиации (сокращенно ФАР) представляет собой поток энергии фотонов в спектральном диапазоне от 400 до 700 нм, падающий на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности [2, с. 144]. Размерность величины ФАР в системе СИ — мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) или Вт/м<sup>2</sup>. Причем в диапазоне излучений, относимых к ФАР, географическая широта и высота солнца являются существенными факторами, которые определяют интенсивность потока излучений, падающего в водную среду [3]. Это позволяет использовать для расчета ФАР суммарную энергию солнечного излучения в вышеуказанной области спектра при переводном коэффициенте 0,46 [4]. На поверхности воды ФАР составляет около 40 % от общей приходящей солнечной энергии, ее потери на отражение — около 10 % [5, с. 45].

В период открытой воды распределение ФАР по глубине водоема зависит главным образом от прозрачности воды. Так, с помощью показателя ослабления (коэффициента экстинкции)  $k_w$ , который обычно измеряется в обратных метрах (м<sup>-1</sup>), можно охарактеризовать степень ослабления потока солнечной радиации  $E_d$  в исследуемой водной среде, в том числе и послойно. По оценкам, представленным в работе [6, с. 190], распределение коэффициента экстинкции по вертикали мелководного карельского мезотрофного озера Вендюрское характеризовалось максимальными значениями  $k_w$  в его поверхностном слое и практически постоянными значениями, близкими к единице, глубже 1–1,5 м. Максимальные значения  $k_w$  наблюдались в поверхностном метровом слое водной массы озера в мае (1,9–2,1 м<sup>-1</sup>) и июне (1,5–1,75 м<sup>-1</sup>) 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<sup>-1</sup>. В работе [7, с. 140] коэффициент экстинкции разнотипных озер Эстонии изме-

**Key words:** photosynthetic active radiation (PAR), solar radiation, attenuation coefficient, transparency, open water period, large lakes.

нялся в пределах от 0,5 (озеро Äntu Sinijärv) до 28 м<sup>-1</sup> (озеро Narku) при относительной прозрачности по диску Секки от 13 до 0,35 м. В другой работе [8, с. 51, 52] представлены результаты  $k_w$  для неэвтрофированных озер умеренной климатической зоны, где величина коэффициента экстинкции изменялась в пределах 0,1–5,6 м<sup>-1</sup>. Так, например, для двух североамериканских озер Pend Oreille (штат Айдахо) и Castle (Калифорния) значения  $k_w$  составили 0,1 м<sup>-1</sup>, для канадских озер — York University и Louise — 2,6 м<sup>-1</sup> и 5,6 м<sup>-1</sup> соответственно.

Таким образом, в целях расширения существующих представлений о распределении света в глубоководном водоеме в условиях открытой воды нами были проведены полевые измерения ФАР в воде крупного озера Телецкое (Республика Алтай, Россия). Задачей исследований было изучение пространственно-временной изменчивости плотности потока ФАР и показателя ослабления света водой в период летнего нагревания.

### Материалы исследования

В качестве объекта исследования было выбрано озеро Телецкое, расположенное в северо-восточной части Горного Алтая на высоте 434 м над уровнем моря [9, с. 65]. Телецкое озеро — пресноводный, слабоминерализованный, богатый кислородом, холодноводный, проточный горный водоем со снеговым, дождевым и подземным питанием. Основные морфометрические характеристики: длина — 77,8 км, ширина — 0,6–5,2 км, площадь акватории — 223 км<sup>2</sup>, объем — 41,1 км<sup>3</sup>, наибольшая глубина — 323 м, средняя глубина — 174 м, площадь водосбора — 19500 км<sup>2</sup>. В озеро впадает 70 рек и около 150 временных водотоков, но более 70 % всей поступающей воды дает река Чулышман [10, с. 15, 16; 11, с. 91]. Как известно [12, с. 139], наиболее уязвимы к внешнему воздействию экосистемы холодноводных олиготрофных озер. Невысокий уровень развития гидробионтов в подобных водоемах определяет низкий потенциал биологического самоочищения для поступающих с водосбора взвешенных, слаборастворимых и раство-

ренных в воде веществ, которые могут существенно изменять интенсивность внутриводоемных процессов и качество воды. Это определяет необходимость организации режимных долгосрочных наблюдений на озере, а также должно учитываться при разработке программы экологического мониторинга. По классификации Хатчинсона Телецкое озеро относится к димиктическим (двукратно перемешивающимся) водоемам умеренной полосы, которым свойственны весенняя гомотермия с перемешиванием водной массы, летняя прямая температурная стратификация, осенняя гомотермия, второе перемешивание вод за год, зимняя обратная температурная стратификация [13]. В изменении в течение года температурной стратификации Телецкого озера можно выделить четыре гидрологических периода, а именно: весеннее

и летнее нагревание, осеннее охлаждение и зимний минимум [14, с. 87].

Накопленные данные летних натуральных исследований на озере Телецком в 2016–2021 гг. послужили основой для изучения пространственно-временной изменчивости плотности потоков фотосинтетически активной радиации и динамики показателя ослабления на водоеме. Координаты станций измерений и отбора водных проб подробно представлены в работе [15, с. 20]. Исследования на озере проводились в конце июня (2016, 2018 и 2020 г.), июля (2017, 2019 и 2021 г.), когда для водоема характерна устойчивая прямая летняя стратификация.

В таблице приведены характеристики использованных приборов с указанием диапазона, погрешности и разрешения.

Характеристики использованных приборов

Прибор	Параметр	Частота сбора данных	Диапазон	Погрешность	Разрешение
Датчик ФАР Satlantic PAR в составе CTD зонда SBE 25plus	ФАР, мкмоль/(м <sup>2</sup> ·с)	16 Гц	0.1–5000	±0.5%	0.1
Датчик температуры SBE 3F в составе CTD зонда SBE 25plus	Температура, °С	16 Гц	–5 — +35	±0.002	0.003

### Результаты исследования

Измерения плотности потока фотосинтетически активной солнечной радиации проводились в разные даты летних месяцев 2016–2021 гг.

Экспериментальные данные на примере двух станций: 002 — пелагиаль р. Чулышман (N 51.377979°, E 87.785950°) и 021 — пелагиаль р. Кокши (N 51.566719°, E 87.667690°) представлены на рис. 1.

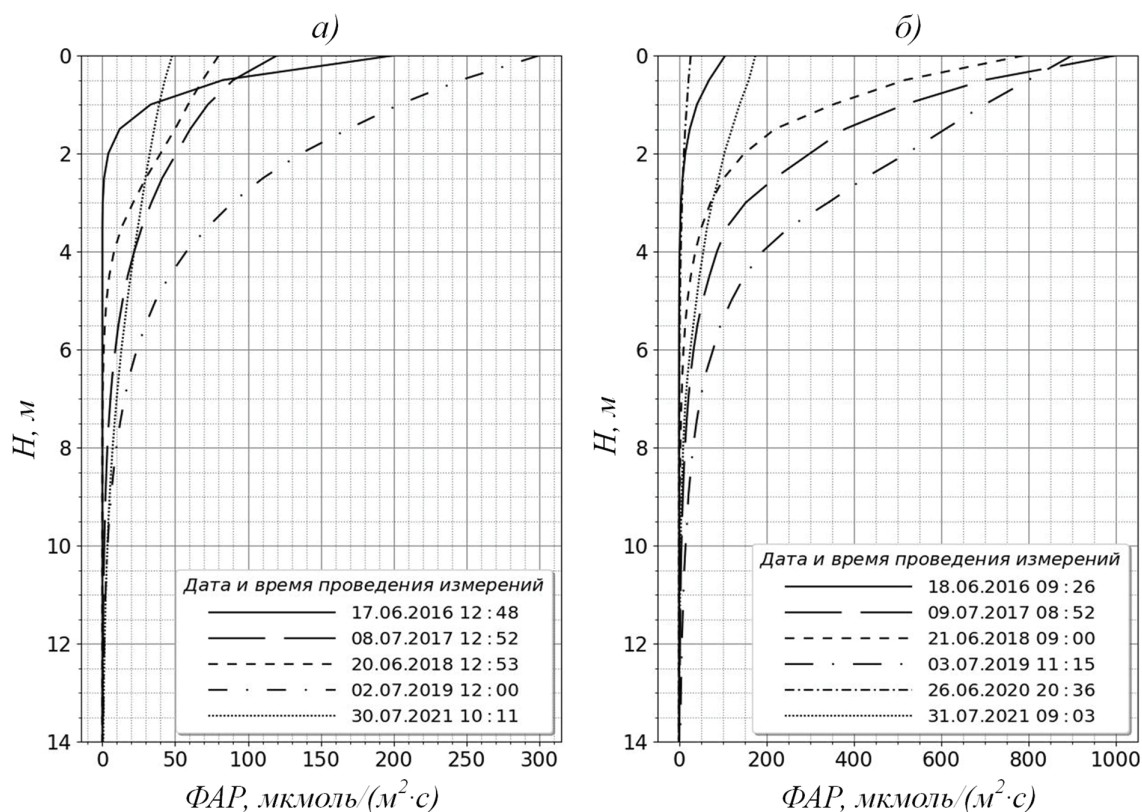


Рис. 1. Плотность потока ФАР на разных глубинах двух станций Телецкого озера: а — станция 002, б — станция 021

Показано, что на двух станциях в пелагиальной зоне рек Чулышман (рис. 1а) и Кокши (рис. 1б) соответственно величина ФАР монотонно убывает с увеличением глубины в озере и практически становится равной нулю в различные годы исследований на горизонтах от 3 до 14,8 м. В поверхностном слое воды в период наблюдений значения плотности потока ФАР составили 48–300 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) на станции 002 и 27–1000 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) на станции 021. Глубина фотической зоны  $Z_{1\%}$  (на уровне однопроцентной освещенности, т.е. равной 0,01 ФАР) на станции р. Чулышман достигала в солнечные дни 14,8 м,

на станции р. Кокши — 11,7 м. Во время проведения полевых измерений поверхность озера была зеркально-гладкой, т.е. совершенно спокойной. Только в 2019 г. наблюдалось слабое волнение с короткими волнами и гребнями. Сила ветра на высоте 4,7 м над поверхностью воды изменялась в период исследования на станции р. Чулышман в пределах 0–5,8 м·с<sup>-1</sup>, р. Кокши — 0,5–5,8 м·с<sup>-1</sup> соответственно.

На рисунке 2 приведены расчеты доли плотности потока ФАР в процентах на разных глубинах озера от плотности потока ФАР, падающего на водную поверхность.

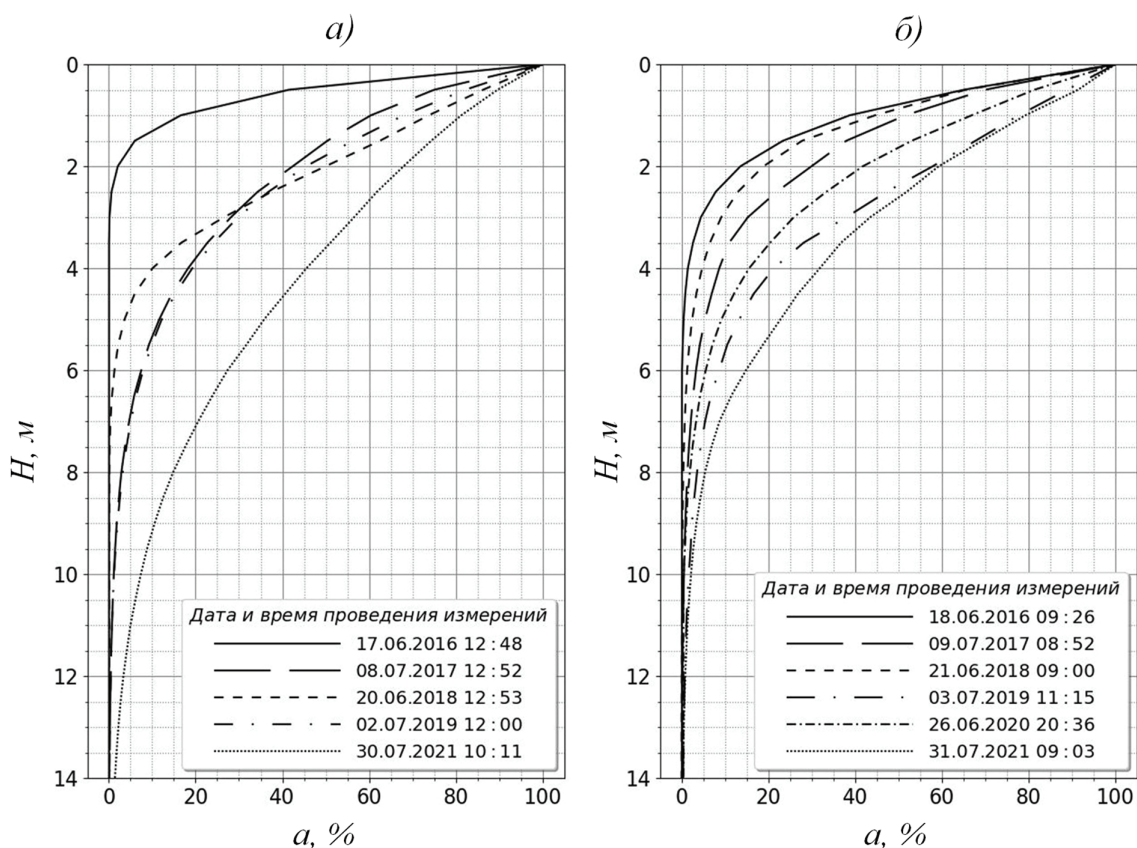


Рис. 2. Доля ( $a, \%$ ) плотности потока ФАР на разных глубинах Телецкого озера на примере двух станций:  $a$  — станция 002,  $б$  — станция 021

Значения показателя ослабления (коэффициента экстинкции), полученные в результате полевых измерений, позволяют рассчитывать ФАР на определенной глубине исследуемого водного объекта. Показатель ослабления рассчитывался по формуле [16, с. 7]

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

где  $z$  и  $z_1$  — нижний и верхний горизонты измерений соответственно в метрах,  $E_d$  — плотность потока падающей солнечной радиации, в мкмоль/(м<sup>2</sup>·с).

Часто в задачах математического моделирования внутриводоемных процессов используются осредненные значения физических величин [8]. В нашей работе приведены величины показателя ослабления света  $k_w$  послойно в пределах глубин фотического слоя, по которым определяются осредненные значения данной оптической характеристики.

Рассчитанные нами значения показателя ослабления по вертикали (послойно) для двух станций озера Телецкое представлены на рисунке 3.



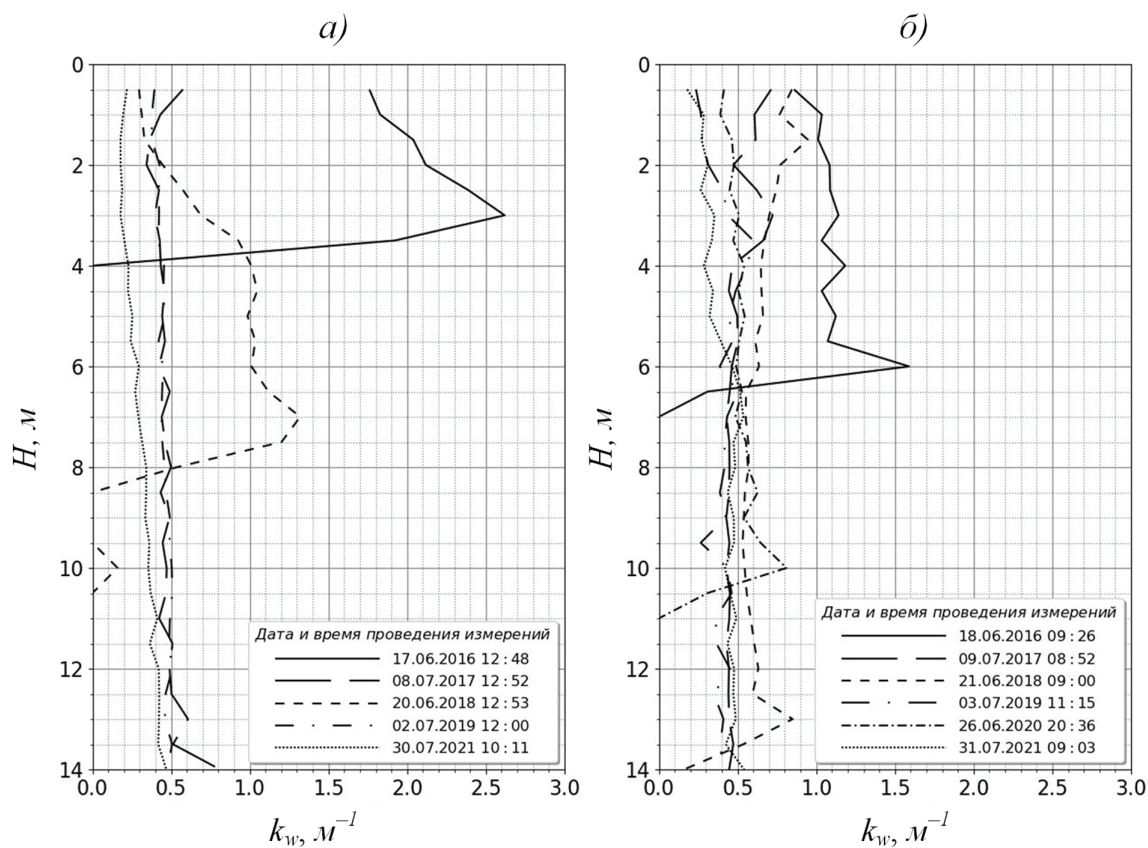


Рис. 3. Динамика показателя ослабления  $k_w$  от глубины  $H$  на озере в летний период 2016–2021 гг.

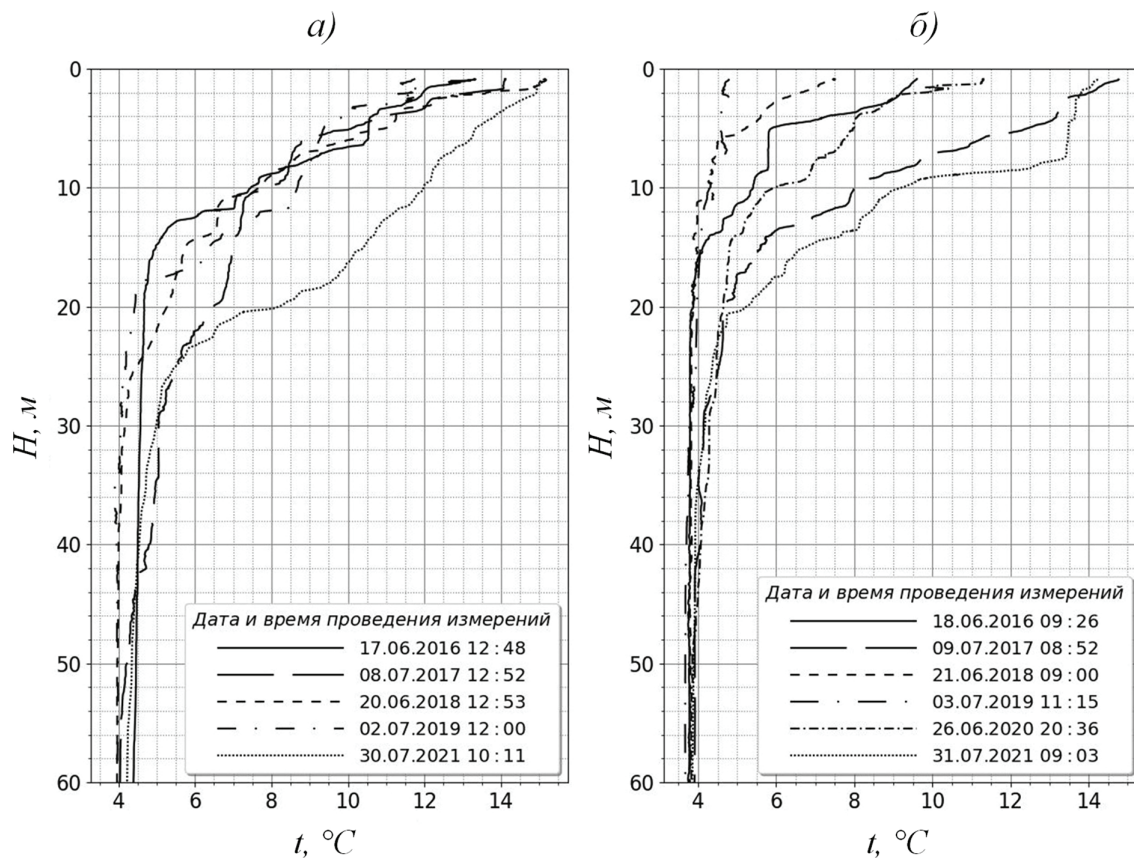


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры воды  $t$  в Телецком озере

Максимальные значения показателя ослабления наблюдались в поверхностном трехметровом слое озера в июне 2016 г. на станции р. Чулышман —  $1,8\text{--}2,6\text{ м}^{-1}$ , глубже 3 м величины варьировали в пределах  $0,1\text{--}1,9\text{ м}^{-1}$  (рис. 3а). На станции р. Кокши значения  $k_w$  изменялись в диапазоне от 0,1 до  $1,6\text{ м}^{-1}$  (рис. 3б). Полученные нами значения показателей ослабления  $k_w$  по данным измерений плотности потоков ФАР достаточно хорошо согласуются с данными измерений по спектральному показателю ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$ , параллельно выполненным на озере. Например, в 2018 г. величины  $\varepsilon(\lambda)$  на длине волны 550 нм находились в диапазоне  $0,4\text{--}2,3\text{ м}^{-1}$  (расчитаны при натуральном основании логарифма) [13, с. 23]. Изменчивость показателя ослабления  $k_w$  в период открытой воды происходит при изменении относительной прозрачности  $Z$  (м). В свою очередь, относительная прозрачность озер, как и ее динамика, в течение года зависят от ряда факторов, таких как количество поступающих с водосбора взвешенных и растворенных веществ, сезонного развития клеток водорослей фитопланктона. Измерения прозрачности с помощью белого диска Секки в июне-июле в 2016–2021 гг. на разных станциях озера Телецкое показали, что относительная прозрачность воды увеличилась от 1,3 до 5,3 м для станции 002 и от 2,4 до 6,5 м для станции 021. Можно полагать, что в этот период уменьшилось количество растворенного и взвешенного вещества, поступавшего в озеро с водосбора во время весеннего таяния.

Измерения температуры воды по глубине озера (от 0 до 60 м) выполнены с помощью датчика темпе-

ратуры *SBE 3F* в составе *CTD* зонда *SBE 25plus*, результаты представлены на рисунке 4.

Видно, что вертикальные профили температуры воды в июне-июле на озере являются характерными для прямой летней стратификации водоема. Ход температуры воды характеризуется кратковременными колебаниями, связанными прежде всего с изменениями погодных условий: резкие повышения температуры воды — установлением жаркой штилевой погоды, понижения температуры — волновым перемешиванием и временными похолоданиями.

#### Выводы

По данным полевых измерений плотности потока фотосинтетически активной солнечной радиации в воде глубоководного олиготрофного озера Телецкое в период открытой воды изучены и оценены его оптические характеристики. На примере двух станций показано, что величины ФАР монотонно убывают с увеличением глубины в озере и практически становятся равны нулю в различные годы исследований на горизонтах от 3 до 14,8 м. Полученные величины показателей ослабления на озере могут быть использованы в численных моделях при изучении термогидродинамических процессов.

#### Благодарность

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику лаборатории гидробиологии Е.Ю. Митрофановой за предоставленные данные измерений относительной прозрачности и отбор проб воды на озере в период исследования.

### Библиографический список

1. Адаменко В.Н., Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В., Чехин Л.П. Радиационный режим и оптические свойства озер. Л., 1991.
2. Kirk J. T.O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. DOI: 10.1017/CBO9781139168212.
3. Бульон В.В. Моделирование потоков энергии в озерных экосистемах как инструмент гидробиологических исследований // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 3.
4. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л., 1980.
5. Эйнон Л.О. Роль света в формировании первичной продукции в водоеме // Водные ресурсы. 1987. № 5.
6. Гавриленко Г.Г., Здоровеннова Г.Э., Здоровеннов 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.
7. Arst H., Erm A., Herlevi A., Kutser T., Leppäranta M., Reinart A., Virta J. Optical properties of boreal lake waters in Finland and Estonia // Boreal Environment Research. 2008. № 13.
8. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л., 1987.
9. Селегей В.В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я., Высоцкий Е.М., Перепелова Т.И. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера // Тр. Департамента геологии и минералогии. Королевский Музей Центральной Африки. Тервюрен, Бельгия. 2001. Т. 105.
10. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л., 1978.
11. Селегей В.В. Телецкое озеро: очерки истории. Кн. 3. Барнаул, 2011.
12. Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Винокуров Ю.И., Кириллов В.В., Зиновьев А.Т. Современное состояние, экологические проблемы и перспективы изучения Телецкого озера (Республика Алтай) // Озера Евразии: проблемы

и пути их решения : матер. 1-й Междун. конф. (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск, 2017.

13. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. Geography, Physics and Chemistry. Wiley. London, 1957. Vol. I.

14. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Численное моделирование и натурные исследования термобара в Телецком озере // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-86-94.

15. Акулова О.Б. Букатый В.И., Марусин К.В. Пространственная изменчивость гидрооптических характеристик Телецкого озера // Труды КарНЦ РАН. Серия : Лимнология и океанология. 2019. №3. DOI: 10.17076/lim947.

16. Пальшин Н.И., Здоровеннова Г.Э., Здоровеннов Р.Э., Богданов С.Р., Ефремова Т.В., Волков С.Ю., Гавриленко Г.Г., Тержевик А.Ю. Солнечная радиация в водной толще малых озер Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 9. DOI: 10.17076/lim1384.