

Спектральные свойства вертикального распределения горизонтальной облученности в Телецком озере в августе 2023 года: методика обработки и региональные особенности

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Суслин В.В.^{1*}, Кудинов О.Б.¹, Корчемкина Е.Н.¹, Латушкин А.А.¹,
Суторихин И.А.², Кириллов В.В.², Мартынов О.В.¹

¹ ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011, Россия

² ФГБУН «Институт водных и экологических проблем СО РАН», ул. Молодежная, 1, Барнаул, 656038, Россия

АННОТАЦИЯ. Спектральный состав солнечного света, проникающий на разные глубины в верхнем слое водоёма, с одной стороны, зависит от оптически активных веществ, содержащихся в воде, с другой стороны, имеет важное значение для функционирования фитопланктона, а значит, играет важную роль в функционировании водной экосистемы в целом. При изучении спектрального состава света на разных глубинах использован новый прибор, выполненный на современной элементной основе. Анализ полученных спектров показателя вертикального ослабления позволил выявить региональные особенности проникновения естественного солнечного света, характерные для Телецкого озера.

Ключевые слова: Телецкое озеро, оптические свойства воды, спектр горизонтальной облученности, вертикальный профиль ФАР и горизонтальной облученности, показатель поглощения света, региональные особенности

Для цитирования: Суслин В.В., Кудинов О.Б., Корчемкина Е.Н., Латушкин А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Мартынов О.В. Спектральные свойства вертикального распределения горизонтальной облученности в Телецком озере в августе 2023 года: методика обработки и региональные особенности // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 5. - С. 1253-1266. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-5-1253](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-5-1253)

1. Введение

Солнечный свет, проникающий в толщу воды, ослабляется за счет поглощения и рассеяния оптически активными веществами (пигменты фитопланктона, растворенное органическое вещество, взвешенные частицы различного происхождения). Спектральная изменчивость оптических свойств этих компонентов определяет результирующий спектр подводной облученности на различных глубинах. Вертикальное распределение облученности имеет важное значение для функционирования фитопланктона, а значит, и для водной экосистемы в целом. Оценка вертикального распределения подводной облученности и показателя вертикального ослабления облученности требуется для моделирования процессов фотосинтеза конкретного водоема. Особенно это важно для ограниченных водных объектов, которыми являются озера, которые чувствительны как к климатическим изменениям, так

и антропогенному влиянию (Акулова и др., 2017; Асламов и др., 2020; Churilova et al., 2020; Suslin et al., 2020).

В августе 2023 года на Телецком озере были проведены комплексные гидрооптические исследования, включавшие в себя измерения спектров подводной облученности и коэффициента яркости водной толщ. Телецкое озеро расположено в северо-восточной части Республики Алтай (Рис. 1а). Оно имеет вытянутую форму и состоит из двух частей: меридионально протяженностью 50 км и широтную (северную) протяженностью 28 км. Телецкое озеро - проточное, в него впадают более 150 постоянных рек и временных потоков, среди которых крупнейшим является р. Чулышман, обеспечивающая до 70% от общего притока воды, а вытекает р. Бия (Селегей и др., 2001).

Предыдущие оптические измерения на Телецком озере представлены спектрами подводной облученности и показателя ослабления света

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru (В.В. Суслин)

Поступила: 17 июня 2024; Принята: 02 октября 2024;

Опубликована online: 31 октября 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



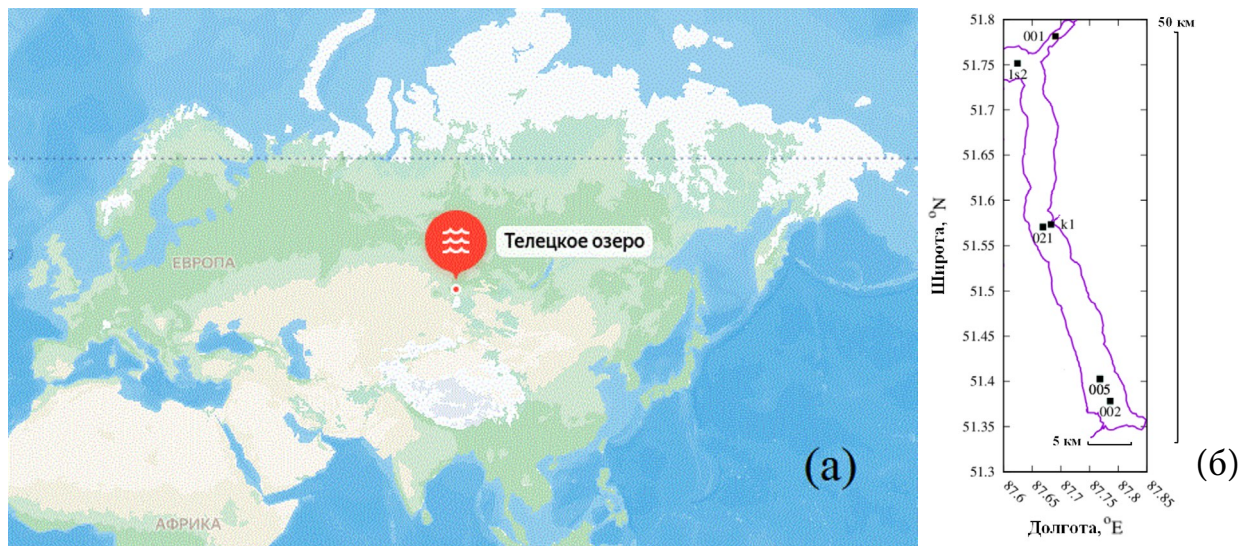


Рис.1. Географическое положение (а) Телецкого озера и (б) станций, на которых выполнены измерения профиля спектральной облученности в Телецком озере в августе 2023 года.

(Суторихин и др., 2020; Акулова и др., 2022). Цель данной работы состояла в том, чтобы, используя спектральные измерения профиля горизонтальной облученности, рассчитать спектр показателя вертикального ослабления света, оценить спектральный наклон суммарного показателя поглощения света в коротковолновой части спектра и выявить региональные особенности, характерные для Телецкого озера. В качестве дополнительной задачи, на основе синхронных измерений профиля фотосинтетически активной радиации (ΦAP) и спектра горизонтальной облученности разработать метод построения профиля ослабления спектра горизонтальной облученности в физических единицах.

2. Материалы и методы

Положение станций, на которых выполнены синхронные спектральные измерения профиля горизонтальной облученности и профиля фотосинтетически активной радиации, показаны на Рис. 1б. Из Рис. 1б видно, что измерения охватывают северную, центральную и южную части озера, включая его приустьевые районы. Таким образом, мы имеем репрезентативный охват станциями всех основных районов озера.

Для изучения спектрального состава света на разных глубинах использован новый прибор, выполненный на современной элементной основе (Латушкин и Кудинов, 2019). Прибор выполнял синхронные измерения профилей облученности в семи спектральных каналах с центральной длиной волны 380, 443, 490, 510, 555, 590 и 620 нм. Ширина полосы пропускания в первом спектральном канале 30 нм, во всех остальных – 10 нм. Пример измерения профилей горизонтальной облученности во всех семи спектральных каналах на ст. 002 показан на Рис. 2.

Для решения одной из перечисленных задач привлечены измерения прибором «КОНДОР» (Ли, 2012; Комплекс гидробиофизический мультипара-

метрический погружной автономный «КОНДОР», 2024. URL: <https://dent-s.narod.ru/kondor.html>) профиля ΦAP , которые выполнялись синхронно с измерением горизонтальной облученности. Пример измерения профиля ΦAP на ст. 002 прибором «КОНДОР» представлен на Рис. 3.

Опишем метод определения интегрального значения фотосинтетически активной радиации сразу под поверхностью воды по прямым измерениям профиля $\Phi AP(z)$, где z – глубина. Из определения K_d следует, что $\Phi AP(z) = \Phi AP(0) \cdot \exp(-K_d \cdot z)$. После логарифмирования решение сводится к нахождению констант a и b в линейном уравнении (1)

$$y = a + b \cdot z, \quad (1)$$

где $a = \ln(\Phi AP(0))$ и $b = -K_d$.

K_d считали не зависящим от z , и определяли его по измерениям $\Phi AP(z)$ для участка чуть ниже поверхности ($z > 2-3$ м), чтобы избежать влияния тени судна. Измерения проводились в течение нескольких минут, чтобы минимизировать ошибки, связанные с переменным освещением поверхности воды, например, облачностью. Определив коэффициент a , находим фотосинтетически активную радиацию сразу под поверхностью воды $\Phi AP(0)$. На Рис. 3 точкой показан пример расчёта для ст. 002.

Метод калибровки каналов измерений горизонтальной облученности с использованием синхронных измерений профиля $\Phi AP(z)$ состоит из трёх этапов. Для обоих приборов мы полагали выполненными следующие условия: линейность шкал и стабильность измерительных шкал в течение экспедиционного цикла.

2.1. Этап 1

Имеем исходные телеметрические измерения $O^T(\lambda_i, z)$, где λ_i – центральная длина волны спектрального канала в нм, i – номер спектрального канала от 1 до 7, z – глубина горизонта в метрах. Находим среднее значение для каждого спектрального канала для глубин больше 30 м $\langle O^T(\lambda_i, z > 30 \text{ м}) \rangle$

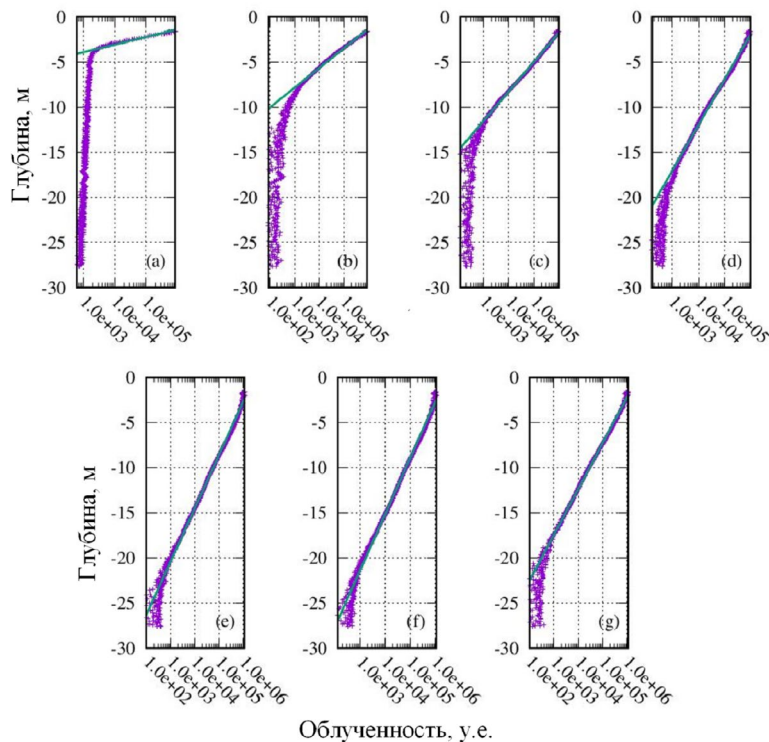


Рис.2. Пример измерения профилей горизонтальной облученности на ст. 002 в семи спектральных каналах с центральной длиной волны: 380 нм (а), 443 нм (b), 490 нм (с), 510 нм (d), 555 нм (е), 590 нм (f) и 620 нм (g). Прямая линия – результат аппроксимации уравнением 4 для соответствующего спектрального канала.

– темновой сигнал. Заметим, что $\langle O^T(\lambda_i, z > 30m) \rangle$ определялся для глубин почти в два раза превышающих слой фотосинтеза, т. е. на нижней границе которого падающее на поверхность излучение в диапазоне от 400 до 700 нм ослаблялось в 100 раз

$$\langle O^T(\lambda_i, z > 30m) \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{z=30}^{z=z_{\max}} O^T(\lambda_i, z), \quad (2)$$

где z – глубина измерения, начиная с 30 м; $z_{\max}$ – максимальная глубина измерения для соответствующей станции; N – число измерений от 30 м до $z_{\max}$.

Для проверки гипотезы стабильности «темнового» телеметрического сигнала горизонтальной облученности для семи спектральных каналов использованы измерения на ст. 002 и 021. Разность измерений на этих станциях по времени составила 2 дня. Результаты представлены на Рис. 4 и Таблице 1. В Таблице 1 даны среднее значение $\langle O^T(\lambda_i, z > 30m) \rangle$, их среднеквадратичное отклонение (СКО) и число измерений N . Из Рис. 4 видно, что калибровки стабильны.

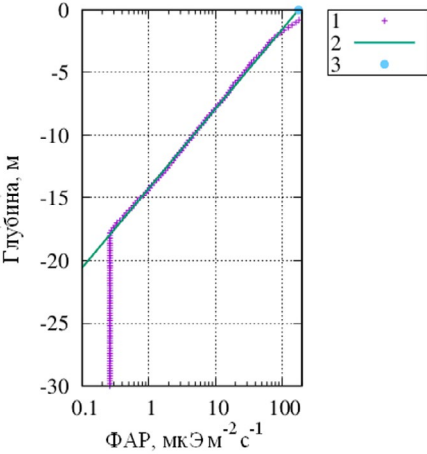


Рис.3. Пример измерения профиля ФАР прибором «КОНДОР» на ст. 002
1 – символ «+»;
2 – результат аппроксимации изменения ФАР с глубиной уравнением (1);
3 – значение $\Phi AP(0)$, как результат интерполяции уравнения (1) при $0 \rightarrow z$.

Таблица 1. Статистические характеристики «темнового» телеметрического сигнала горизонтальной облученности для семи спектральных каналов на ст. 002 и 021

Номер станции	$\langle O^T(\lambda_i, z > 30m) \rangle \pm \text{СКО}$							N
	380 нм	443 нм	490 нм	510 нм	555 нм	590 нм	620 нм	
002	16462 ± 91	12855 ± 90	12625 ± 112	15373 ± 99	19883 ± 88	14937 ± 101	14600 ± 95	333
021	16281 ± 90	12751 ± 79	12469 ± 98	15393 ± 96	19714 ± 103	14770 ± 98	14438 ± 97	88

2.2. Этап 2

Расчёт сигнала с учётом темнового тока $O''(\lambda_i, z)$ выполнен согласно выражения –

$$O''(\lambda_i, z) = O^T(\lambda_i, z) - \langle O^T(\lambda_i, z > 30m) \rangle, \quad (3)$$

где $\langle O^T(\lambda_i, z > 30m) \rangle$ – значения темнового тока (см. Табл. 1). Расчёт $a(\lambda_i)$ и $b(\lambda_i)$ проводился для каждой станции и для каждого из семи спектральных каналов по формуле –

$$\ln(O''(\lambda_i, z)) = b(\lambda_i) \cdot z + a(\lambda_i), \quad (4)$$

где горизонтальная облученность в спектральном канале с центральной длиной волны λ_i , сразу под поверхностью воды находилась как $O''(\lambda_i, 0^-) = \lim_{z \rightarrow 0^-} (O''(\lambda_i, z))$ или $a(\lambda_i) = \ln(O''(\lambda_i, 0^-))$, а показатель вертикального ослабления света в соответствующем спектральном канале λ_i как $K_d(\lambda_i, 0^-) = -b(\lambda_i)$. Результаты расчётов коэффициентов $a(\lambda_i)$ и $b(\lambda_i)$ согласно уравнению (4) для всех семи станций сведены в Таблице 2.

2.3. Этап 3

Перевод в физические единицы излучения $O^p(\lambda_i, 0^-)$ выполнялся с помощью выражения:

$$O^p(\lambda_i, 0^-) = \Phi AP(0^-) \cdot w_i, \quad (5)$$

где $w_i = \frac{1}{\Delta \lambda_i} \cdot \int_{\lambda_i - \Delta \lambda_i/2}^{\lambda_i + \Delta \lambda_i/2} w(\lambda) d\lambda$ – доля фотонов в соответствующем спектральном интервале (Suslin et al., 2020), связанном с характеристиками спектрального канала $\lambda_i \pm \Delta \lambda_i/2$ (Суторихин и др., 2020); $\Phi AP(0^-)$ – находится из измерений профиля ΦAP прибором «КОНДОР». Очевидно, что вид $w(\lambda)$ зависит от высоты Солнца и условий облачности. В нашем случае выбор функциональной зависимости $w(\lambda)$ был взят из работы (Bartlett et al., 1998). Тогда коэффициент пересчёта телеметрии в физические величины $p(\lambda_i)$ рассчитывается по формуле

$$p(\lambda_i) = \frac{O^p(\lambda_i, 0^-)}{O''(\lambda_i, 0^-)}. \quad (6)$$

Таблица 2. Результаты расчётов коэффициентов $a(\lambda_i)$ и $b(\lambda_i)$ согласно уравнению (4) для семи станций

Станция	$a(\lambda_i)/b(\lambda_i)$						
	380	443	490	510	555	590	620
1 001	17.64 -2.733	15.17 -1.049	15.03 -0.705	14.67 -0.455	14.90 -0.393	14.80 -0.368	14.80 -0.453
2 002	19.15 -3.191	14.83 -1.116	14.23 -0.681	14.15 -0.483	14.32 -0.421	14.08 -0.400	14.00 -0.498
3 005	19.99 -3.491	16.27 -1.304	15.74 -0.815	15.32 -0.498	15.53 -0.465	15.29 -0.435	15.31 -0.559
4 005*	20.44 -3.211	16.48 -1.210	15.49 -0.703	14.99 -0.439	15.13 -0.386	14.99 -0.356	15.01 -0.458
5 021	17.90 -3.145	13.83 -1.023	13.42 -0.635	13.19 -0.438	13.29 -0.389	12.93 -0.361	12.96 -0.434
6 k1	19.87 -3.006	16.04 -0.966	15.95 -0.670	15.69 -0.473	15.80 -0.417	15.71 -0.398	15.79 -0.481
7 1s2	18.12 -2.789	15.01 -0.786	16.24 -0.655	16.38 -0.478	16.70 -0.431	16.38 -0.405	15.87 -0.451

Примечание: * ст. 005 выполнена с разницей во времени в 1 час (3 – 13:00; 4 – 14:00 по местному времени)

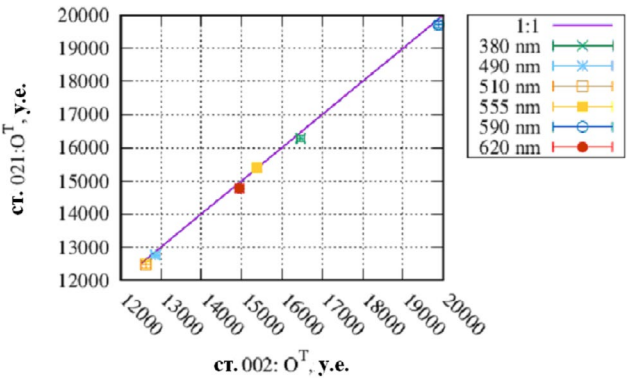


Рис.4. Тест на стабильность калибровок в течение экспедиции в шести спектральных каналах на примере ст. 002 и 021, разнесённых по времени на два дня.

Так как мы принимали, что ΦAP это интеграл числа фотонов, лежащих в спектральном интервале от 400 до 700 нм, то из расчёта был исключён спектральный канал с центральной длиной волны 380 нм. Результаты расчёта $p(\lambda_i)$ представлены в Таблице 3.

3. Результаты и обсуждение

На Рис. 5 показаны спектры K_d и их разность от среднего спектра $\langle K_d \rangle$ для всех семи станций (Таблица 2) после обработки по методу (уравнения (2) – (4)).

Минимальные значения K_d в спектральном канале с центральной длиной волны 590 нм в совокупности с его высокими значениями в коротковолновой области спектра указывают на доминирование поглощения, в первую очередь, окрашенной компонентой растворённого органического вещества.

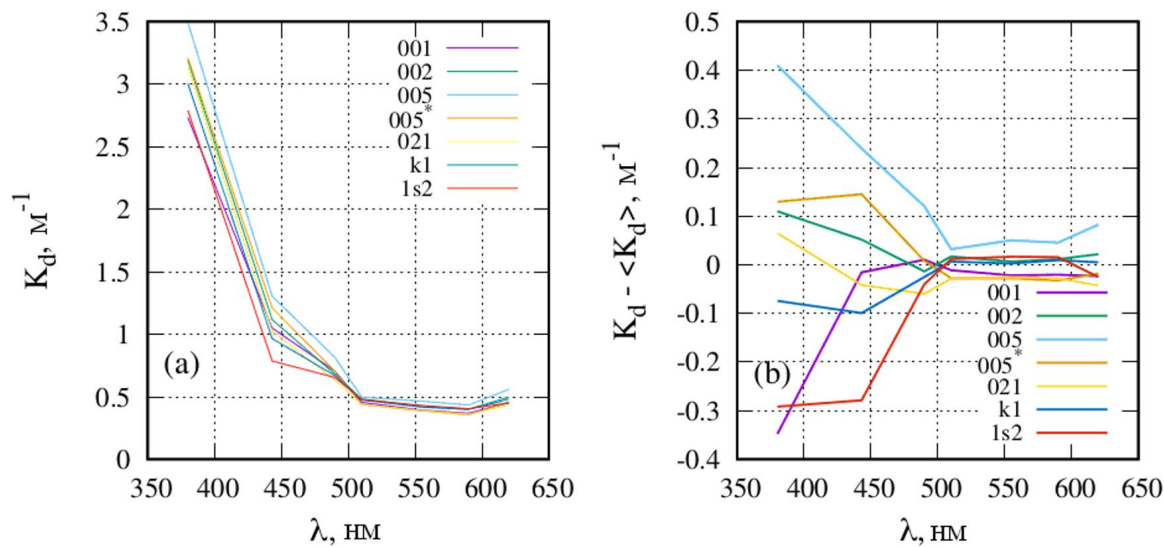


Рис.5. Спектры показателя вертикального ослабления света K_d (a) и их отклонения от среднего ($K_d - \langle K_d \rangle$) (b) для выборки (Таблица 2).

Для выявления географических особенностей K_d рассмотрим Рис. 5b. Значения разности $K_d - \langle K_d \rangle$ выше среднего в коротковолновой области спектра наблюдаются на юге озера (ст. 002, 005 и 005*); минимальные значения – на севере озера (ст. 001 и 1s2); промежуточные значения в центре (ст. k1 и 021). Таким образом, в верхнем слое озера наблюдается тенденция уменьшения поглощения водой (главным образом связанная с концентрацией растворённой органики, т. к. речь идёт о спектральном канале с центральной длиной волны 380 нм) с юга на север.

Отметим ещё одну особенность – различие значений K_d в спектральном канале с центральной длиной волны 443 нм на ст. 001 и 1s2, расположенными в северной части озера. Для ст. 001, находящейся в заливе Камга, эта разность существенно больше, чем на ст. 1s2. Такое различие в K_d может быть связано с дополнительным поглощением фитопланктоном, концентрация которого в заливе существенно выше. Однако это предположение требует дополнительной проверки.

Вывод, сделанный из анализа Рис. 5a о высоком значении показателя поглощения верхним слоем воды в Телецком озере, хорошо согласуется с результатами измерений спектров коэффициента яркости (КЯ) водной толщи, сделанные Корчемкиной Е.Н. во время этой экспедиции. Ссылка на описание прибора и метода измерения КЯ водной толщи дана в работе (Shybanov et al., 2023). Известно, что показатель поглощения растворённой органикой в Чёрном море существенно больше по сравнению с водами

открытого океана (Суетин и др., 2002; Kopelevich et al., 2004). На Рис. 6 приведены примеры спектров КЯ водной толщи в Чёрном море в апреле 2021 г. и в Телецком озера на ст. 002 и 021 в августе 2023 г. Заметим, что измерение в Чёрном море выполнено в отсутствии цветения кокколитофорида. Хорошо видно, что значение КЯ водной толщи на длине волны 400 нм в Телецком озере более чем в три раза меньше, чем в Чёрном море, несмотря на то, что в длинноволновой области спектра (больше 600 нм) КЯ водной толщи в озере больше, чем в море. С одной стороны, это подтверждает вывод о том, что показатель поглощения света в коротковолновой части спектра в озере существенно выше, чем в Чёрном море. С другой стороны, очевидно, что показатель обратного рассеяния света частицами взвеси существенно выше в озере, чем в море. Это особенно заметно для ст. 002, расположенной на юге в районе впадения р. Чулышман, которая выносит значительное количество взвеси.

Полученные данные о $K_d(\lambda)$ (Таблица 2) можно использовать для оценки спектральной зависимости S_{CDOM} показателя поглощения окрашенной компоненты растворённого органического вещества a_{CDOM} , полагая, что a_{CDOM} вносит основной вклад в суммарное поглощение света водой a_{tot} в коротковолновой области спектра ($\lambda \in 350 - 450$ нм), т.е. $a_{CDOM} \gg a_w, a_{ph}$ и дополнительно $a_{tot} \gg b_b$, где a_w и a_{ph} – показатели поглощения света чистой водой и фитопланктоном, b_b – суммарный показатель обратного рассеяния света водой, тогда:

$$K_d(\lambda) \approx const \cdot (a_w(\lambda) + b_b(\lambda)) \approx const \cdot (a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + b_b(\lambda)) \approx const \cdot a_{CDOM}(\lambda). \quad (7)$$

Таблица 3. Результат расчёта $p(\lambda_p)$ для спектральных каналов с центральной длиной волны λ_i и $O^p(\lambda_p, 0)$ для станции k1

λ_p , нм	443	490	510	555	590	620
$p(\lambda_p)$	1.424e-06	1.967e-06	2.751e-06	2.731e-06	3.149e-06	2.978e-06
$O^p(\lambda_p, 0)$	1.321e+01	1.664e+01	1.786e+01	1.985e+01	2.098e+01	2.140e+01

Таблица 4. Результаты расчётов спектрального наклона поглощения неживого органического вещества SCDOM в Телецком озере по уравнению (9)

λ/λ_0 нм	Номер станции							$\langle S_{CDOM} \rangle \pm \text{CKO}$ нм ⁻¹
	001	002	005	005	021	k1	1s2	
380/443	0.015	0.017	0.016	0.015	0.018	0.018	0.021	0.017 ± 0.002

Принимая во внимание, что функциональная связь a_{CDOM} от λ имеет вид (Копелевич, 1983):

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_0) \cdot \exp(-S_{CDOM} \cdot (\lambda - \lambda_0)), \quad (8)$$

и сделав элементарные преобразования уравнения (7), с учётом уравнения (8) для двух спектральных каналов с центральной длиной волны $\lambda = 380$ нм и $\lambda_0 = 443$ нм соответственно, получаем выражение для S_{CDOM} :

$$S_{CDOM} = \frac{1}{\lambda - \lambda_0} \cdot \ln \left(\frac{K_d(\lambda_0)}{K_d(\lambda)} \right). \quad (9)$$

Результаты расчётов представлены в табл. 4.

Представленные в Таблице 4 результаты совпали с проведёнными годом ранее в это же время исследованиями первичных гидрооптических характеристик Телецкого озера (Moiseeva et al., 2023), в процессе которых непосредственно измеряли спектральный ход окрашенной компоненты растворённого органического вещества для аналогичной сетки станций и которые показали, что изменчивость S_{CDOM} лежит в диапазоне 0.017 - 0.019 нм⁻¹ в диапазоне длин волн 350 - 500 нм.

На Рис. 7 приведён пример восстановления спектра горизонтальной облученности в физических единицах, полученный по описанному выше методу (уравнения (2) – (6)) по измерениям на ст. k1. Характер поведения спектра облученности с глубиной (резкий провал в коротковолновой области спектра) указывает на высокое содержание растворённого органического вещества в водах Телецкого озера (Рис. 7). Особенность спектра горизонтальной облученности в коротковолновой области как функции глубины и положение его максимума, начиная от 5 м и ниже, который соответствует длине волны 590 нм, находятся в полном согласии с результатами, полученными годом ранее сотрудниками Института Биологии Южных Морей РАН (Churilova et al., 2023).

4. Выводы

Восстановлен спектр показателя вертикального ослабления света в семи спектральных каналах, аномалии которого описывают региональные особенности в верхнем слое воды и согласуются с прямыми измерениями коэффициента яркости водной толщи;

Продemonстрировано, что в случае синхронных измерений профиля ФАР и горизонтальной облученности можно получить облученность в физических единицах на любом горизонте в слое фотосинтеза;

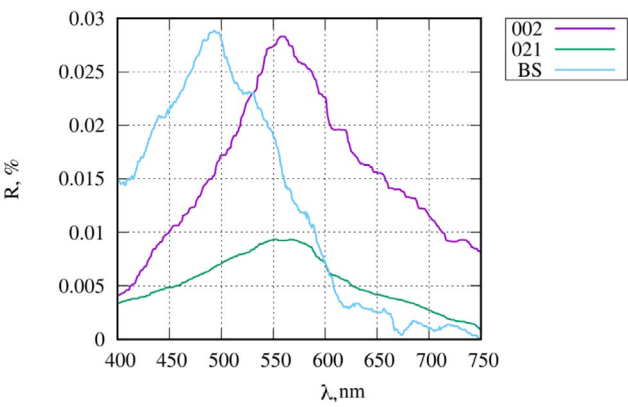


Рис.6. Примеры измерений коэффициента яркости водной толщи в Телецком озере в августе 2023 года на ст. 002 и 021 и в глубоководной части Черного моря в апреле 2021 года.

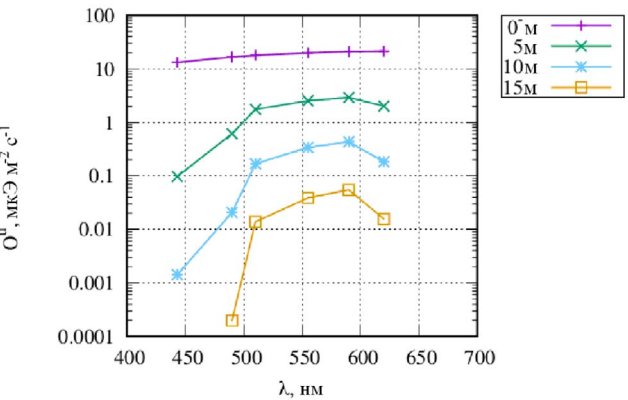


Рис.7. Пример восстановления спектра горизонтальной облученности в физических единицах для ст. k1.

Полученные значения для спектрального показателя поглощения неживым органическим веществом и максимум спектра горизонтальной подводной облученности в слое фотосинтеза совпали с ранее полученными результатами сотрудниками ИнБЮМ РАН.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственных заданий ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0012 и ФГБУН ИВЭП СО РАН №0306-2021-0001 и договоров с администрацией ФГБУ «Алтайский государственный заповедник». В экспедиционных работах использовалось научное оборудование ЦКП «Научно-исследовательские суда ИВЭП СО РАН».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Bartlett J.S., Ciotti A.M., Davis R.F. et al. 1998. The spectral effects of clouds on solar irradiance. *Journal of Geophysical Research* 103 (13): 31,017–31,031. DOI: [10.1029/1998JC900002](https://doi.org/10.1029/1998JC900002)
- Churilova T., Moiseeva N., Efimova T. et al. 2020. Spectral bio-optical properties of lake Baikal (July 2018 and September 2019). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 910–911. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-910](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-910)
- Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Efimova T.V. et al. 2023. Water transparency and spectral downwelling irradiance in the Black and Azov seas and in Lake Teletskoye. *Proceedings of SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics* 1278047. DOI: [10.1117/12.2690845](https://doi.org/10.1117/12.2690845)
- Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al. 2004. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian seas. *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography* 51 (10–11): 1063–1091. DOI: [10.1016/j.dsr2.2003.10.009](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.10.009)
- Moiseeva N.A., Churilova T.Ya., Efimova T.V. et al. 2023. Spectral bio-optical properties of Lake Teletskoye in summer. *Proceedings of SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics* 1278049. DOI: [10.1117/12.2690958](https://doi.org/10.1117/12.2690958)
- Shybanov E., Papkova A., Korchemkina E. et al. 2023. Blue color indices as a reference for remote sensing of Black Sea Water. *Remote Sensing* 15 (14): 3658. DOI: [10.3390/rs15143658](https://doi.org/10.3390/rs15143658)
- Suslin V.V., Churilova T.Ya., Latushkin A.A. et al. 2020. Photosynthetically available radiation at the bottom of the northwestern shelf of the Black sea based on regional models and satellite ocean color products and its interannual variability. *Fundamental and Applied Hydrophysics* 13 (3): 68–77. DOI: [10.7868/S2073667320030053](https://doi.org/10.7868/S2073667320030053)
- Акулова О.Б., Букатый В.И., Вагнер А.А. и др. 2022. Фотосинтетически активная солнечная радиация в Телецком озере в период открытой воды. *Известия Алтайского государственного университета* 4: 11–17. DOI: [10.14258/izvasu\(2022\)4-01](https://doi.org/10.14258/izvasu(2022)4-01)
- Акулова О.Б., Букатый В.И., Суторихин И.А. 2017. Влияние компонентов природной воды на спектральный показатель ослабления света (на примере водоемов Алтайского края). *Оптика атмосферы и океана* 30 (5): 414–419. DOI: [10.15372/AOO20170509](https://doi.org/10.15372/AOO20170509)
- Асламов И.А., Балин Ю.С., Башенхаева М.В. и др. 2020. Экспедиционные работы ЛИН СО РАН на озере Байкал в 2019 году. *Итоги экспедиционных исследований в 2019 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген. Материалы конференции.* Севастополь: 166–171.
- Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР». 2024. URL: <https://dent-s.narod.ru/kondor.html> (21.01.2024)
- Копелевич О.В. 1983. Малопараметрические модели оптических свойств морской воды. *Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана.* Москва: Наука, С. 208-234.
- Латушкин А.А., Кудинов О.Б. 2019. Автономный зондирующий измеритель фотосинтетически активной радиации. *Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых: Комплексные исследования Мирового океана:* 365-366.
- Ли М.Е. 2012. Разработки гидрооптических приборов в МГИ. *Системы контроля окружающей среды* 17: 7–20. DOI: [10.33075/2220-5861](https://doi.org/10.33075/2220-5861)
- Селегей В.В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я. и др. 2001. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера. *Тр. Департамента геологии и минералогии* 105: 310. *Королевский Музей Центральной Африки.* Тервюрен, Бельгия.
- Суетин В.С., Суслин В.В., Королев С.Н. и др. 2002. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SEAWIFS. *Морской гидрофизический журнал* 6: 44–54.
- Суторихин И.А., Коломейцев А.А., Литвиненко С.А. 2020. Гидрооптические параметры воды Телецкого озера в период устойчивой летней и зимней температурной стратификации. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика* 13 (2): 35–42. DOI: [10.7868/S2073667320020045](https://doi.org/10.7868/S2073667320020045)