

Многолетняя динамика спектральной прозрачности воды в поверхностном слое озера Телецкое в летний период

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYАкулова О.Б.*^{ORCID}, Букатый В.И.

Институт водных и экологических проблем, Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Молодёжная, д. 1, Барнаул, 656038, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты многолетних экспериментальных данных по спектральной прозрачности воды в поверхностном слое Телецкого озера (21 точка отбора проб), полученные летом в период 2017–2022 гг. Значения показателя ослабления света, рассчитаны при натуральном основании логарифма на четырёх длинах волн (430, 450, 550 и 670 нм) за исследуемый период находились в достаточно узком диапазоне от 0,2 до 4,0 м⁻¹, показателя поглощения света жёлтым веществом – от 0,1 до 3,2 м⁻¹. Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью белого диска Секки, находились в пределах 0,8–11,7 м со средним значением 6,3 м. Содержание хлорофилла-а в поверхностном слое водоёма изменялось за 6-летний период в диапазоне 0,1–4,1 мг/м³, что соответствует олиготрофному типу озёр. Концентрация жёлтого вещества в озере, определяемая оптическим методом по измеренному показателю поглощения света жёлтым веществом на длине волны $\lambda = 450$ нм, варьировала в пределах 0,9–15,0 г/м³. В результате расчётов спектрального вклада основных оптически активных компонентов озёрной воды в спектральный показатель ослабления света для поверхностного слоя Телецкого озера в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают жёлтое вещество и взвесь. Показано, что оптическая структура исследуемого водоёма – динамика основных первичных гидрооптических характеристик зависит от изменчивости концентраций различных оптически активных компонентов как во времени, так и в пространстве под влиянием внутриводоёмных процессов, протекающих в тесной связи с водосбором озера.

Ключевые слова: спектральная прозрачность воды, показатель ослабления света, показатель поглощения света жёлтым веществом, физическая модель, жёлтое вещество, хлорофилл-а, взвесь, чистая вода, Телецкое озеро

Для цитирования: Акулова О.Б., Букатый В.И. Многолетняя динамика спектральной прозрачности воды в поверхностном слое озера Телецкое в летний период // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 5. - С. 1228-1242. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-5-1228

1. Введение

Долгое время прозрачность воды была лишь качественной характеристикой, наблюдения за которой проводились лишь визуально. Традиционно относительную прозрачность природных вод разного типа (океанов, морей, озёр, водохранилищ, рек и др.) определяют полуинструментальным методом – по предельной глубине видимости белого стандартного диска Секки в водной толще, до полного его исчезновения из виду (измеряется в метрах). Например, прозрачность воды озера Байкал является одной из самых высоких среди пресноводных водоёмов, так как содержит мало растворённых и взвешенных веществ и близка к прозрачности вод

океанов и морей. Так, в байкальской воде белый диск Секки виден до глубины 40 м (Шерстянкин, 1993), а максимальная прозрачность воды в Телецком озере – 15,5 м (Селегей и др., 2001). Этот метод, широко применяемый среди учёных-гидробиологов в силу своей простоты и практичности, всё-таки считается субъективным и обладает значительной погрешностью измерений (20% и более) и существенным ограничением его использования в зимних подлёдных условиях. А вот использование электронных спектрофотометрических методов и приборов (спектрофотометров, турбидиметров, прозрачномеров и др.), которые позволяют определить спектральную прозрачность воды на любой глубине как днём, так и ночью, а результаты запи-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: akulova8282@mail.ru (О.Б. Акулова)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 17 сентября 2024;
Опубликована online: 31 октября 2024

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



сать на самопишущих приборах, являются практически универсальными, а главное – более точными.

Как известно (Ерлов, 1980; Копелевич и Шифрин, 1981; Шифрин, 1983; Копелевич, 1983; Маньковский и др., 2009; Dera, 1992; Mobley, 1994; Маньковский, 2011; Левин, 2014), спектральная прозрачность воды (измеряется в обратных метрах), относится к первичным (или внутренним, собственным) гидрооптическим характеристикам, которая представляет собой физическую величину, характеризующая оптические свойства природных вод. Спектральная прозрачность воды определяет условия распространения света в воде, а также содержит информацию о взвешенных органико-минеральных частицах и растворённом в воде органическом веществе.

Актуальность исследования продиктована необходимостью расширять и углублять представления о спектральной прозрачности воды Телецкого озера, поскольку она существенно зависит от периодических изменений её основных оптически активных компонентов – жёлтого вещества, взвеси, хлорофилла и чистой воды. Кроме того, в настоящее время во всём мире уделяется особое внимание исследованию спектрального вклада оптически активных компонентов природной воды (каждой по отдельности) в суммарное ослабление света, а также динамике их концентрации как во времени, так и в пространстве.

Целью работы являются экспериментальные исследования по оценке многолетней изменчивости спектральной прозрачности воды в поверхностном слое (толщиной 5–7 см) Телецкого озера в летний период 2017–2022 гг. и влиянию основных оптически активных компонентов озёрной воды на суммарное ослабление света.

2. Материалы и методы

Объект исследования

Телецкое озеро (координаты: между 51°21'46" и 51°48'36" с.ш., между 87°14'40" и 87°50'54" в.д.) – глубоководный водоём тектонического происхождения, расположенный на высоте 434 м над уровнем моря в северо-восточной части Горного Алтая (юг Западной Сибири). Основные характеристики водоёма следующие: площадь зеркала – 227,3 км², площадь водосборного бассейна – 20400 км², длина – 77,8 км, средняя ширина – 2,9 км, максимальная глубина – 323,0 м, объём – 41,1 км³ (Селегей и Селегей, 1978). Озеро состоит из двух частей – южной, вытянутой по меридиану, длиной более 50 км, и северной, имеющей широтное направление, длиной 28 км. По сравнению с глубоководной (пелагиальной) зоной мелководная (литоральная) зона озера имеет ряд особенностей, одно из которых – значительное гидродинамическое воздействие, связанное с интенсивными ветро-волновыми процессами (максимальная высота волны до 2,5 м) и со значительными (до 6 м) ежегодными колебаниями уровня воды. Изрезанность береговой линии озера выражена слабо, бухт и заливов мало, самые

большие – Камгинский и Кыгинский с площадью 6,5 км² и 3,1 км², соответственно. Камгинский залив самый мелководный, защищенный от волнений и наиболее благоприятный по термическому режиму и характеру грунтов из всех заливов Телецкого озера. По гидрохимическому режиму озеро – слабоминерализованный, богатый кислородом горный водоём с низкими температурами, с незначительным содержанием органических и биогенных веществ в воде (Селегей и др., 2001). За последние годы в связи с активным развитием туризма в Горном Алтае, возросла антропогенная нагрузка на озеро, особенно в его северной части. Экосистемы холодноводных олиготрофных озёр наиболее уязвимы к внешнему воздействию. Невысокий уровень развития гидробионтов в подобных водоёмах определяет низкий потенциал биологического самоочищения для поступающих с водосбора взвешенных, растворённых и слабо растворимых в воде веществ, которые могут существенно изменить качество воды и интенсивность внутриводоёмных процессов.

Методы исследования

Исследования основных гидрооптических характеристик (показателя ослабления света водой, показателя поглощения света жёлтым веществом и относительной прозрачности, измеренной с помощью белого диска Секки) по акватории Телецкого озера выполнили летом в период 2017–2022 гг., организованный Институтом водных и экологических проблем СО РАН. Даты экспедиций следующие: 7–11 июля 2017 г., 19–23 июня 2018 г., 1–5 июля 2019 г., 24–29 июня 2020 г., 29 июля – 1 августа 2021 г., 1–5 августа 2022 г.

Ежегодно с поверхностного слоя Телецкого озера батометром с борта научно-исследовательского судна отбирали по 21 пробе (Рис. 1), всего за период исследования отобрали 126 водных проб. В лаборатории провели 1008 отдельных измерений спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды на четырёх длинах волн (430, 450, 550 и 670 нм) на стационарном спектрофотометре ПЭ-5400УФ до и после фильтрации проб за 6-летний период исследования озера.

Спектральный показатель ослабления света $c(\lambda)$ рассчитали по формуле, вытекающей из закона Бугера

$$c(\lambda) = \left(\frac{1}{L} \right) \cdot \ln \left(\frac{1}{T(\lambda)} \right), \quad (1)$$

где L – длина измерительной кюветы (использовали стеклянные кюветы с рабочей длиной 50 мм), $T(\lambda) = I(\lambda) / I_0(\lambda)$ – спектральная прозрачность воды в относительных единицах, $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ – интенсивности прошедшего и падающего на кювету света, соответственно, λ – длина волны света. Показатель поглощения света жёлтым веществом $a_{ys}(\lambda)$ определили после измерения спектральной прозрачности воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм. Максимальная абсолютная погрешность измерений $c(\lambda)$ и $a_{ys}(\lambda)$ для изучаемого спектрального диапазона составила 0,1 м⁻¹.

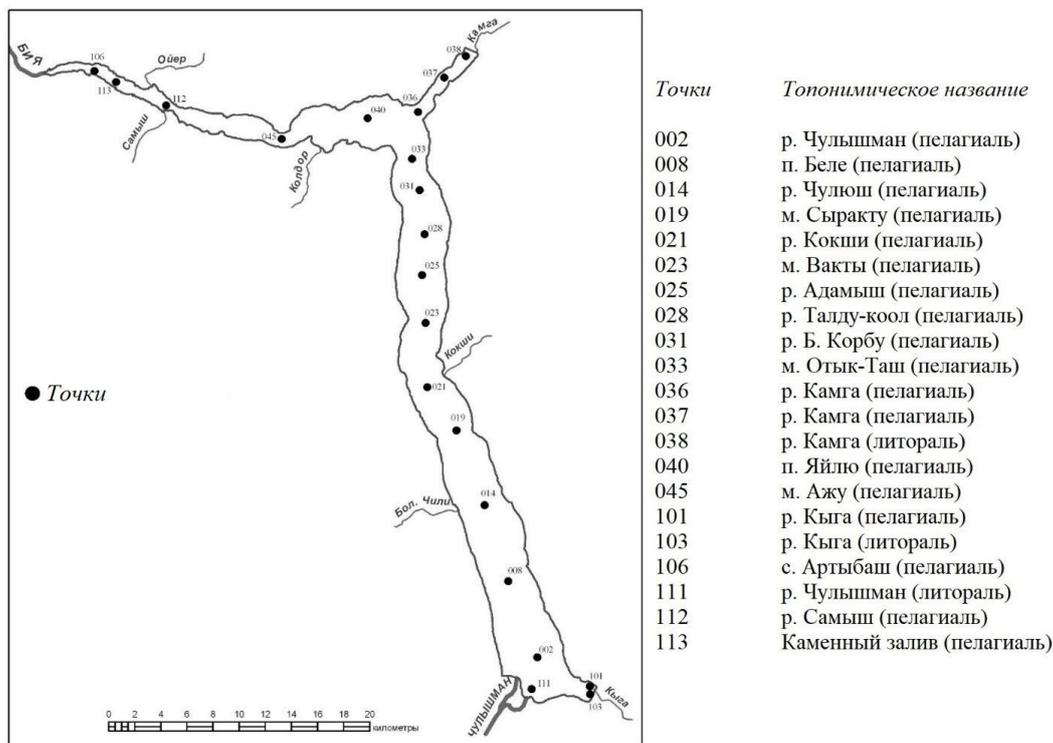


Рис.1. Картограмма точек отбора проб по акватории Телецкого озера

Спектральная зависимость показателя поглощения света жёлтым веществом аппроксимируется экспоненциальным законом

$$a_{ys}(\lambda) \sim e^{-\mu \cdot \lambda}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент спектральной изменчивости, характеризующий качественный состав растворённого органического вещества (РОВ). Следуя работе (Маньковский, 2015), измерив $a_{ys}(450)$ (при $\lambda = 450$ нм) определили концентрацию жёлтого вещества в пробах воды по формуле

$$C_{ys} = a_{ys}(450) / a_{sp,ys}(450). \quad (3)$$

Здесь C_{ys} – концентрация жёлтого вещества, в г/м³, $a_{sp,ys}(450)$ – удельный показатель поглощения света жёлтым веществом, в м²/г. С учётом предложенного в (Маньковский, 2015) подхода рассчитаны значения C_{ys} с использованием величины $a_{sp,ys}(450)$, взятой из работы (Nyquist, 1979).

С тем, чтобы иметь возможность сравнить полученные нами данные по спектральной прозрачности воды с результатами подобных оптических исследований, выполненных ранее другими авторами для водных экосистем, провели также измерения относительной прозрачности SD с помощью белого диска Секки.

Дополнительно определили концентрации хлорофилла C_{chl} стандартным спектрофотометрическим методом согласно (ГОСТ, 2003).

Относительный спектральный вклад основных оптически активных компонентов озёрной воды (взвеси, жёлтого вещества, хлорофилла-а и чистой воды) в $c(\lambda)$ в поверхностном слое исследуемого водоёма рассчитали с использованием модифицированной полуэмпирической модели ослабления света (Акулова, 2015), которая впервые предложена О.В. Копелевичем (Копелевич, 1983) и имеет вид

$$c(\lambda) = a_{chl}(\lambda) + a_{ys}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + b_s(\lambda) + a_{pw}, \quad (4)$$

где $a_{chl}(\lambda)$ и $a_{ys}(\lambda)$ – спектральные показатели поглощения хлорофиллом-а и жёлтым веществом, соответственно, $b_{mol}(\lambda)$ – спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой, $b_s(\lambda)$ – спектральный показатель рассеяния взвесью, $a_{pw}(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения чистой водой. Как видно из данного выражения спектральное ослабление света описано с помощью трёхпараметрической модели. Так как в эксперименте определили параметр $a_{ys}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $b_s(\lambda)$ можно найти по формуле

$$b_s(\lambda) = c(\lambda) - [a_{chl}(\lambda) + a_{ys}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + a_{pw}(\lambda)]. \quad (5)$$

Трофический статус оценили с применением трофического индекса Карлсона TSI (*Trophic State Index*) (Carlson, 1977) и международной трофической классификации водоёмов (Environment Canada, 2004). Также использовали значения спектрального показателя ослабления света $c(\lambda)$, где олиготрофному типу водоёмов будет соответствовать диапазон значений $c(\lambda)$ от 0 до 2 м⁻¹, мезотрофному – от 2 до 3 м⁻¹, эвтрофному – от 3 до 23 м⁻¹, гиперэвтрофному – от 23 м⁻¹ и более (Суторихин и др., 2017).

3. Результаты и обсуждение

В результате проведённых летних экспедиций 2017–2022 гг. по акватории Телецкого озера были получены значения первичных гидрооптических характеристик – показателей ослабления света $c(\lambda)$, показателей поглощения света жёлтым веществом $a_{ys}(\lambda)$, относительной прозрачности по белому диску Секки SD , пространственное распределение которых было неоднородным. Величины $c(\lambda)$ на четырёх длинах волн ($\lambda = 430, 450, 550$ и 670 нм)

в пробах воды, отобранных в поверхностном слое водоёма, находились в диапазоне от 0,2 до 4,0 м⁻¹. В 2017 г. и 2021 г. летние значения $c(\lambda)$ изменялись незначительно (1,0–1,6 м⁻¹). Пониженная спектральная прозрачность зафиксирована в 2022 г. (0,2 м⁻¹). Значения свыше 3,0 м⁻¹ наблюдались в точках впадения рек Чулышман, Чулюш и Кыга, а также мыса Сыракуту, максимальные величины зарегистрированы в литоральной зоне реки Кыга в 2018–2020 гг. Это связано с интенсивным выносом взвешенного вещества (преимущественно минерального) речными водами и процессами разрушения береговой линии озера. Здесь на мелководье ветро-волновые течения поднимают донные осадки и перемешивают их по всей водной толще. В пелагиальной зоне, начиная с мыса Вакты (точка 023) до мыса Ажу (точка 045), а также в Каменном заливе (точка 113) значения $c(\lambda)$ не превышают 2,1 м⁻¹. Это хорошо согласуется с содержанием жёлтого вещества, которое было близким к его среднему содержанию в летний период.

За 6-летний период оптических исследований на озере амплитуда колебаний значений показателей поглощения света жёлтым веществом $a_{ys}(\lambda)$ на длинах волн $\lambda = 430, 450, 550$ и 670 нм в поверхностном слое изменялась также в небольших пределах от 0,1 до 3,2 м⁻¹, максимальные величины (более 2,0 м⁻¹) зафиксированы в период 2018–2020 г. в точках рек Чулышман, Чулюш и Кыга, а также мыса Сыракуту. В качестве примера, на Рис. 2 и 3 представлена динамика $c(430)$ и $a_{ys}(450)$, соответственно.

Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью белого диска Секки SD за исследуемый период, находились в широком диапазоне 0,8–11,7 м со средним значением 6,3 м. Прозрачность 11,0 м наблюдалась в 2019 г. в пелагиале рек Адамыш и Талду-коол (в точках 025 и 028, соответственно). Максимальная величина SD (11,7 м) зарегистрирована в посёлке Яйлю в 2018 г.

Известно (Маньковский и др., 1996; Кукушкин, 2011; Воскресенская и др., 2011; Корчемкина и Латушкин, 2016; Churilova et al., 2018; 2022; Матюшенко и др., 2001; Betancur-Turizo et al., 2018; Shi et al., 2017; Slade and Boss, 2015; Korosov et al., 2017; Woźniak and Stramski, 2004; Reinart et al., 2004), что спектральная прозрачность воды существенно зависит от содержания в ней взвешенного вещества (органического, минерального), то для объяснения межгодовых изменений характерных значений $c(\lambda)$ необходимо использовать сведения о концентрации хлорофилла-а (C_{chl-a}).

Содержание основного фотосинтетического пигмента водорослей фитопланктона – хлорофилла-а изменялось за 6-летний период в пределах 0,1–4,1 мг/м³ со средним из полученных значений – 2,1 мг/м³ (Рис. 4), что соответствует олиготрофному типу озёр. Максимальные величины C_{chl-a} зарегистрированы в 2021 г. на всех точках озера (1,1–4,1 мг/м³), минимальные – в 2019 г. (0,1–1,8 мг/м³). В целом развитие водорослей фитопланктона озера невысокое, на что влияют низкие концентрации биогенных элементов, а также нестабильность водного столба на протяжении большей части года. Сотрудниками химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН под руководством Т.С. Папиной установлено, что содержание биогенных элементов группы азота в водах Телецкого озера невысоко и доминирующей формой минерального азота являются нитрат-ионы, содержание которых изменяется в пределах 0,7–1,9 мг/дм³, типичными для олиготрофных озёр. Содержание фосфат-ионов в озере незначительно и находится на уровне микрограммов, кремния – на один–два порядка превосходит содержание остальных биогенных элементов и составляет в среднем 2,2–2,9 мг/дм³.

Результаты по концентрации жёлтого вещества C_{ys} в поверхностном слое озера за 6-летний период (2017–2022 гг.) варьировали в широком диа-

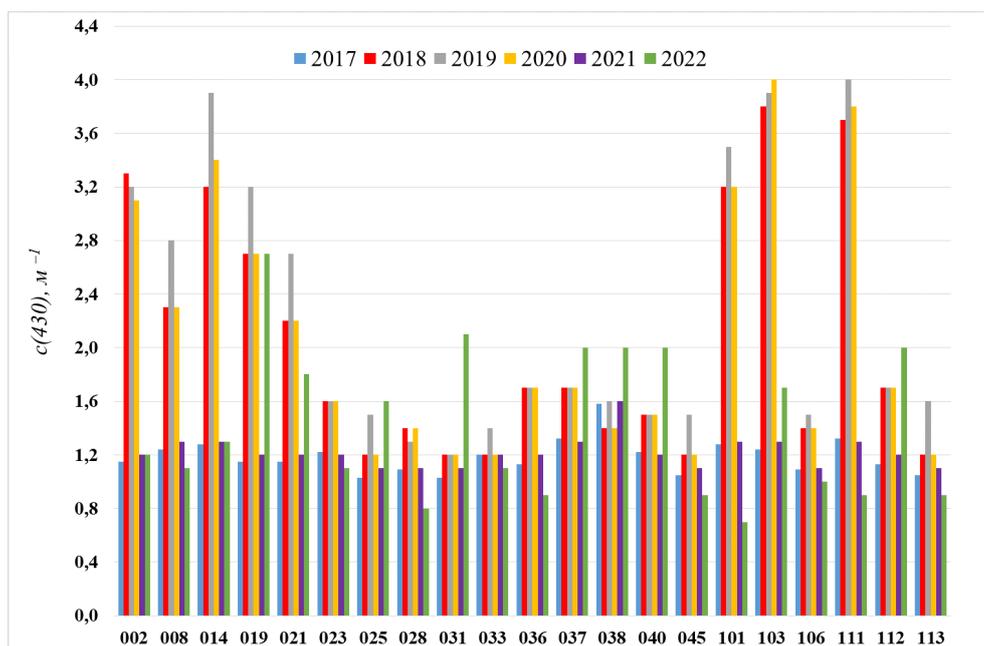


Рис.2. Многолетняя динамика показателя ослабления света на длине волн $\lambda = 430$ нм в различных точках Телецкого озера

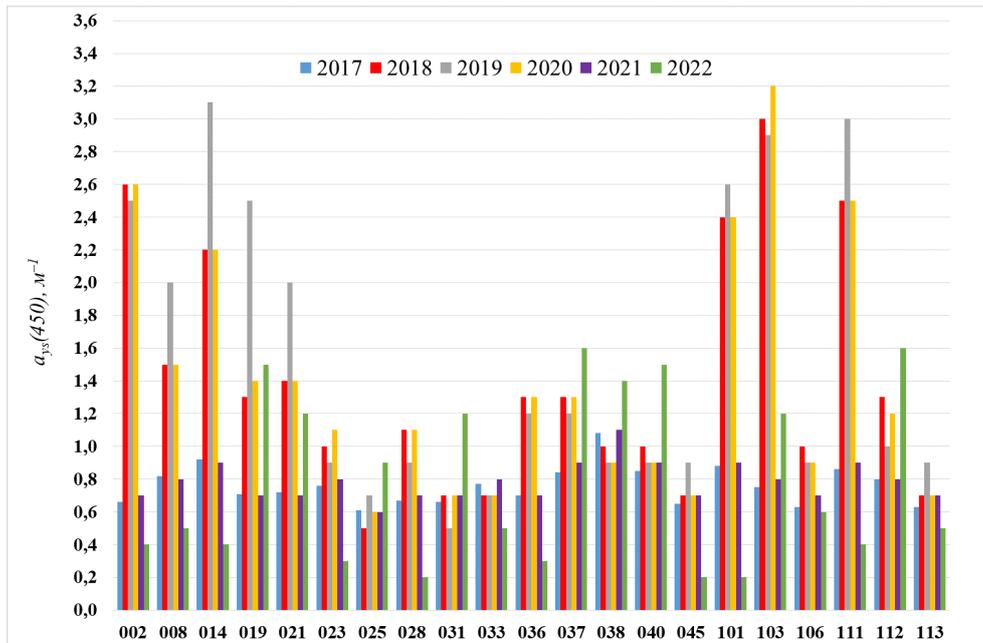


Рис.3. Многолетняя динамика показателя поглощения света жёлтым веществом на длине волны $\lambda = 450$ нм в различных точках Телецкого озера

пазоне $0,9\text{--}15,0$ г/м³ со средним значением $8,0$ г/м³ (Рис. 5). За последние два года исследований значения C_{chl-a} снизились ($0,9\text{--}7,1$ г/м³) до величин 2017 г. ($2,9\text{--}5,1$ г/м³).

В результате расчётов спектрального вклада оптически активных компонентов озёрной воды в спектральный показатель ослабления света $s(\lambda)$ для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают жёлтое вещество и взвесь.

В **2017 г.** максимальный вклад в показатель ослабления света вносит жёлтое вещество (ЖВ). Наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на литораль р. Камга (точка 038), где он составил 89,2%. На длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьировал в пределах от 60,0% (точка 111 – литораль р. Чулышман) до 83,3% (точка 038).

Взвесь (ВВ) даёт максимальный вклад в показатель ослабления при $\lambda = 430$ нм в точке 103 (литораль р. Кыга) и составляет 17,1%. Вклад взвеси возрастает до 28,1% (точка 111) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода (ЧВ) вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм на всех точках и составляет не более 0,4%, но резко увеличивается в длинноволновой области: до 18,8% при $\lambda = 550$ нм. Вклад хлорофилла (ХЛ) при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 0,6% (точка 037 – пелагиаль р. Камга) до 11,3% (точка 036 – пелагиаль р. Камга), при $\lambda = 550$ нм – от 0,1% (точка 037) до 2,6% (точка 002 – пелагиаль р. Чулышман).

В **2018 г.** наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиаль рек Камга (точка 036) и Чулышман (точка 002), где он составляет 94,1 и 90,9%, соответственно. При длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьирует в пределах от

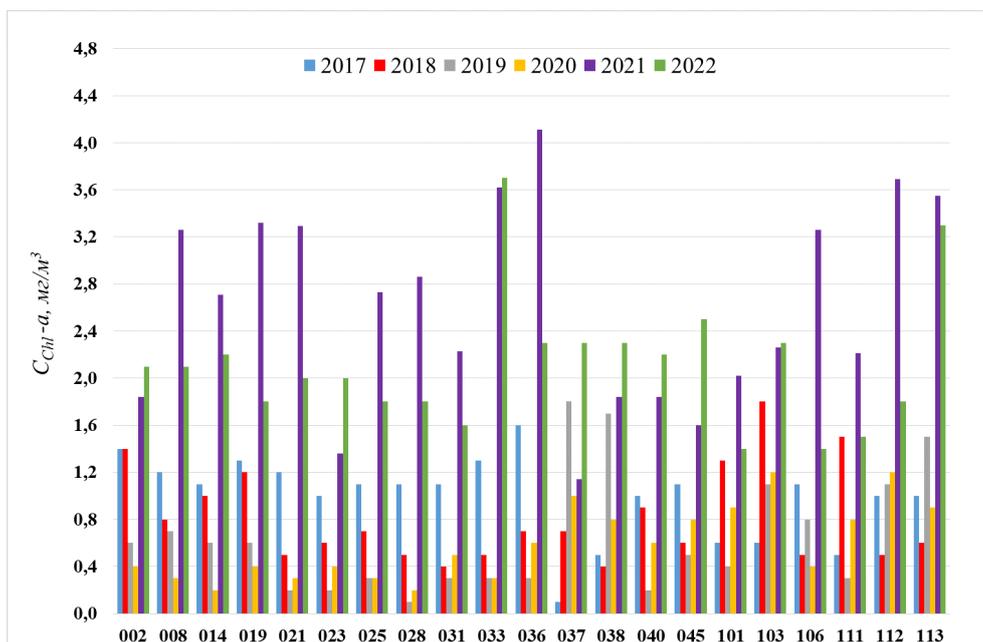


Рис.4. Многолетняя динамика концентраций хлорофилла-а в различных точках Телецкого озера

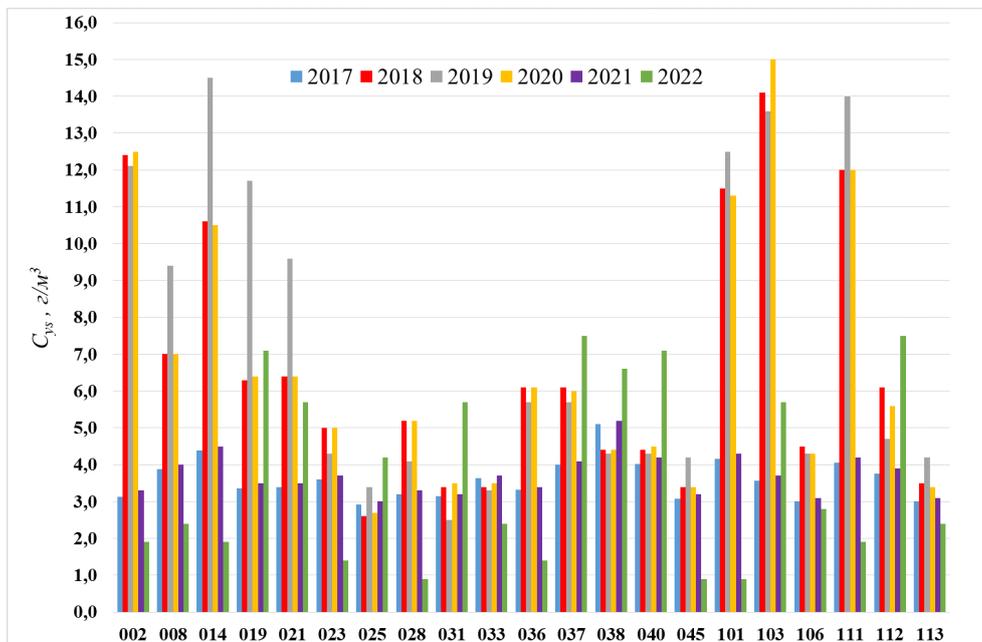


Рис.5. Многолетняя динамика концентрации жёлтого вещества в различных точках Телецкого озера

40,0% (точка 025 – пелагиаль р. Адамыш) до 91,3% (точка 103 – литораль р. Кыга). Взвесь даёт максимальный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм в точке 119 (пелагиаль м. Сыраку) и составляет 33,4%. Вклад взвеси возрастает до 47,8% (точка 025, пелагиаль р. Адамыш) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,4%, но этот вклад резко увеличивается в длинноволновой области – до 14,1% при $\lambda = 550$ нм. Вклад ХЛ при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 1,8% (точка 021 – пелагиаль р. Кокши) до 4,8% (точка 040 – пелагиаль п. Яйлю), при $\lambda = 550$ нм – от 0,3% (точка 021) до 1,2% (точка 040 – пелагиаль п. Яйлю).

В 2019 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиаль рек Чулюш, Кыга и Кокши, где он составляет 87,1, 85,7 и 85,1%, соответственно. На длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьирует в пределах от 50,0% (пелагиаль р. Б. Корбу и район Каменного залива, соответственно) до 95,4% (пелагиаль р. Чулюш). Взвесь даёт максимальный вклад в показатель ослабления света при $\lambda = 430$ нм в точке 025 (пелагиаль р. Адамыш) и составляет 31,5%. Вклад ВВ возрастает до 41,9% (точка 113 – пелагиаль Каменного залива) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,4%, но резко увеличивается в зелёной области спектра – до 14,1% при $\lambda = 550$ нм. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 0,6 до 8,5%, при $\lambda = 550$ нм – от 0,1% до 1,8%.

В 2020 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиальную часть рек Камга и Чулышман, где он составляет 94,1 и 93,5%, соответственно. На длине волны 550 нм вклад ЖВ варьирует в пределах от 40,0% (пелагиальная часть р. Адамыш) до 91,3% (литоральная часть р. Кыга). Взвесь даёт максимальный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм в точке 019 (пелагиальная часть

м. Сыраку) и составляет 32,1%. Вклад ВВ возрастает до 46,4% (точка 014 – пелагиальная часть р. Чулюш) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм на всех точках и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в зелёной области спектра – до 14,1%. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 0,5 до 6,0%, при $\lambda = 550$ нм – от 0,1% до 1,4%.

В 2021 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиальную и литоральную части реки Камга, где он составляет 85,8 и 75,0%, соответственно. При длине волны 550 нм вклад ЖВ варьирует в пределах от 29,6% (пелагиальная часть Каменного залива) до 67,0% (пелагиальная часть р. Камга). Взвесь даёт максимальный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм в точке 103 (литоральная часть р. Кыга) и составляет 21,4%. Вклад ВВ возрастает до 43,8% (точка 113 – пелагиальная часть Каменного залива) при $\lambda = 550$ нм. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 6,8 до 27,3%, при $\lambda = 550$ нм – от 1,4% до 7,8%. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в зелёной области спектра (при $\lambda = 550$ нм) – до 18,8%.

2022 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиальную часть рек Камга и Саймыш, где он составляет 90,0%. При длине волны 550 нм вклад ЖВ варьирует в пределах от 33,3% (пелагиальная часть р. Камга) до 88,8% (пелагиальная часть п. Яйлю). Взвесь даёт максимальный вклад в показатель ослабления света при $\lambda = 430$ нм в точке 014 (пелагиальная часть р. Чулюш) и составляет 40,3%. Вклад ВВ возрастает до 46,1% (точка 002 – пелагиальная часть р. Чулышман) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается при $\lambda = 550$ нм – до 28,2%. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм нахо-

дился в диапазоне от 3,2 до 29,3%, при $\lambda = 550$ нм – от 0,8% до 10,5%. Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад и составляет около 0,1%.

Таким образом, для вод Телецкого озера жёлтое вещество и взвесь оказались наиболее значимыми оптически активными компонентами, влияющие на суммарный показатель ослабления света.

Нужно отметить, что расчёты по спектральным вкладам основных оптически активных компонентов озёрной воды в спектральный показатель ослабления света $s(\lambda)$ для Телецкого озера за исследуемый период (2017–2022 гг.) были выполнены впервые, это подтверждает и анализ литературных данных.

Трофический статус Телецкого озера определяется лимноклиматом, характером водосборного бассейна и положением его над уровнем моря. Продолжительные периоды перемешивания водных масс и короткие периоды стратификации, поступление с горными речными притоками насыщенной кислородом воды, низкая температура воды на протяжении практически всего года, всё это способствует насыщению кислородом всей водной толщи, при этом у дна оно бывает даже выше, чем у поверхности.

В результате исследований трофический статус Телецкого озера можно охарактеризовать, в основном, как олиготрофный с элементами мезотрофии на участках впадения крупных рек.

По совокупности общих и специфических показателей, а именно, трофосапробности, минерализации и жёсткости воды, водородного показателя и наличию вредных веществ (ГОСТ, 1977), по количественным характеристикам гидробионтов (численности, биомассе и числу видов) вода Телецкого озера относится к классу «чистые воды», а по унифицированной экологической классификации поверхностных вод суши (Оксиук и др., 1993) – ещё и к разряду «очень чистые» и «вполне чистые».

4. Заключение

Таким образом, за период исследования 2017–2022 гг. Телецкого озера были собраны новые натурные данные по пространственно-временной изменчивости спектрального показателя ослабления света, спектрального показателя поглощения света жёлтым веществом, относительной прозрачности по белому диску Секки, концентраций хлорофиллов и жёлтого вещества для различных точек отбора проб. Применена модифицированная полуэмпирическая модель для описания спектрального вклада основных оптически активных компонентов природной воды в спектральный показатель ослабления света, учитывающая поглощение света терригенными и биогенными частицами. Исследования Телецкого озера летом показали отсутствие значительных изменений в многолетней динамике гидрооптических характеристик, что свидетельствует о сохранении олиготрофности экосистемы и высо-

кого качества воды Телецкого озера в условиях увеличения хозяйственной деятельности на водоёме и его водосборном бассейне. Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических характеристик при исследовании крупных озёр, водохранилищ и рек для наблюдения за неоднородностью уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворённых веществ и, следовательно, для контроля экологического состояния вод различного типа.

Благодарности

Благодарим старшего научного сотрудника лаборатории гидробиологии Е.Ю. Митрофанову и научного сотрудника гидрологии и геоинформатики К.В. Марусина за предоставленные данные измерений относительной прозрачности и отбор проб воды на озере в период исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ гос. регистрации проекта АААА-А17-117041210241-4) при содействии Программы поддержки флота.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Betancur-Turizo S.P., González-Silvera A.G., Santamaría-Del-Ángel E. et al. 2018. Variability in the light absorption coefficient by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of California. *Open Journal of Marine Science* 1: 20-37.
- Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 2: 361-369.
- Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A. et al. 2022. Spectral light absorption coefficient of particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics* 15 (3): 73-83.
- Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Latushkin A.A. et al. 2018. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 58-61. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-1-58](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-58)
- Dera J. 1992. *Marine Physics*. Warszawa. Amsterdam: Elsevier.
- Environment Canada: national guidelines and standards office. 2004. Water policy and coordination directorate. Canadian guidance framework for the management of phosphorus in freshwater system. Ottawa: National guidelines and standards office water policy and coordination directorate environment Canada.
- Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Shuchman R. et al. 2017. Bio-optical retrieval algorithm for the optically shallow waters of Lake Michigan. I. Model description and sensitivity/robustness assessment. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* 3: 79-92.
- Mobley C.D. 1994. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. San Diego: Academic Press.
- Nyquist G. 1979. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances. PhD Thesis. Dept. (Analytical and Marine Chemistry) Göteborg, Sweden.

Reinart A., Paavel B., Pierson D. et al. 2004. Inherent and apparent optical properties of Lake Peipsi, Estonia. *Boreal Environment Research* 9: 429-445.

Shi L., Mao Z., Wu J. et al. 2017. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu. *Water* 5: 352. DOI: [10.3390/w9050352](https://doi.org/10.3390/w9050352)

Slade W.H., Boss E. 2015. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size. *Applied Optics* 24: 7264-7277.

Woźniak S.B., Stramski D. 2004. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms. *Applied Optics* 17: 3489-3503.

Акулова О.Б. 2015. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоёмов (на примере озёр Алтайского края). Диссертация канд. техн. наук. Барнаул, Россия.

Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Михайлова Н.В. 2011. Особенности изменчивости распределений прозрачности и содержания взвешенного вещества в северо-западной части Чёрного моря в весенний период в связи с крупномасштабными 248 процессами в системе океан – атмосфера. *Метеорология и гидрология* 1: 64-77.

ГОСТ 17.1.1.04-77. 1977. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. Москва: Изд-во стандартов.

ГОСТ 17.1.4.02–90. 2003. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. Москва: Изд-во стандартов.

Ерлов Н.Г. 1980. Оптика моря. Ленинград: Гидрометеиздат.

Копелевич О.В., Шифрин К.С. 1981. Современные представления об оптических свойствах морской воды. Оптика океана и атмосферы. Москва: Наука.

Копелевич О.В. 1983. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды. Оптика океана. 1. Физическая оптика океана. (Под ред. А.С. Монины). Москва: Наука.

Корчемкина Е.Н., Латушкин А.А. 2016. Определение концентраций растворённого органического вещества и взвеси по спектральному показателю ослабления направленного света. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря 3: 44-48.

Кукушкин А.С. 2011. Многолетние измерения прозрачности в глубоководных и шельфовых районах Чёрного моря. Физические проблемы экологии 18: 219-231.

Левин И.М. 2014. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика* 3: 3-22.

Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И. и др. 1996. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х и начале 90-х годов. Препринт. Севастополь: Морской гидрофизический институт.

Маньковский В.И., Соловьев М.В., Маньковская Е.В. 2009. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины.

Маньковский В.И. 2011. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря. *Морской гидрофизический журнал* 5: 14-29.

Маньковский В.И. 2015. Жёлтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики. *Морской гидрофизический журнал* 3: 53-61.

Матюшенко В.А., Лукин Л.Р., Хоменко Г.Д. и др. 2001. Показатель ослабления света и его связи с гидрологическими характеристиками и содержанием взвешенного вещества в водах Баренцева моря. Опыт системных океанологических исследований в Арктике. (Под ред. А.Л. Лисицына, М.Е. Виноградова, Е.А. Романкевича). Москва: Научный мир.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. 1993. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. *Гидробиологический журнал* 4: 62-76.

Селегей В.В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я. и др. 2001. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера. Монография. Тервюрен. Бельгия: Королевский Музей Центральной Африки.

Селегей В.В., Селегей Т.С. 1978. Телецкое озеро. Ленинград: Гидрометеиздат.

Суторихин И.А., Акулова О.Б., Букатый В.И. и др. 2017. Определение трофического статуса пресноводных озёр Алтайского края в период 2013-2016 гг. по гидрооптическим характеристикам. *Известия Алтайского Государственного Университета* 1 (93): 58-61. DOI: [10.14258/izvasu\(2017\)1-10](https://doi.org/10.14258/izvasu(2017)1-10)

Шерстянкин П.П. 1993. Оптические структуры и фронты океанического типа на Байкале. Афтореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук. Москва, Россия.

Шифрин К.С. 1983. Введение в оптику океана. Ленинград: Гидрометеиздат.