

Спектральная подводная освещенность пресноводных водоемов на разных глубинах

И.А. Суторихин¹✉, И.М. Фроленков¹, С.А. Литвиненко¹, В.А. Соловьев^{2*}

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

Поступила в редакцию 8.08.2022 г.;
после доработки 26.06.2023 г.;
принята к печати 27.07.2023 г.

Приводятся результаты измерения спектральной подводной освещенности на различных глубинах в разнотипных внутриконтинентальных пресноводных озерах, включая Камгинский залив оз. Телецкое. Эксперименты проводились в летний и осенний периоды 2018 г. Приведены и описаны характеристики макета созданного устройства для определения спектральной подводной освещенности. В качестве световых селективных элементов использовались интерференционные светофильтры с максимумами пропускания в разных частях видимой области спектра на длинах волн 303, 361, 590 и 656 нм. Обнаружено, что большое количество гниющей на берегах и подтопленной в пелагиали залива Камга хвойной и лиственной древесины, выделяющей фенольные соединения, вызывает значительное ослабление света в поверхностном слое воды на длине волны 361 нм. Показано, что спектральная подводная освещенность существенно зависит от биомассы озерного фитопланктона.

Ключевые слова: спектральная подводная освещенность, поглощение света, рассеяние света, интерференционный светофильтр, прозрачность воды по белому диску, озера; underwater spectral irradiance, light absorption, light scattering, interference light filter, water transparency, Secchi depth, lake.

Введение

Подводная освещенность морей и океанов — важный вопрос гидрооптики. Ему посвящено довольно много отечественных и зарубежных статей и монографий. Обширный библиографический список по данной проблеме приведен в работе [1]. Однако публикаций о внутриконтинентальных водных объектах практически нет, за исключением оз. Байкал и Ладога [2–4].

Учитывая существенные различия в составе и гидрооптических параметрах морских и внутриконтинентальных вод, актуальной задачей является исследование с этих позиций и пресноводных водоемов. При распространении оптического излучения в реальных водных объектах, представляющих собой мутную поглощающую среду, выделяют два основных фактора ослабления света — поглощение и рассеяние. Поглощение обусловлено переходом световой энергии в другие формы энергии, а рассеяние света связано с отклонением световых лучей

во всевозможных направлениях из-за оптических неоднородностей, связанных с температурными флуктуациями плотности природной воды (упругое рассеяние света) и дифракцией на взвешенных частицах (гидрозолях). Характер рассеяния света зависит от размеров и формы рассеивающих частиц. В природе поглощение и рассеяние света происходят одновременно. Поэтому при распространении света в водной среде его ослабление обусловлено обоими процессами и, в зависимости от длины волны, несет информацию о гидрооптическом состоянии водного объекта.

Цель работы — получение и анализ количественных данных о распределении спектральной подводной освещенности на разных глубинах пресноводных водоемов летом и осенью.

Объекты исследования

Исследования проводились в летний и осенний периоды 2018 г. на пресноводном бессточном эвтрофном в летний период (согласно гидробиологической классификации продуктивности водоемов) оз. Красиловское (Алтайский край), слабопроточном пресноводном эвтрофном в летний период оз. Иткуль (Алтайский край) и заливе Камга олиготрофного оз. Телецкое (территория Алтайского

* Игорь Анатольевич Суторихин (sia@iwer.ru); Игорь Михайлович Фроленков (frolencov@mail.ru); Светлана Александровна Литвиненко (gsa@iwer.ru); Виталий Андреевич Соловьев (vsolovev@mail.ru).

природного биосферного заповедника). В составе фитопланктона оз. Красиловское ведущую позицию занимают зеленые водоросли Chlorophyta (51,1%) общего видового состава, далее следуют Cyanoprocarota (18,4%) [5].

Приборы и методы исследования

Для определения спектральной подводной освещенности на разных глубинах в видимом диапазоне длин волн был создан макет измерителя подводной освещенности, который состоял из двух блоков: герметичная цилиндрическая измерительная головка и блок обработки данных. Между собой блоки соединялись гибким экранированным многожильным кабелем длиной 10 м, по внешней поверхности размеченным с шагом 0,5 м, который одновременно служил измерителем глубины погружения измерительной головки. Внутри головки устанавливались сменные узкополосные спектральные элементы — интерференционные светофильтры диаметром 20 мм с паспортными характеристиками, приведенными в табл. 1, фоточувствительный элемент — фотодиод марки 555 AP с размером активной части 10×10 мм и чувствительностью в диапазоне длин волн 0,2–1,1 мкм. Оптическая схема прибора настраивалась на оптическом стенде Института автоматики и электрометрии СО РАН. Весь диапазон регистрируемых освещенностей на указанных длинах волн был проградуирован в процентах и разбит на три поддиапазона: 0–40, 40–70 и 70–100%. Минимально регистрируемая освещенность данным прибором для каждого из используемых интерференционных фильтров соответствовала 0,3 лк.

Таблица 1

Паспортные характеристики интерференционных светофильтров

λ , нм	$\Delta\lambda/0,5$, нм	$F_{\max}$, %
303	22	≥ 74
361	18	≥ 76
590	24	≥ 85
656	20	≥ 88

Примечание. λ — длина волны, соответствующая максимуму пропускания; $\Delta\lambda/0,5$ — полуширина пропускания на уровне 0,5; $F_{\max}$ — процент пропускания в максимуме.

Перед погружением измерительной головки в воду ее входное окно закрывалось откидной крышкой для устранения паразитной засветки фотодиода. На глубине 2–3 см от поверхности воды крышка открывалась и значение освещенности на каждой из регистрируемых длин волн принималось равным 100%. Далее, по мере погружения измерительного блока, регистрировались глубина и соответствующая величина спектральной подводной освещенности до значений, равных 0%.

Ослабление энергии потока солнечного излучения за счет рассеяния зависит от длины волны света. Оно обратно пропорционально четвертой степени длины световой волны для ультрафиолетовой и сине-зеленой частей спектра. В более длинноволновой области показатель рассеяния воды меняется обратно пропорционально длине волны. Поэтому в воде сильнее всего рассеиваются лучи зеленой и особенно синей части спектра с длиной волны менее 0,5 мкм. Суммарный эффект рассеяния каждым элементарным слоем представляет сложную картину многократного рассеяния световых лучей в толще воды.

В результате совместного эффекта поглощения и рассеяния света происходят ослабление светового потока и изменение его спектрального состава с глубиной, так как показатели поглощения и рассеяния различным образом зависят от длины волны.

Измерения в пелагиальной части водных объектов проводились с лодки в ясные безоблачные дни в период максимальной высоты Солнца — с 11:30 до 13:30 по местному времени. Волнение на водных объектах практически отсутствовало, скорость ветра составляла 0–3 м/с. Надводная освещенность, измеряемая люксметрами Ю-166 и Ю-117, соответствовала диапазону 11000–3000 лк. Одновременно регистрировались прозрачность воды по белому диску [6], метеоданные — с помощью автономной метеорологической станции АМК-03, температура воды до глубины 10 м от поверхности с шагом 0,5 м с помощью прибора ДИТЦ-10/0,5 [7]. Биомасса фитопланктона определялась весовым методом [8].

Результаты и обсуждение

В дистиллированной воде поглощение света в видимом диапазоне длин волн в области красного цвета в сотни раз больше, чем в сине-зеленой части, что связано с поглощением света собственно молекулами воды. В природной воде это процесс гораздо более сложный, ибо фотоны поглощаются не только молекулами, но и растворенными в воде веществами органического и неорганического происхождения. Особенно это присуще водам, содержащим большое количество «желтого вещества» [9], которое значительно изменяет спектральную кривую поглощения природной воды в синей области видимой части спектра [10]. Следующим по значимости фактором являются частицы гидрозолей — клетки фитопланктона с богатым видовым составом и частички отмерших организмов и взвесей, занесенные реками и ветром [5, 11, 12].

В табл. 2–6 приведены значения спектральной подводной освещенности E на разных глубинах z в исследуемых водных объектах, полученные из расчета функций $F(z) = -\ln[E(z, \lambda)/E(0, \lambda)]$. Функции $F(z)$ аппроксимировались прямыми линиями. Максимальное отличие графиков от линейной зависимости составляло $\sim 20\%$. По наклону прямых линий определялись значения спектрального показателя ослабления света $\alpha = dF(z, \lambda)/dz$.

Таблица 2

Зависимость спектральной подводной освещенности от глубины на оз. Иткуль (пелагиаль) в августе 2018 г.

z, м	λ , нм			
	303	361	590	656
0,0	100	100	100	100
0,5	72	92	98	97
1,0	41	85	91	88
1,5	31	62	83	80
2,0	18	48	65	74
2,5	10	31	54	65
3,0	5	20	42	60
3,5	0	12	31	52
4,0	0	6	26	41
4,5	0	2	19	32
5,0	0	0	14	24
5,5	0	0	10	10
6,0	0	0	8	6
6,5	0	0	6	0
7,0	0	0	4	0
7,5	0	0	2	0
8,0	0	0	0	0
α	0,98	0,82	0,48	0,41

Примечание. Время измерения 12:40 2.08.2018 г.; глубина видимости белого диска 2,8 м; температура воздуха 23,3 °С; температура поверхности воды 21,5 °С; средняя биомасса фитопланктона 3,5 г/м³.

Таблица 3

Зависимость спектральной подводной освещенности от глубины на оз. Иткуль (пелагиаль) в сентябре 2018 г.

z, м	λ , нм			
	303	361	590	656
0,0	100	100	100	100
0,5	64	84	92	97
1,0	31	48	84	88
1,5	9	22	76	80
2,0	0	11	61	74
2,5	0	5	52	65
3,0	0	0	44	60
3,5	0	0	31	52
4,0	0	0	27	28
4,5	0	0	19	15
5,0	0	0	12	8
5,5	0	0	8	0
6,0	0	0	4	0
6,5	0	0	2	0
7,0	0	0	0	0
α	1,59	1,25	0,56	0,44

Примечание. Время измерения 11:40 10.09.2018 г.; глубина видимости белого диска 1,7 м; температура воздуха 15,3 °С; температура поверхности воды 13,2 °С; средняя биомасса фитопланктона 4,8 г/м³.

Из анализа данных по распределению спектральной подводной освещенности на разных глубинах оз. Красиловское и Иткуль в летний и осен-

Таблица 4

Зависимость спектральной подводной освещенности от глубины на оз. Красиловское (пелагиаль) в августе 2018 г.

z, м	λ , нм			
	303	361	590	656
0,0	100	100	100	100
0,5	62	87	94	95
1,0	49	64	83	84
1,5	20	21	76	72
2,0	8	12	59	59
2,5	0	4	41	45
3,0	0	0	29	28
3,5	0	0	18	15
4,0	0	0	10	9
4,5	0	0	5	4
5,0	0	0	3	0
5,5	0	0	0	0
α	1,23	1,32	0,71	0,69

Примечание. Время измерения 12:30 3.08.2018 г.; глубина видимости белого диска 1,3 м; температура воздуха 21,6 °С; температура поверхности воды 19,2 °С; средняя биомасса фитопланктона 5,6 г/м³.

Таблица 5

Зависимость спектральной подводной освещенности от глубины на оз. Красиловское (пелагиаль) в октябре 2018 г.

z, м	λ , нм			
	303	361	590	656
0,0	100	100	100	100
0,5	58	81	91	93
1,0	42	58	79	82
1,5	18	18	65	69
2,0	0	9	51	54
2,5	0	0	31	39
3,0	0	0	19	21
3,5	0	0	8	10
4,0	0	0	4	5
4,5	0	0	0	0
α	1,17	1,55	0,89	0,83

Примечание. Время измерения 11:30 10.10.2018 г.; глубина видимости белого диска 1,0 м; температура воздуха 14,3 °С; температура поверхности воды 11,1 °С; средняя биомасса фитопланктона 8,4 г/м³.

ний периоды 2018 г. можно заключить, что с увеличением биомассы фитопланктона и уменьшением уровня воды в осенний период глубина распространения света на исследуемых длинах волн уменьшилась в среднем на 0,5 м. Сопоставление результатов измерения прозрачности воды озер по белому диску с распределением спектральной подводной освещенности показывает их отрицательную корреляцию.

В заливе Камга обнаружено аномально высокое ослабление света на длине волны 361 нм, что можно объяснить большим количеством гниющей

Таблица 6
Зависимость спектральной подводной освещенности от глубины в заливе Камга оз. Телецкое (пелагиаль) в августе 2018 г.

z, м	λ , нм			
	303	361	590	656
0,0	100	100	100	100
0,5	87	44	85	97
1,0	64	11	66	88
1,5	54	4	54	80
2,0	35	0	44	74
2,5	22	0	35	65
3,0	12	0	22	60
3,5	7	0	16	52
4,0	0	0	11	41
4,5	0	0	7	32
5,0	0	0	3	22
5,5	0	0	0	10
6,0	0	0	0	8
6,5	0	0	0	4
7,0	0	0	0	2
7,5	0	0	0	0
α	0,77	2,21	0,65	0,40

Примечание. Время измерения 11:30 16.08.2018 г.; глубина видимости белого диска 6,5 м; температура воздуха 21,5 °С; температура поверхности воды 17,2 °С.

на берегах и подтопленной в пелагиали залива хвойной и лиственной древесины, которая, как отмечено в [13], выделяет, в числе прочих, значительное количество фенольных соединений, что было подтверждено результатами гидрохимических исследований [14].

Заключение

В результате проведенных исследований получены количественные данные о распределении спектральной подводной освещенности на различных глубинах в разнотипных внутриконтинентальных пресноводных озерах на длинах волн 303, 361, 590 и 656 нм. Установлено, что изменение спектральной подводной освещенности с глубиной на отдельных длинах волн в эвтрофных озерах в летний и осенний периоды года существенно влияет на глубину фотического слоя, определяемую, как правило, по удвоенной глубине видимости белого диска. Значительное ослабление света на длине волны 361 нм в пелагиали залива Камга обусловлено большим количеством гниющей на берегах и подтопленной хвойной и лиственной древесины, выделяющей фенольные соединения при разложении в воде.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетных проектов № 134.1.1 «Поверхностные и подземные воды суши — ресурсы и качество, процессы формирования, динамика и механизмы природных и антропогенных изменений; стратегия водообеспечения и водопользования страны» и № 0306-2021-0001 «Исследование разнообразия

и структурно-функциональной организации водных экосистем для сохранения и рационального использования водных и биологических ресурсов Западной Сибири».

Список литературы

1. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Спектральные связи гидрооптических характеристик в прибрежных водах Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 65–79.
2. Науменко М.А. Пространственное распределение и многолетние тренды прозрачности Ладожского озера // Ладога. СПб: Ин-т озероведения РАН, 2013. С. 217–223.
3. Шерстянkin П.П., Калинин В.М., Максимов В.Н. Вертикальное распределение прозрачности в подледный период на Байкале и ее связь с биологическими показателями // Гидробиологический журн. 1972. Т. 8, № 4. С. 65–68.
4. Маньковский В.И. Оценка концентрации общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в озере Байкал по глубине видимости белого диска // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 313–316; *Mankovsky V.I.* Estimation of the total concentration of suspended matter and its organic and mineral fractions in Lake Baikal by the secchi disk // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 502–506.
5. Vinokurova G.V., Sutorikhin I.A., Kolomeitsev A.A., Frolenkov I.M. comparative analysis of ecological state of winter and summer phytoplankton in drainless mesotrophic lake (Altai Krai, Russia) // Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci. 2018. V. 9, N 5. P. 1285–1297.
6. Третьяков В.Ю. Полевые экологические исследования (Водные объекты): метод. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2006. 32 с.
7. Зуев В.В., Кураков С.А., Суторихин И.А., Шелехов А.П., Залаева У.И. 2014. Автономный многоканальный измерительный комплекс для регистрации метеорологических и гидрофизических параметров. Измерение, контроль, информатизация // Матер. XV междунар. науч.-техн. конф. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 186 с.
8. Плотников Г.К., Пескова Т.Ю., Шкуте А., Путина А., Путиных М. Сборник классических методов гидробиологических исследований для использования в аквакультурах. Латвия: Академическое изд-во Даугавпилсского ун-та «Сауле», 2017. 282 с.
9. Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф., Акулова О.Б. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 162 с.
10. Копелевич О.В. Физическая модель поглощающих свойств // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Мониной. М.: Наука, 1983. 228 с.
11. Дрюкер В.В. Автохтонные бактериофаги и бактериопланктон в водоемах Хусугул — Байкал — Ангара-Енисейской гидросистемы // Междунар. конф. «Пресноводные экосистемы — современные вызовы»: Тезисы доклада и стендовых сообщений. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2018. С. 45–47.
12. Кириллова Т.В. Пигментные характеристики фитопланктона Телецкого озера: дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2006. 220 с.

13. Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Николенько Н.А. Микелиз древесины, как метод ее де-лигнификации. Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 6. С. 110–115.

14. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Республики Алтай в 2019 г. / под ред. Ю.В. Роберту-са. Горно-Алтайск: Правительство Республики Алтай, 2020. 120 с.

I.A. Sutorikhin, I.M. Frolenkov, S.A. Litvinenko, V.A. Soloviev. Underwater spectral irradiance of fresh-water reservoirs.

The results of measurement of underwater spectral irradiance at various depths in different types of intracontinental freshwater lakes, including the Kamginsky Bay of Lake Teletskoye, are presented. The measurements were carried out in summer and autumn 2018. The device for measuring the underwater spectral irradiance is described. Interference light filters with transmission maxima in different parts of the visible spectrum at wavelengths of 303, 361, 590, and 656 nm were used as light selective elements. An abnormally high absorption of light at a wavelength of 361 nm was detected in the pelagial of the Kamga Bay (territory of the Altai State Natural Biosphere Reserve), which is explained by the large amount of coniferous and deciduous wood rotting on the shores and flooded in the pelagial of the Bay and releasing phenolic compounds. The found dependence of the underwater spectral irradiance on depth is presented in the tabular form. It is shown that the underwater spectral irradiance significantly depends on the biomass of lake phytoplankton.