

Научная статья

УДК 535.3:551.46.07

DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-05

Минимизация внешних влияющих факторов при измерении спектральной подводной освещенности пресноводных водоемов

Игорь Анатольевич Суторихин¹, Виталий Андреевич Соловьев²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия, kuchuk-54@mail.ru

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, solvitali@mail.ru

Original article

Minimization of External Influence Factors when Measuring the Spectral Underwater Illumination of Freshwater Reservoirs

Igor A. Sutorikhin¹, Vitaliy A. Solov'ov²

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia, kuchuk-54@mail.ru

²Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, solvitali@mail.ru

Аннотация. В ходе комплексных экспедиционных работ на Телецком озере в августе 2024 г. проводились исследования спектральной подводной освещенности на разных глубинах нескольких участков акватории при помощи разрабатываемого измерительного комплекса. В процессе обработки данных на результаты измерений было обнаружено влияние таких внешних факторов, как облачность, атмосферная дымка и ветровое волнение поверхности. Первые два внешних фактора удастся минимизировать за счет использования двух боксов комплекса — приповерхностного и погружаемого. Бокс, постоянно находящийся у поверхности, учитывает изменение облачности и дымки, что отражается при расчете волнения и можно оценивать по измеренным значениям освещенности на глубине. Для учета слабого поверхностного волнения предложены оптимальный вариант выбора длительности измерений и статистический подход к обработке данных. Приведены результаты статистической обработки измеренных значений спектральной подводной освещенности на длинах волн 459 нм, 616 нм и 655 нм для разных по длительности серий экспериментов. Предложен вариант оценки периодичности волнения по измеренным значениям освещенности.

Ключевые слова: спектральная подводная освещенность, статистическая обработка, измерительный комплекс, Телецкое озеро

Abstract. Spectral underwater illumination at different depths of several sections of Lake Teletskoye water area was studied during the complex expeditionary work in August 2024 using the measuring complex currently under development. When processing the measured data, it is discovered that external factors like cloudiness, atmospheric haze, and wind-induced surface waves impact the measurements. The influence of the first two factors can be minimized using two measuring boxes — near-surface and submersible — of the developing complex. The near-surface box registers changes in clouds and atmospheric haze and provides the corrections to calculations of the disturbance and measurements of illumination at depths. The impact of weak wind-induced water surface disturbance can be reduced by considering the optimal measurement duration and statistical approach to measured data processing proposed in the paper. The results of statistical processing of the measured values of spectral underwater illumination at wavelengths of 459nm, 616nm, and 655nm for different series of conducted experiments are presented. The approach to estimate the frequency of water surface disturbance based on the measured illumination values is also proposed.

Keywords: spectral underwater illumination, statistical processing, measuring complex, Teletskoye Lake

Для цитирования: Суторихин И.А., Соловьев В.А. Минимизация внешних влияющих факторов при измерении спектральной подводной освещенности пресноводных водоемов // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 4 (144). С. 40–45. DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-05.

For citation: Sutorikhin I.A., Solovyov V.A. Minimization of External Influence Factors When Measuring the Spectral Underwater Illumination of Freshwater Reservoirs. *Izvestiya Altai State University*. 2025. No 4 (144). P. 40–45. DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-05.

Введение

В изучении распределения солнечного излучения на разных глубинах водоемов, что в итоге определяет так называемый фотический слой [1, 2], существенное влияние на результаты оказывают такие внешние факторы, как облачность, атмосферная дымка и ветровое волнение поверхности [3]. Облачность и атмосферная дымка изменяют интенсивность и спектральный состав солнечного излучения. Ветер создает зыбь, рябь, волны различной частоты на поверхности воды [4], которые в определенной степени изменяют коэффициент отражения солнечного света, что в итоге влияет на процесс измерений. Как отмечено в [5–8], влияние ветрового волнения особенно заметно в приповерхностном слое, а с глубиной ослабевает за счет рассеивающего действия водной толщи.

Накопленный экспедиционный опыт проведения измерений спектральной подводной освещенности на разных глубинах пресноводных водоемов в условиях изменения указанных внешних факторов позволил сформулировать предложения по минимизации их влияния, основанные на статистической обработке результатов измерений, а также рекомендации по совершенствованию измерительного комплекса.

Описание измерительного комплекса

Измерительный комплекс состоит из двух погружаемых боксов с установленными в них интерференционными светофильтрами на поворотных ба-

рабанах. Солнечный свет проникает внутрь боксов через прозрачное входное окно, проходит через интерференционный светофильтр, посредством которого выделяется узкий спектральный участок, и регистрируется фотоприемником. Один бокс постоянно находится у поверхности с целью контроля изменения интенсивности солнечного излучения вследствие различной облачности, волнения и дымки. Второй бокс постепенно погружается на определенную глубину. Более подробно состав и устройство комплекса представлены в работе [9].

Проведение измерений

Исследования проводились в экспедиции на озере Телецком в августе 2024 г. В качестве примера приведены результаты измерения спектральной подводной освещенности в Камгинском заливе (03.08.24 с 12 до 13 ч местного времени) на станции с координатами 51.77324 с.ш., 87.67678 в.д. Метеоусловия при проведении измерений: скорость ветра 1.5–2.5 м/с; температура воздуха — 23 °С; поверхностная температура воды — 20 °С; слабое волнение.

В качестве характеристики поверхностного волнения выбирался период волн [10, 11], который оценивался по фотографиям, сделанным в ходе измерений, относительно размеров поверхностного бокса. Для этого на фотоизображение наносился масштаб, кратный 1 см, в качестве штриховой меры. Расчетные значения периода волн находились в интервале от 3,5 до 4,0 с (рис. 1).

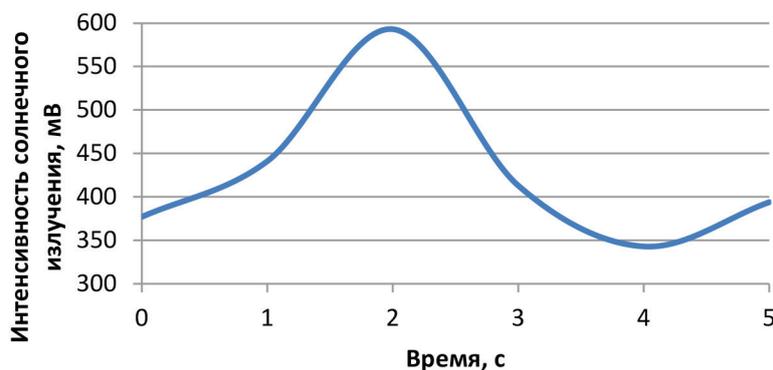


Рис. 1. Изменение интенсивности солнечного излучения за один период волнения водной поверхности на длине волн 616 нм на глубине 3–5 см под водой

С целью определения степени влияния поверхностного волнения и выбора оптимального времени регистрации проводились серии измерений с дли-

тельностью 1, 2, 4 и 5 с на каждой глубине для каждого спектрального диапазона. Минимальный цикл измерения составляет 0.5 с для одного светофильтра

и включает в себя 200 измерений значений освещенности. Таким образом, для выбора оптимального времени измерения статистическая обработка проводилась по 400, 800, 1600 и 2000 измеренным значениям на каждом интерференционном светофильтре на соответствующей глубине.

Проведена проверка нормальности закона распределения полученных величин из результатов эксперимента на каждой глубине для определенной длины волны. В связи с этим были вычислены показатели асимметрии (А) и эксцесса (Е), используя встроенные функции СКОС и ЭКСЦЕСС программы Excel. Рассчитаны выборочные ошибки показателя асимметрии и эксцесса по формулам [12]:

$$S_A = \sqrt{\frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}}, \quad (1)$$

$$S_E = \sqrt{\frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n-1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}}, \quad (2)$$

где n — число наблюдений.

Показатели асимметрии и эксцесса меньше величины рассчитанной ошибки, что позволяет говорить о соответствии полученных значений нормальному распределению (табл. 1).

Таблица 1

Результаты вычисления показателей асимметрии и эксцесса

Показатель	Глубина, м													
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Асимметрия	-0.18	-0.25	0.91	-0.15	0.79	0.25	0.8	0.76	0.88	0.51	0.17	-0.42	0.55	0.73
Ошибка асимметрии	0.98													
Эксцесс	-0.47	-0.91	-0.39	0.86	-0.6	-0.21	0.39	0.89	-0.33	-0.34	-0.22	0.67	-0.14	0.85
Ошибка эксцесса	1													

С целью оценки результатов измерений произведем расчет среднего квадратичного отклонения (СКО), которое количественно характеризует разброс экспериментальных данных относительно центра распределения — среднего значения [11].

В таблицах 2–4 приведены результаты измерений до глубины 11 м спектральной подводной освещенности и СКО на длинах волн 459 нм, 616 нм и 655 нм соответственно. Значение освещенности у поверхности принималось за 100 %.

Обсуждение результатов

Наименьшие значения СКО получены для серии измерений с длительностью 1 с, что отражается в результатах, приведенных в таблицах 2–4, когда вре-

мя измерения меньше периода волнения водной поверхности. Соответственно, данная серия не может быть использована для оценки измеряемого параметра и приведена здесь в качестве примера. Однако для данной серии в значениях СКО выделяются и явные несоответствия, по которым ее можно отличить от остальных. Например, для серии измерений с длительностью 1 с на длине волны 655 нм на глубине 1,5 м значение СКО равно 8,8 %, что выше всех остальных значений для других серий, а также существенно отличается от результатов, полученных на других глубинах для данной серии (примерно в 6 раз выше значения, полученного у поверхности, которое наиболее подвержено влиянию периода волны).

Таблица 2

Результаты вычисления среднего значения и среднего квадратичного отклонения для измеренных значений спектральной подводной освещенности на длине волны 459 нм

Время измерений, с	Хар-ки выборки	Глубина, м													
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
1	Среднее значение	100	85,6	70,7	55,3	43,7	24,6	12,5	8,3	3,6	2,8	1,8	1,6	1,4	1,2
	СКО	4,8	3,8	3,4	5,5	1,4	0,3	0,7	0,5	0,2	0	0	0	0	0
2	Среднее значение	100	78,4	62,7	58,5	43,7	24,6	11,7	8	3,6	2,8	1,8	1,6	1,4	1,2
	СКО	4,8	6,3	7,9	0,9	1,4	0,3	0,4	0	0,1	0	0	0	0	0
4	Среднее значение	100	75,1	60,8	54,1	42,2	22,3	11,2	7,9	3,7	2,8	1,8	1,6	1,4	1,2
	СКО	4,3	8,1	7,3	3,8	1,1	0,8	0,6	0,1	0,3	0	0	0	0	0
5	Среднее значение	100	86,9	66,7	55,5	44,1	22,9	11,3	7,9	3,8	2,8	1,8	1,6	1,4	1,2
	СКО	4,1	5,6	8,2	4,1	1,4	1	0,7	0,1	0,2	0	0	0	0	0

Таблица 3

Результаты вычисления среднего значения и среднего квадратичного отклонения для измеренных значений спектральной подводной освещенности на длине волны 616 нм

Время измерений, с	Хар-ки выборки	Глубина, м													
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
1	Среднее значение	100	66,9	67,3	46	5,7	5,2	2,9	2,1	1,9	1,2	0,9	0,6	0,5	0,4
	СКО	11,1	1,7	1,1	0,8	0,5	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Среднее значение	100	76,3	64,7	47,3	5,7	4,9	2,9	2,1	1,8	1,1	0,8	0,5	0,4	0,3
	СКО	7,8	11,2	4,1	2,6	0,5	0,2	0	0,1	0	0	0	0	0	0
4	Среднее значение	100	76	59,1	48	5,6	4,8	2,8	2,1	1,9	1,2	0,9	0,6	0,5	0,4
	СКО	7,6	3,2	3	1,9	0,4	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0
5	Среднее значение	100	60,8	52,1	44,9	4,6	3,9	2,3	1,6	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2
	СКО	7,9	2,3	4,5	2,4	0,3	0,3	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0

Таблица 4

Результаты вычисления среднего значения и среднего квадратичного отклонения для измеренных значений спектральной подводной освещенности на длине волны 655 нм

Время измерений, с	Хар-ки выборки	Глубина, м													
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
1	Среднее значение	100	59,9	51,7	59,6	5,4	2,5	1,7	1,2	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1
	СКО	1,4	0,3	0	8,8	0,3	0,1	0,2	0,1	0	0,1	0	0	0	0
2	Среднее значение	100	60,9	52,8	51	5,3	2,6	2,2	1,2	1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1
	СКО	5,1	1,2	0,4	6,6	0,1	0,1	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0
4	Среднее значение	100	60,5	53,6	51,1	5,5	2,8	2,1	1,3	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
	СКО	4,1	0,3	0,3	7,4	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0	0
5	Среднее значение	100	62,3	55,9	42	5,3	2,6	2,2	1,3	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
	СКО	5,7	0,9	1,4	5,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0

Наименьшие значения СКО среди всех серий, принятых к оценке измеряемого параметра, а также соответствующих и кратных периоду волнения, получены для длительности 4 с. Таким образом, можно заключить, что именно данная серия наиболее точно отражает результаты измерения спектральной подводной освещенности, что подтверждается расчетом периода волнения, выполненным по фотоизображениям поверхностных волн. В перспективе для других параметров поверхностных волн можно рекомендовать выбор оптимального времени измерения спектральной подводной освещенности на соответствующей глубине — не менее их периода.

Заключение

В качестве максимальной амплитуды волны водной поверхности предлагаем использовать глубину погружения поверхностного бокса. В наших исследованиях такая глубина соответствует 3–10 см относительно поверхностной толщи. Соответственно, при больших значениях амплитуды бокс будет подниматься над поверхностью воды. В случае погружения бокса на более значительную глубину воздействие поглощения и рассеивания воды для некоторых спектральных диапазонов значительно, что отражается на результатах измерения. Таким образом, при проведении измерений амплитуда (вершина гребня) волны не может быть более 10 см (рис. 2).

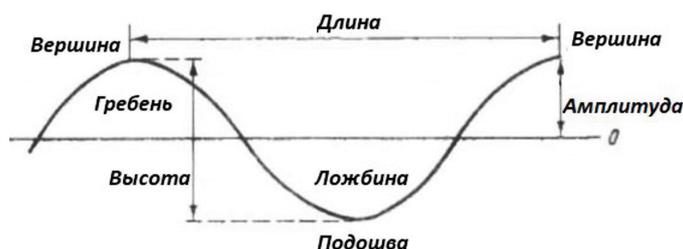


Рис. 2. Основные элементы волн [4]

С целью обеспечения достоверности результатов экспериментов предлагаем использовать дополнительный канал измерения характеристик волны: амплитуды и периода. Канал позволит синхронизировать время измерения кратно периоду волнения водной поверхности и ввести ограничения по амплитуде волны, что поможет исключить измерения при волнах большой амплитуды, превышающих глубину погружения датчика. В качестве такого измерительного канала возможно использование как отдельного модуля в составе комплекса, так и внесение изменений в предложенную конструкцию поверхностного датчика. Также предлагаем производить непрерывный расчет измерительным комплексом СКО в процессе сбора данных в реальном времени, что позволит связать периодичность поверхностных волнений воды и распределение СКО в течение времени накопления мгновенных значений.

В части модернизации комплекса предлагаем использовать сигнал поверхностного бокса в качестве опорного. Периодичность волнения можно оценивать по измеренным значениям освещенности, анализируя ее изменение относительно некоторого среднего значения, выделяя нижнюю и верхнюю полуволны сигнала, получаемого по измеренным значениям освещенности за некоторый промежуток времени. Оценку можно проводить при помощи интегрирования площади полуволн, вычитая одну из другой таким образом, чтобы разность давала в результате ноль \pm погрешность измерения. Либо отслеживать изменение направления сигнала и переход (превышение или понижение) измеренного значения относительно среднего. Аналогичные вычисления должны выполняться на погружаемом датчике, синхронизируясь с поверхностным по времени измерения.

Библиографический список

1. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2007. 395 с.
2. Соколов О.Н. О подводной освещенности // Труды ВНИРО. 1958. Т. 36. С. 295–303.
3. Суторихин И.А., Литвиненко С.А. Изменение спектральной прозрачности и подводной освещенности воды Телецкого озера в летний период и период ледостава // Естественные и технические науки. 2019. № 12. С. 221–224.
4. Васильев К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состояния моря. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 231 с.
5. Ерлов Н. Оптическая океанография. М.: МИР, 1970. 224 с.
6. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Способ оценки показателя вертикального ослабления нисходящей облученности по показателю ослабления света в водах Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17. № 3. С. 84–90. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-7
7. Монин А.С. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 378 с.
8. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. М.: ЛЕНАНД, 2021. 280 с.
9. Суторихин И.А., Соловьев В.А., Кривообоков Д.Е. Измерительный комплекс для оценки спектральной подводной освещенности на разных глубинах водоемов // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 4 (138). С. 42–48. DOI: 10.14258/izvasu(2024)4-05.
10. Ogashawara I. Terminology and Classification of Bio-Optical Models // Remote Sensing Letters. 2015. № 6 (8). P. 613–617.
11. Vos R.J., Hakvoort J.H.M., Jordans R.W.J., Ibelings B.W. Multiplatform Optical Monitoring of Eutrophication in Temporally and Spatially Variable Lakes // Science of the Total Environment. 2003. 312. P. 221–243.
12. Орлов В.Ю., Волков Е.М. Основы статистической обработки результатов научного эксперимента. Метод. указания Яросл. гос. ун-та им. П.Г. Демидова. Ярославль: ЯрГУ, 2014. 68 с.

References

1. Kitaev S.P. *Fundamentals of Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists*. Petrozavodsk: KSC RAS, 2007. 395 p. (In Russ.).
2. Sokolov O.N. On Underwater Illumination. *Proceedings of VNIRO*, 1958. Vol.36. P. 295–303. (In Russ.).
3. Sutorikhin I.A., Litvinenko S.A. Change in Spectral Transparency and Underwater Illumination of Lake Teletskoye in the Summer and the Period of Ice. *Natural and Technical Sciences*. 2019. No12. P. 221–224. (In Russ.).
4. Vasiliev K.P. *What a Skipper Should Know about Weather Maps and Sea Conditions*. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1980. 231 p. (In Russ.).
5. Yerlov N. *Optical Oceanography*. Moscow: MIR, 1970. 224 p. (In Russ.).
6. Mankovsky V.I., Mankovskaya E.V. A Method for Estimating the Indicator of Vertical Attenuation of Downward Irradiation by the Indicator of Light Attenuation in the Waters of the Black Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024. Vol. 17. No 3. P. 84–90. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(3\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(3)-7)
7. Monin A.S. *Optics of the Ocean. Vol.1. Physical Optics of the Ocean*. M.: Nauka, 1983. 378 p. (In Russ.).

8. Shifrin K.S. *Introduction to Ocean Optics*. Moscow: LENAND, 2021. 280 p. (In Russ.).
9. Sutorikhin I.A., Solovyov V.A., Krivobokov D.E. Measuring Complex for Estimating Spectral Underwater Illumination at Different Depths of Reservoirs. *Izvestiya Altai State University*. 2024. No 4 (138). P. 42–48. DOI: [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2024\)4-05](https://doi.org/10.14258/izvasu(2024)4-05). (In Russ.).
10. Ogashawara I. Terminology and Classification of Bio-Optical Models. *Remote Sensing Letters*. 2015. No 6 (8). P. 613–617.
11. Vos R.J., Hakvoort J.H.M., Jordans R.W.J., Ibelings B.W. Multiplatform Optical Monitoring of Eutrophication in Temporally and Spatially Variable Lakes. *Science of the Total Environment*, 2003. Vol. 312. No 1-3. P. 221–243.
12. Orlov V.Yu., Volkov E.M. Fundamentals of Statistical Processing of the Results of a Scientific Experiment. *Method. Instructions of Yaroslav State University Named after P. G. Demidov*. Yaroslavl: YarGU, 2014. 68 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И.А. Суторихин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия;

В.А. Соловьев, старший преподаватель кафедры информационных технологий, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия.

Information about the authors

I.A. Sutorikhin, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia;

V.A. Solov'ov, Senior Lecturer of the Department of Information Technologies, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.