

Научная статья

УДК 551.46.07

DOI: 10.14258/izvasu(2024)4-05

### **Измерительный комплекс для оценки спектральной подводной освещенности на разных глубинах водоемов**

*Игорь Анатольевич Суторихин<sup>1</sup>, Виталий Андреевич Соловьев<sup>2</sup>,*

*Дмитрий Евгеньевич Кривобоков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия, kuchuk-54@mail.ru

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

<sup>3</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, dmitriikrivobokov@mail.ru

Original article

### **Measuring Complex for Assessment of Spectral Underwater Illumination at Different Depths of Water Reservoirs**

*Igor A. Sutorikhin<sup>1</sup>, Vitaliy A. Solov'ov<sup>2</sup>, Dmitry E. Krivobokov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Altai State University, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia, kuchuk-54@mail.ru

<sup>2</sup>Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, solvitali@mail.ru

<sup>3</sup>Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, dmitriikrivobokov@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены факторы ослабления света, влияющие на гидрооптическое состояние водного объекта. Приведена структура измерительного комплекса, состоящего из двух герметичных погружаемых измерительных боксов и одного непогружаемого устройства, находящегося на поверхности, для контроля спектральной подводной освещенности. Описаны принцип работы измерительного комплекса и способ измерения спектральной подводной освещенности. Разработана математическая модель расчета ослабления интенсивности солнечного света под водой. Приводятся результаты измерений спектральной подводной освещенности на различных глубинах нескольких участков акватории Телецкого озера в летний период 2023 г. В качестве световых селективных элементов использовались интерференционные светофильтры с максимумами пропускания в разных частях видимой области спектра на длинах волн: 433, 445, 655, 670 и 780 нм. Выполнена оценка влияния слабого волнения водной поверхности на результаты измерений спектральной подводной освещенности.

**Ключевые слова:** спектральная подводная освещенность, гидробионты, интерференционный светофильтр, измерительный комплекс, пресноводные водоемы, экологический мониторинг

**Abstract.** The paper studies the factors of light attenuation affecting the hydro-optical condition of a water reservoir. The proposed measuring complex for effective monitoring of spectral underwater illumination consists of two sealed submersible measuring boxes and one non-submersible device located on the water surface. Operating principles and a method for measuring spectral underwater illumination are described, along with the developed mathematical model for calculation of the sunlight intensity attenuation underwater. The measurement results of spectral underwater illumination at various depths of several sections of the Teletskoye Lake water area in the summer of 2023 are presented. The measuring complex uses interference light filters with transmission maxima in different parts of the visible spectrum at wavelengths of 433, 445, 655, 670, and 780 nm as light selective elements. The influence of a water surface weak disturbance on spectral underwater illumination measurements is analyzed and evaluated.

**Keywords:** spectral underwater illumination, hydrobionts, interference light filter, measuring complex, freshwater reservoirs, environmental monitoring

**Для цитирования:** Суторихин И.А., Соловьев В.А., Кривобоков 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.

### Введение

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 по всевозможным направлениям 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 процессы поглощения и рассеяния света действуют одновременно. Поэтому при прохождении света в водной среде его ослабление будет происходить за счет обоих процессов и, в зависимости от длины волны, будет нести информацию о гидрооптическом состоянии водного объекта [1].

Изменение прозрачности воды влияет на эффективность процессов фотосинтеза и биологическую продуктивность водоема. Для осуществления фотосинтеза требуется определенная интенсивность света в спектре солнечного излучения, распространяющегося в воде [2, 3]. В этой связи одним из значимых гидрооптических параметров для водоемов является глубина фотического слоя, в котором и происходит фотосинтез [4].

### Постановка задачи

В работе [5] описан макет прибора и приведены результаты измерений распределения по глубине спектральной подводной освещенности в летнее время для ряда водоемов Алтайского края и Республики Алтай. К основным недостаткам этого макета прибора относятся низкая оперативность при смене селективных оптических элементов и отсутствие учета изменения надводной освещенности из-за влияния облачности и дымки, а также волнения водной поверхности.

С целью устранения указанных недостатков и повышения оперативности измерений за счет автоматизации при смене оптических селективных элементов (интерференционных светофильтров), а также увеличения точности измерений за счет учета изменения надводной освещенности, связанной с влиянием облачности и волнением водной поверхности, разработан измерительный комплекс.

### Описание прибора

Измерительный комплекс состоит из двух герметичных погружаемых измерительных боксов, корпуса

**For citation:** Sutorikhin I.A., Solovyov V.A., Krivobokov D.E. Measuring Complex for Assessment of Spectral Underwater Illumination at Different Depths of Water Reservoirs. *Izvestiya Altai State University*. 2024. No 4 (138). P. 42–48. DOI: 10.14258/izvasu(2024)4-05.

которых выполнены при помощи 3D-печати из фотополимерной смолы, и одного непогружаемого устройства, находящегося на поверхности. Поверхностное устройство необходимо для получения сигналов с погружаемых датчиков, их обработки, а также для расчета, хранения и отображения значений подводной освещенности (рис.1). Испытания показали возможность использования комплекса на глубине до 25 м. Этого достаточно, чтобы проводить исследования на большинстве внутриконтинентальных пресноводных озер [6].

В корпусах погружаемых измерительных боксов установлены прозрачные окна из матово-белого стекла, через которые солнечный свет проходит внутрь устройств. Для выделения необходимого участка спектра в них используются идентичные интерференционные светофильтры, устанавливаемые на револьверную платформу, которая перемещается при помощи шагового двигателя. Выбор необходимых спектральных участков осуществляется, исходя из значений максимумов поглощения фотосинтетических пигментов (рис. 2) [7].

При помощи фотодиодов происходит измерение интенсивности потока солнечного света, проходящего через поверхность воды. Значения напряжения, измеренные на фотодиодах, передаются по гибкому многожильному кабелю на устройство обработки данных, где происходит расчет значений освещенности и сохранение результатов. Переключение светофильтров происходит автоматически в процессе измерения. Внешний вид одного измерительного бокса приведен на рисунке 3.

### Проведение измерений

На первом этапе оба измерительных бокса устанавливаются под водной поверхностью с ориентацией входных окон в зенит на глубине в несколько сантиметров. В обоих устройствах напротив входных окон посредством барабана устанавливаются одинаковые светофильтры. Определяются сигналы с фотодатчиков, вычисляется их отношение, которое принимается за 100 % прохождения светового потока для каждого из используемых интерференционных светофильтров.

На втором этапе первый измерительный бокс погружается на определенную зафиксированную глубину, например 1 м, а второй остается на том же малом уровне от поверхности воды, и цикл измерений повторяется. На следующем этапе глубина погружения первого бокса увеличивается, например до 2 м, при неизменном положении второго бокса.

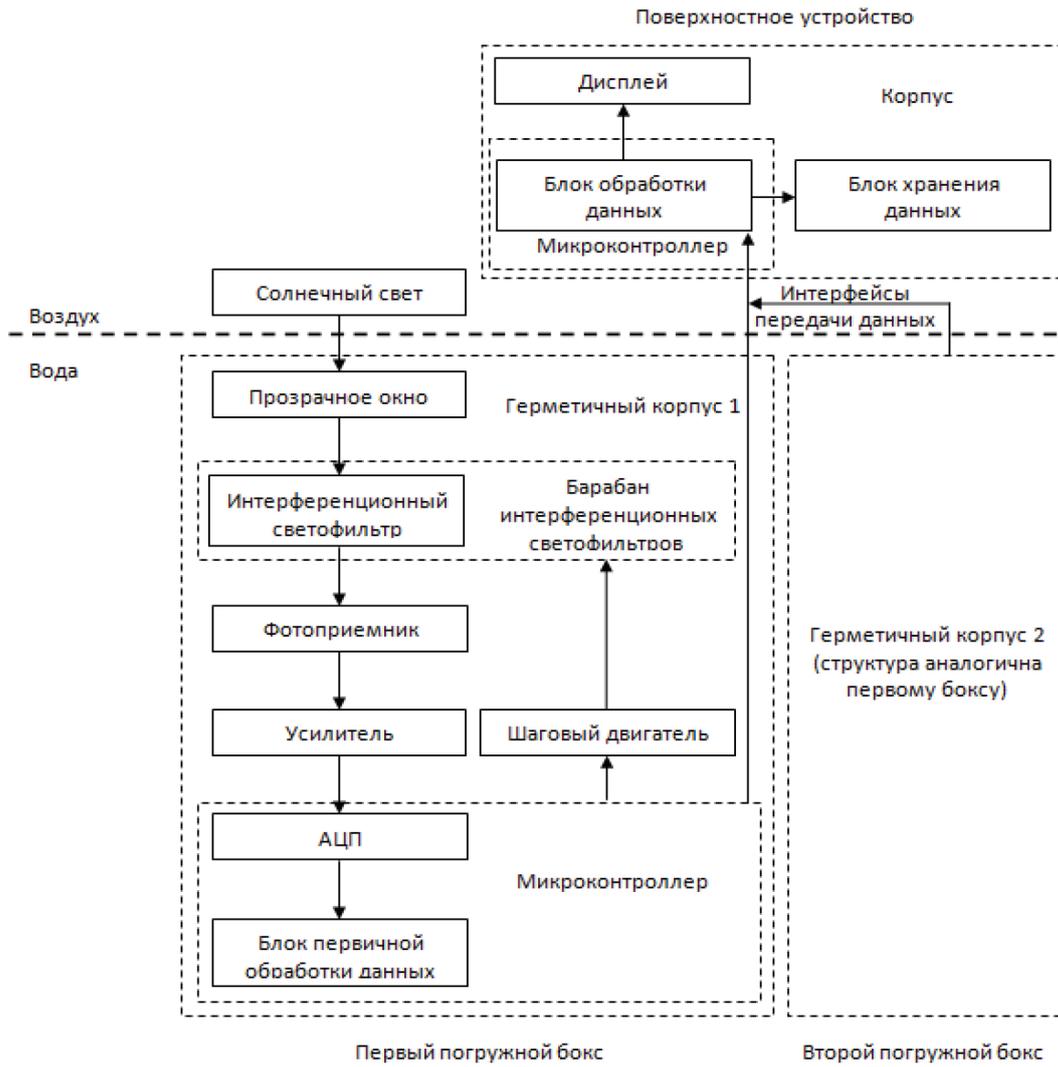


Рис. 1. Блок-схема измерительного комплекса

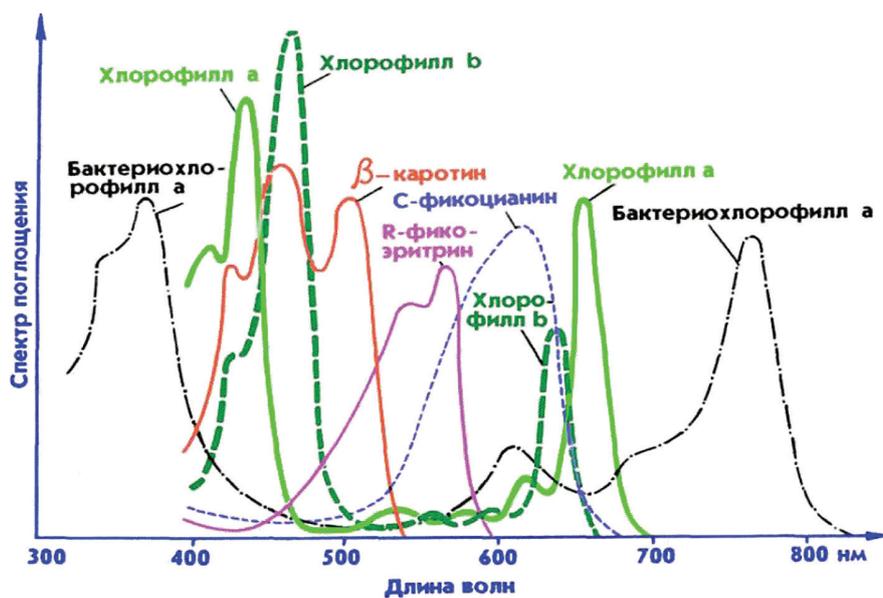


Рис. 2. Спектры поглощения фотосинтетических пигментов [4]

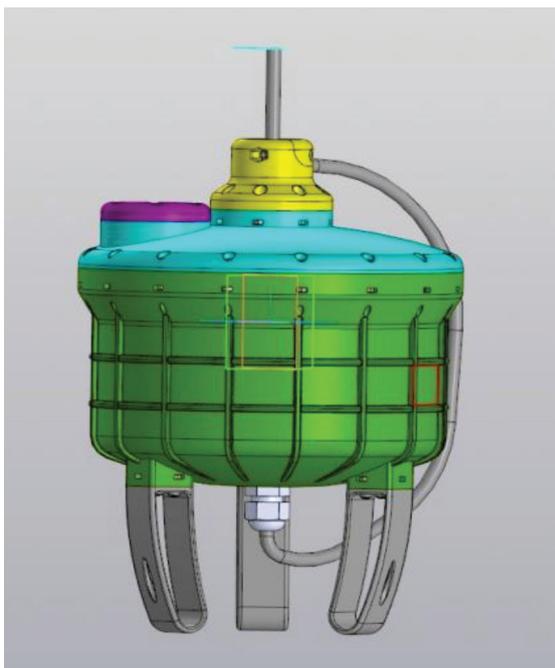


Рис. 3. Внешний вид измерительного бокса (3D-модель)

Процесс измерений завершается, когда на определенной глубине сигналы с фотодатчика первого измерительного бокса для всех интерференционных светофильтров становятся равными нулю. Отношение сигналов фотодатчиков первого и второго измерительного боксов соответствует доли прохождения светового потока в выбранном спектральном диапазоне, что исключает влияние на результаты измерений изменения светового потока у поверхности водоема. Таким образом, определяется глубина фотического слоя водоема и зависимость распределения в нем спектральной солнечной освещенности [6].

Расчет ослабления интенсивности солнечного света под водой представим в следующем виде:

$$K_i(N) = \frac{\beta_{01}}{\beta_2(N)} = \frac{\beta_{01}}{\alpha_i(N)\beta_{02}} = \frac{1}{\alpha_i(N)} \cdot K_{0i} \quad (1)$$

или

$$\alpha_i(N) = \frac{K_{0i}}{K_i(N)}, \quad (2)$$

где  $N$  — фактор, влияющий на поглощение спектров света, к примеру концентрация фитопланктона;

$\beta_{01}$  — величина сигнала для первого фотозлемента у поверхности;

$\beta_{02}$  — величина сигнала для второго фотозлемента у поверхности;

$\beta_2(N)$  — величина сигнала для второго фотозлемента на определенной глубине погружения;

$\alpha(N)$  — коэффициент ослабления светового потока водой на глубине погружения;

$K_{0i}$  — коэффициенты отношения значений освещенности фотодатчиков в первой и второй измерительных головках у поверхности.

#### Результаты измерений

Работоспособность созданного измерительного комплекса была проверена в ходе экспедиционных работ в августе 2023 г. на участках акватории Телецкого озера с разными уровнями естественного и антропогенного воздействия. Надводная освещенность регистрировалась люксметром Ю117. Относительная прозрачность воды определялась по белому диску и стандартной методике [8]. В качестве примера в таблицах 1–3 приведены значения спектральной подводной освещенности на разных глубинах для максимумов поглощения хлорофилла-а и бактериохлорофилла на длинах волн 433, 445, 655, 680 и 780 нм.

Таблица 1

Распределение по глубине спектральной подводной освещенности (%) в Телецком озере от 15.08.2023 в 16.05 местного времени в районе мыса Ежон для станции с координатами 51°33'58.06" с.ш., 87°40'45.21" в.д. Надводная освещенность — 14000 Лк. Относительная прозрачность воды по белому диску — 6 м

Длина волны, нм	433	445	655	670	780
Глубина, м					
0	100	100	100	100	100
0,5	63,4	70,7	47,5	31,4	34,4
1	32,4	55,8	39,7	29,9	8,3
1,5	16,4	36,9	28,9	13,2	1,8
2	9,5	22,7	22,9	9,7	1
3	3,9	12,4	14	2	0,1
4	0,5	7,9	8,2	0	0
5	0,2	3,2	4,7	0	0
6	0	1,4	2,1	0	0
7	0	0,3	0,8	0	0
8	0	0	0	0	0

Таблица 2

Распределение по глубине спектральной подводной освещенности (%) в Телецком озере от 16.08.2023 в 11.30 местного времени в районе мыса Отык-Таш для станции с координатами 51°42'39.89" с.ш., 87°39'14.71" в.д. Надводная освещенность — 23000 Лк. Относительная прозрачность воды по белому диску — 6,5 м

Длина волны, нм	433	445	655	670	780
Глубина, м					
0	100	100	100	100	100
0,5	60,8	73,4	52	31,8	30,5
1	45,3	46,8	42,8	25	5,8
1,5	27,4	35,2	32,9	17,5	0,3
2	17,7	24,2	26,0	13,4	0
3	6,6	10,9	17,0	7,3	0
4	3	4,5	10,7	4,2	0
5	0,8	1,9	6,2	1,7	0
6	0,4	0,9	3,1	1,1	0
7	0	0	1,1	0,6	0
8	0	0	0,5	0,3	0
9	0	0	0	0	0

Таблица 3

Распределение по глубине спектральной подводной освещенности (%) в Телецком озере от 16.08.2023 в 16.55 местного времени близ п. Яйлю (мыс Айран) для станции с координатами 51°45'16.08" с.ш., 87°39'40.67" в.д. Надводная освещенность — 19000 Лк. Относительная прозрачность воды по белому диску — 6 м

Длина волны, нм	433	445	655	670	780
Глубина, м					
0	100	100	100	100	100
0,5	61,2	71,8	50,1	30,8	35
1	51,2	53,7	38,4	26	11,5
1,5	30	41,1	26,3	24,5	4,1
2	17,8	25,4	24,9	18,5	1,3
3	7	12,5	14,9	12	0,3
4	2,8	5,9	2,9	7,8	0
5	1,6	2,4	1,5	4,5	0
6	0	0,6	0,9	1,4	0
7	0	0,3	0,4	0,6	0
8	0	0	0	0	0

Из полученных данных следует, что практически на всех станциях максимальная глубина спектральной подводной освещенности на 1,0–1,5 м превышала видимость белого диска, что свидетельствует о высокой чувствительности приборного комплекса.

Для оценки влияния изменения надводной освещенности и волнения водной поверхности на результаты измерений для станции в Кыгинском заливе был проведен эксперимент.

Методика эксперимента заключается в следующем. На первом этапе оба измерительных бокса устанавливаются под водной поверхностью с ориентацией входных окон в зенит на глубине в несколько сантиметров. Поверхностное устройство позволяет выби-

рать режим измерения: с коррекцией и без коррекции. В режиме без коррекции для измерения используется только один (первый) измерительный погружаемый бокс. В режиме коррекции используются оба погружаемых измерительных бокса по описанному выше способу измерений. Интервал времени — 10 минут. Доверительный интервал рассчитан по 3 измерениям.

Наибольшее расхождение между значениями спектральной подводной освещенности с учетом и без учета влияния облачности и волнения воды наблюдается у поверхности. Результаты статистической обработки значений спектральной подводной освещенности с учетом и без учета влияния облачности и волнения воды приведены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнение значений спектральной подводной освещенности с учетом и без учета влияния облачности и волнения воды

Длина волны	433	445	655	670	780
Освещенность с коррекцией (h=0,5 м), (%)	78,9	78,1	50,1	48,1	25,8
Освещенность без коррекции (h=0,5 м), (%)	62	68,5	37,9	13,2	21,9
Разница показаний, (%)	<b>16,9</b>	<b>9,6</b>	<b>12,2</b>	<b>34,9</b>	<b>3,9</b>
Доверительный интервал 1, (%)	±1,2	±1,2	±0,8	±0,7	±0,4
Доверительный интервал 2, (%)	±4,7	±5,1	±2,85	±1	±1,6

Освещенность с коррекцией (h=1 м), (%)	39,4	48,4	38,4	33,3	6,8
Освещенность без коррекции (h=1 м), (%)	31,8	36,2	23,5	1,7	2,9
Разница показаний, (%)	<b>7,6</b>	<b>12,2</b>	<b>14,9</b>	<b>31,6</b>	<b>3,9</b>
Доверительный интервал 1, (%)	±0,6	±0,7	±0,6	±0,5	±0,1
Доверительный интервал 2, (%)	±2,4	±2,7	±1,8	±0,1	±0,2
Освещенность с коррекцией (h=1,5 м), (%)	27,2	32,1	26,3	23,2	1,8
Освещенность без коррекции (h=1,5 м), (%)	14,7	18,6	12,3	0	0
Разница показаний, (%)	<b>12,5</b>	<b>13,5</b>	<b>14</b>	<b>23,2</b>	<b>1,8</b>
Доверительный интервал 1, (%)	±0,4	±0,5	±0,4	±0,4	±0,1
Доверительный интервал 2, (%)	±1,1	±1,4	±0,9	–	–
Освещенность с коррекцией (h=2 м), (%)	10,8	13,6	24,9	16,8	0,5
Освещенность без коррекции (h=2 м), (%)	6,7	9,6	6,7	0	0
Разница показаний, (%)	<b>4,1</b>	<b>4</b>	<b>18,2</b>	<b>16,8</b>	<b>0,5</b>
Доверительный интервал 1, (%)	±0,2	±0,2	±0,4	±0,3	±0,1
Доверительный интервал 2, (%)	±0,5	±0,7	±0,5	–	–
Освещенность с коррекцией (h=3 м), (%)	1,4	2,1	2,9	2,6	0
Освещенность без коррекции (h=3 м), (%)	2	2,4	1,1	0	0
Разница показаний, (%)	<b>-0,6</b>	<b>-0,3</b>	<b>1,8</b>	<b>2,6</b>	<b>0</b>
Доверительный интервал 1, (%)	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	–
Доверительный интервал 2, (%)	±0,2	±0,2	±0,1	–	–

В результате проведенного эксперимента было установлено, что с увеличением глубины вклад волнения водной поверхности в результаты измерений снижается за счет рассеивающего действия водной толщи [9, 10]. Для Телецкого озера в отмеченном диапазоне длин волн эта глубина была около 3 м.

#### Заключение

Таким образом, разработанный измерительный комплекс для оценки спектральной подводной освещенности на разных глубинах водоемов в ходе экспедиционных работ на Телецком озере показал удобство

и оперативность в проведении измерений глубины фотического слоя в условиях изменяющегося надводного освещения и слабого волнения.

Показано, что максимальные глубины, на которых регистрировалась спектральная подводная освещенность в диапазоне длин волн (433, 445, 655, 680 и 780 нм), на участках акватории Телецкого озера всегда превышали глубины видимости белого диска.

Сделана оценка влияния слабого волнения водной поверхности на результаты измерений спектральной подводной освещенности и определена глубина порядка 3 м, на которой оно наиболее заметно.

#### Библиографический список

1. Morel A., Gordon H.R. Report of the Working Group on Water Color // *Boundary-Layer Meteor.* 1980. Vol. 18. P. 343–355. DOI: 10.1007/BF00122030
2. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002. Т. 1. 276 с.
3. Matthews M.W., Bernard S. Characterizing the Absorption Properties for Remote Sensing of Three Small Optically-Diverse South African Reservoirs // *Remote Sensing.* 2013. Vol. 5(9). P. 4370–4404. DOI: 10.3390/rs5094370.
4. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КНИЦ РАН, 2007. 395 с.
5. Суторихин И.А., Фроленков И.М., Литвиненко С.А., Соловьев В.А. Спектральная подводная освещенность пресноводных водоемов по глубине // *Оптика атмосферы и океана.* 2023. Т. 36. № 10. С. 861–865. DOI: 10.15372/AOO20231011
6. Суторихин И.А., Кривобоков Д.Е., Соловьев В.А. Измерение спектральной подводной освещенности на разных глубинах водоемов // *Ползуновский альманах.* 2023. № 3. С. 39–41.
7. Попик А.Ю. Динамика спектров лазерно-индуцированной флуоресценции хлорофилла-а фитопланктона в условиях меняющихся параметров внешней среды: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21. Владивосток, 2015. 145 с.
8. Гидрооптические характеристики. ГОСТ 10210-73. М., 1974. 10 с.
9. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Мониной. М.: Наука, 1983. 378 с.
10. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. М.: ЛЕНАНД, 2021. 280 с.

## References

1. Morel A., Gordon H.R. Report of the Working Group on Water Color. *Boundary-Layer Meteor.* 1980. Vol. 18. P. 343–355. DOI: 10.1007/BF00122030
2. Pokazeev K.V., Filatov N.N. Hydrophysics and Ecology of Lakes. Hydrophysics. Moscow: Faculty of Physics, Moscow State University, 2002. Vol. 1. 276 p. (In Russ.).
3. Matthews M.W., Bernard S. Characterizing the Absorption Properties for Remote Sensing of Three Small Optically-Diverse South African Reservoirs. *Remote Sens.* 2013. Vol. 5. P. 4370–4404. DOI: 10.3390/rs5094370
4. Kitaev S.P. Fundamentals of Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists. Petrozavodsk: KSC RAS, 2007. 395 p. (In Russ.).
5. Sutorikhin I.A., Frolenkov I.M., Litvinenko S.A., Solovyov V.A. Spectral Underwater Illumination of Freshwater Reservoirs by Depth. *Optics of the Atmosphere and Ocean.* 2023. Vol.36. No 10. P. 861–865. (In Russ.). DOI: 10.15372/AOO20231011
6. Sutorikhin I.A., Krivobokov D.E., Solovyov V.A. Measurement of Spectral Underwater Illumination at Different Depths of Reservoirs. *Polzunovsky Almanac.* 2023. No 3. P. 39–41. (In Russ.).
7. Popik A.Yu. *Dynamics of Laser-Induced Fluorescence Spectra of Chlorophyll-a Phytoplankton in Conditions of Changing Environmental Parameters*: Ph. D. Thesis. Vladivostok, 2015. 145 p. (In Russ.).
8. Hydro-Optical Characteristics. GOST 10210-73. Moscow, 1974. 10 p. (In Russ.).
9. Optics of the Ocean. Vol. 1. Physical Optics of the Ocean; Edited by A.S. Monin. Moscow: Nauka, 1983. 378 p. (In Russ.).
10. Shifrin K.S. Introduction to Ocean Optics. Moscow: Lenand, 2021. 280 p. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**И.А. Суторихин**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия; главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Барнаул, Россия;

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

**Д.Е. Кривобоков**, кандидат технических наук, доцент 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 of the Department of Radiophysics and Theoretical Physics, Altai State University, Barnaul, Russia; Chief Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia;

**V.A. Solovyov**, Postgraduate Student, Senior Lecturer of the Department of Information Technologies, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia;

**D.E. Krivobokov**, Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.