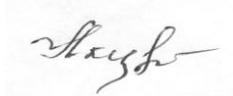


На правах рукописи



Акулова Ольга Борисовна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНО-  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ГИДРООПТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЁМОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОЗЁР АЛТАЙСКОГО КРАЯ)**

Специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы,  
гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2015

Работа выполнена в лаборатории гидрологии и геоинформатики Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН)

**Научный руководитель:**

БУКАТЫЙ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ, доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ

**Официальные оппоненты:**

ФИЛАТОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор, ФГБУН Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, главный научный сотрудник и заведующий лабораторией географии и гидрологии (г. Петрозаводск)

СЕДАЛИЩЕВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет», заведующий кафедрой вычислительной техники и электроники (г. Барнаул)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул)

Защита диссертации состоится «22» октября 2015 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.008.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГБУН Институте водных и экологических проблем СО РАН по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, Диссертационный совет, факс (385-2) 24-03-96, e-mail: [iwep@iwep.ru](mailto:iwep@iwep.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» июня 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук, доцент



И.Д. Рыбкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Гидрофизика применительно к задачам гидрологии суши изучает физические свойства природных вод и физические процессы, протекающие в водных объектах. Среди множества гидрофизических характеристик воды прежде всего выделяют: температуру, количество взвешенного органико-минерального вещества и оптические свойства водных масс, которые так или иначе оказывают влияние на формирование среды обитания живых организмов и их жизнедеятельность. Здесь также уместно вспомнить известное положение о том, что чем сильнее меняется определённый гидрофизический элемент среды в пространстве или во времени, тем обычно большее экологическое значение он имеет для сообщества организмов.

Работа направлена на решение одного из наименее изученных вопросов современной гидрофизики – разработки и применения новых методов и технических средств для экологической оценки и контроля над состоянием пресноводных водоёмов при изучении гидрооптических характеристик. Одними из наиболее важных гидрооптических характеристик как индикаторов экологического состояния водных экосистем являются показатели ослабления  $\varepsilon$ , поглощения  $\kappa$  и рассеяния  $\sigma$  света, а также относительная прозрачность  $Z_0$  по белому диску Секки. В научной зарубежной и отечественной литературе наибольшее внимание уделяется исследованиям гидрооптических характеристик океанов и морей, а наименьшее – внутренних водоёмов. К отличительной особенности в исследованиях автора относится то обстоятельство, что прозрачность озёр определялась с помощью объективного спектрофотометрического метода, в то время как подавляющее большинство результатов, приведённых в научной литературе по данному вопросу, получено с использованием субъективного метода по диску Секки. Однако последний обладает значительной погрешностью измерений (20% и более) и существенным ограничением его использования в зимних подлёдных условиях.

В настоящее время на фоне интенсивного антропогенного воздействия на водные экосистемы возрастает общественный интерес к их состоянию, охране и рациональному использованию. Это в полной мере можно отнести к водоёмам Алтайского края. Водные объекты данной территории представляют не только теоретический, но и практический интерес в исследованиях гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик. В гидрооптическом отношении озёра Алтайского края изучены недостаточно. Оценка качества воды и контроль состояния таких водоёмов необходимы для проведения и выполнения комплекса водоохраных мероприятий, направленных на предотвращение отрицательных экологических последствий антропогенного воздействия, защиту водоёмов от истощения, загрязнения и эвтрофикации. Это также необходимо для классификации озёрных экосистем по конкретным признакам на данной территории. В связи с этим изучение первичной гидрооптической характеристики – показателя ослабления света  $\varepsilon$ , а также спектрального вклада компонентов озёрной воды в  $\varepsilon$  необходимо при решении основных вопросов гидрологии, важных разделов гидрофизики и экологии, что представляется весьма актуальным.

**Изученность проблемы.** Проблемы гидрооптических исследований водных экосистем в нашей стране в тех или иных аспектах решаются в Институте водных проблем Севера Карельского НЦ РАН (г. Петрозаводск), Институте озераведения РАН (г. Санкт-Петербург), Институте водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул), Институте биофизики (г. Красноярск), Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск),

Институте вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск), и проводятся, в основном, на крупных водоёмах: озёрах – Ладожское, Онежское, Телецкое, Байкал, Ханка, Иваново-Арахлейских и водохранилищах – Новосибирское и Красноярское.

Нужно также отметить, что исследуемые водоёмы Алтайского края – озёра Лапа, Красиловское и Бол. Островное следует отнести к малоизученным водным объектам, по которым имеется сравнительно мало исходной информации (морфометрической, гидрологической, гидрооптической и т.д.), что требует дополнительных разработок и использования методов и приборов для экологической оценки озёр.

**Цель работы.** Исследование экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоёмов с использованием технологии расчёта спектрального вклада компонентов озёрной воды в показатель ослабления света и разработанного измерительно-вычислительного комплекса.

**Основные задачи:**

1. Разработать технологию расчёта и оценить спектральный вклад компонентов озёрной воды в показатель ослабления света (на примере озёр Алтайского края – Лапа, Красиловское и Бол. Островное).

2. Определить средний размер и среднюю счётную концентрацию частиц органо-минеральной взвеси в озёрной воде с помощью разработанного измерительно-вычислительного комплекса на основе оптического метода флуктуаций прозрачности.

3. Провести экспериментальные исследования концентраций и размеров частиц органо-минеральной взвеси в изучаемых озёрах с помощью метода флуктуаций прозрачности и метода оптической микроскопии.

4. Выявить закономерности изменения показателя ослабления света в поверхностном слое водоёмов Алтайского края с использованием технологии расчёта спектрального вклада компонентов озёрной воды и разработанного измерительно-вычислительного комплекса, а также изучить взаимосвязи спектральной прозрачности воды с гидробиологическими характеристиками исследуемых водных объектов.

**Объект исследования:** разнотипные озёра Алтайского края.

**Предмет исследования:** гидрооптические характеристики озёр Алтайского края.

**На защиту выносятся:**

1. Технология расчёта на основе физического моделирования и спектрального вклада компонентов озёрной воды в показатель ослабления света озёр Алтайского края.

2. Быстродействующий измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий с высокой точностью определять концентрацию и средний размер частиц органо-минеральной взвеси в водной среде на основе оптического метода флуктуаций прозрачности.

3. Результаты измерений средних значений концентраций и размеров частиц органо-минеральной взвеси в исследуемых водоёмах с помощью двух методов – флуктуаций прозрачности и оптической микроскопии.

4. Данные экспериментальных исследований пространственно-временной изменчивости спектрального показателя ослабления света озёр Алтайского края.

**Научная новизна исследования.** На основе разработанной технологии расчёта спектрального вклада компонентов озёрной воды *впервые* изучен вклад чистой воды, жёлтого вещества, хлорофилла и органо-минеральной взвеси в показатель ослабления света для пресноводных водоёмов Алтайского края – Лапа, Красиловское и Бол. Островное. *Впервые* получены данные о концентрации и размерном составе взвеси в трёх исследуемых озёрах с помощью разработанного измерительно-вычислительного

комплекса на основе метода флуктуаций прозрачности. *Впервые* выявлены особенности оптических свойств поверхностного слоя озёр Алтайского края с помощью спектрофотометрического метода определения спектральной прозрачности воды.

**Научно-практическая значимость исследования.** Технология расчёта спектрального вклада компонентов озёрной воды в показатель ослабления света пресноводных водоёмов с использованием модифицированной физической модели, позволяет рассчитывать спектральные вклады чистой воды, жёлтого вещества, хлорофилла, органо-минеральной взвеси и на их основе оценить концентрации вышеуказанных ингредиентов. Измерительно-вычислительный комплекс на основе оптического метода флуктуаций прозрачности может эффективно использоваться для экспресс-анализа качества пресноводных водоёмов для оценки содержания в них органо-минеральной взвеси. Экспериментальные данные по спектральной прозрачности разнотипных озёр и разработанный измерительно-вычислительный комплекс могут быть основой системы экспрессного гидрооптического мониторинга пресноводных водоёмов. Данные для диссертации получены при выполнении научной программы Президиума РАН 4.2 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири», междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 131. «Математическое и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга окружающей среды и поддержки принятия решений на основе данных стационарного, мобильного и дистанционного наблюдения», госбюджетных проектов: IV.31.2.12. «Разработка проблемно-ориентированных ГИС и информационно-моделирующих комплексов для изучения водных объектов Сибири на основе новых методов интеграции пространственных междисциплинарных данных» (2010–2013 гг.) и IV.38.2.5. «Разработка информационно-аналитического обеспечения для исследования водно-экологических процессов в водоёмах, водотоках и водосборах Сибири» (2013–2016 гг.).

**Достоверность полученных результатов** подтверждается большим объёмом и воспроизводимостью экспериментальных данных; использованием стандартных, в том числе входящих в ГОСТы, методик анализа и эксперимента, современного научного оборудования, методов учёта погрешностей измерений, корреляционного и регрессионного анализа; непротиворечивостью результатов с подобными данными, полученных исследователями в других регионах России и мира.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты и отдельные положения исследования были доложены диссертантом на шестой, седьмой и восьмой всероссийских научно-практических конференциях «Виртуальные и интеллектуальные системы» (Барнаул, 2011, 2012 и 2013 гг.); на XIII, XIV и XV международных научно-технических конференциях «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2012, 2013 и 2014 гг.); на XII, XIII и XIV конференциях молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку» (Барнаул, 2012, 2013 и 2014 гг.); на V Всероссийском симпозиуме с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоёмах и морских водах» (Петрозаводск, 2012 г.); на I и II Всероссийских научных конференциях с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2012 и 2014 гг.); на научно-практической конференции «Применение методов инженерно-экологического анализа для повышения эффективности водных технологий» (Новосибирск, 2012 г.); на VII International Conference «Current problems in optics of natural waters» (St.-Petersburg, 2013); на XX Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Новосибирск, 2014 г.).

Материалы диссертации обсуждались на научных семинарах лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН.

**Фактический материал и личный вклад автора.** Основой для написания работы послужили результаты обработки и анализа 287 проб озёрной воды, отобранных на разных глубинах водоёмов при комплексных маршрутных и мониторинговых исследованиях (сезонных и суточных) трёх озёр Алтайского края в период 2011–2014 гг. Проведены 4716 измерений спектральной прозрачности воды на спектрофотометрах. Обработаны 150 микрофотографий с общим количеством частиц 18666 штук.

Автор принимал личное участие на всех этапах исследований, включая отбор проб озёрной воды, их обработку, систематизацию и анализ на спектральную прозрачность, концентрацию и размерный состав частиц взеси. Автору принадлежит разработка и реализация технологии расчёта спектрального вклада компонентов озёрной воды в показатель ослабления света, создание измерительно-вычислительного комплекса для определения средней концентрации и размеров частиц водной взеси на основе оптического метода флуктуаций прозрачности и проведение исследований. Автор принимал непосредственное участие в подготовке статей, тезисов и материалов конференций к публикации.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе 15 статей в реферируемых журналах, из них 9 – в журналах, входящих в Перечень ВАК, 18 статей в материалах и трудах конференций, симпозиумов и съездов, 6 тезисов докладов и 1 препринт.

**Структура и объём диссертации.** Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, содержащего основные выводы. Общий объём диссертации составляет 176 страниц; содержит 63 иллюстрации, 24 таблицы. Библиографический список включает 260 литературных ссылок, из них 48 работ на иностранных языках.

**Благодарности.** Считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность за помощь и неоценимую поддержку на всех этапах работы научному руководителю д.ф.-м.н., проф. В.И. Букатому, а также всем коллегам и товарищам по Институту водных и экологических проблем СО РАН.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, рассмотрена изученность проблемы, сформулированы цель и основные задачи работы, указаны объект и предмет исследования, изложены положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна исследования, научно-практическая значимость, достоверность полученных результатов и их апробация, приведён фактический материал и определён личный вклад соискателя, публикации автора, а также структура и объём работы.

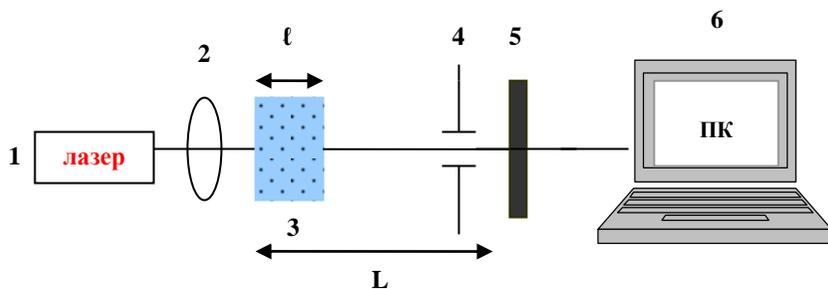
В **первой главе** представлен литературный обзор по исследованию гидрооптических характеристик в озёрных экосистемах мира, приведены основные термины и определения, результаты исследований и методы измерения гидрооптических характеристик, а также приборы для их регистрации.

Во **второй главе** в **разделе 2.1.** проанализированы существующие методы исследований концентраций и размерного состава частиц водной взеси. Это методы фильтрации и сепарации, пробоотборников, оптической и электронной микроскопии, нефелометрический и турбидиметрический методы, измерение объёмной концентрации

взвеси по пульсациям электропроводности природной воды, оптический метод флуктуаций прозрачности и др.

Находящиеся в воде во взвешенном состоянии частицы играют важную роль в формировании качества вод и биопродуктивности водоёмов. Они определяют режим освещённости водных масс, механически воздействуют на гидробионтов, служат объектами адсорбции многих микроэлементов, обеспечивают формирование комплекса донных отложений и т.д. Таким образом, изучение состава и концентрации взвешенного вещества, а также его распределения в пространстве и изменения во времени, седиментации и взмучивания со дна, несомненно является приоритетным направлением в гидрооптических исследованиях с целью экологической оценки водных объектов.

В разделе 2.2. описан разработанный измерительно-вычислительный комплекс для определения средней концентрации и среднего размера взвешенных в воде частиц с помощью оптического метода флуктуаций прозрачности. Оптическая схема прибора приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема измерительно-вычислительного комплекса

1 – лазер, 2 – линза для создания параллельного пучка, 3 – кювета с длиной пути 30 мм с исследуемой водой, 4 – диафрагма, 5 – фотодиодная линейка, 6 – ПК

В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны в вакууме  $\lambda_0=0,64$  мкм. Диаметр выходного лазерного пучка составлял 2,5 мм. Размер отверстия диафрагмы, помещённой перед фотодиодной линейкой и предназначенной для отсекаания рассеянного света, составлял 2 мм. Слаборасходящийся лазерный пучок с расходимостью порядка  $10'$  направлялся в кювету с исследуемой жидкостью, оптический путь луча  $l$  в среде составлял 30 мм. Измерение интенсивности прошедшего излучения проводилось с помощью фотодиодной линейки, сигнал с которой поступал на персональный компьютер (ПК) и обрабатывался специальной программой, разработанной в среде LabView 7.1. Угол приёма излучения был около  $10'$ . Расстояние  $L$  от кюветы до приёмной фотодиодной линейки составляло 550 мм. С помощью данного комплекса измерялась интенсивность излучения лазера, прошедшего через кювету, расположенной перпендикулярно падающему потоку света.

Метод флуктуаций прозрачности заключается в одновременном измерении прозрачности и дисперсии интенсивности светового потока при прохождении через слой исследуемой воды, что позволяет определить средний размер и концентрацию частиц взвеси. Наблюдения по измерению прозрачности показывают, что если частиц в световом пучке сравнительно немного, то она испытывает заметные флуктуации. Данные

флуктуации вызваны в общем случае, как случайными перемещениями частиц, так и направленным их движением. Флуктуации частиц происходят преимущественно из-за броуновского движения, остальные механизмы (конвекция, вибрация, движение под действием силы тяжести и др.), которые могут привести к дополнительным перемещениям частиц, сводились к минимуму, что обеспечивалось методикой эксперимента. Окончательные расчётные формулы:

$$s_0 = (D / I_0^2) [S\tau / \varphi(\tau)]; \bar{n} = \tau / (ls_0); \tau = -\ln(\bar{I} / I_0); S_0 = 2\pi r^2;$$

$$D = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2,$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего параллельного пучка света,  $\bar{I}$  – средняя интенсивность прошедшего через водную среду параллельного пучка света,  $S_0$  – поперечник ослабления света частицей,  $\bar{n}$  – концентрация частиц,  $S$  – площадь сечения пучка,  $\tau$  – оптическая толщина дисперсной среды,  $r$  – средний радиус частицы,  $l$  – длина пути света в среде,  $\varphi(\tau)$  – специальная функция,  $D$  – дисперсия сигнала,  $N$  – число измерений.

После градуировки и апробации оптического метода флуктуаций прозрачности с использованием частиц ликоподия на измерительно-вычислительном комплексе были проведены измерения для определения среднего размера и счётной концентрации частиц водной взвеси трёх озёр Алтайского края. Для каждой отдельной пробы, отобранной в мае 2013 г., было проведено 3 серии измерений, в каждой серии регистрировалось по 10 значений интенсивности с интервалом в 5 секунд. Погрешность в определении размеров составила 13%. Результаты сравнивались с данными, полученными методом оптической микроскопии (см. табл. 1).

Таблица 1

**Размер и концентрация взвешенных частиц в озёрах**

Озеро	Метод флуктуаций		Метод оптической микроскопии	
	Средний радиус частиц, мкм	Счётная концентрация, см <sup>-3</sup>	Средний радиус частиц, мкм	Счётная концентрация, см <sup>-3</sup>
Лапа	3,8	1,2·10 <sup>5</sup>	1,7	2,2·10 <sup>5</sup>
Красиловское	3,6	4,0·10 <sup>5</sup>	2,4	3,0·10 <sup>5</sup>
Бол. Островное	4,0	2,6·10 <sup>5</sup>	2,3	5,0·10 <sup>5</sup>

В разделе 2.3. обосновано преимущество использования спектрофотометрического метода определения спектральной прозрачности воды, в основу которого, как известно, положен принцип измерения отношения двух интенсивностей световых потоков: интенсивность потока, прошедшего через исследуемый образец  $I$ , и интенсивность потока, падающего на исследуемый образец  $I_0$ . Дана краткая характеристика используемых приборов для регистрации первичной гидрооптической характеристики –

показателя ослабления света  $\epsilon$ , которая рассчитывалась по следующей формуле:  $\epsilon = (1/L) \cdot \ln(1/T)$ , где  $L$  – длина кюветы,  $T = I / I_0$  – прозрачность в относительных единицах,  $I$ ,  $I_0$  – интенсивности прошедшего и падающего света, соответственно. Максимальная абсолютная погрешность измерений величины  $\epsilon$  составила около  $0,5 \text{ м}^{-1}$ . Данная погрешность обусловлена погрешностью измерения коэффициента пропускания с помощью спектрофотометра и погрешностью определения длины кюветы.

Здесь также приведены результаты исследований пространственно-временной изменчивости показателя ослабления света, оптической прозрачности, температуры воды и хлорофилла "а" на разных глубинах озёр Алтайского края, а также результаты расчётов средней концентрации и размеров частиц взвеси с помощью метода оптической микроскопии в поверхностном слое исследуемых водоёмов.

Основными водными объектами для исследования были выбраны три пресноводных озера Алтайского края: Лапа, Красиловское и Бол. Островное. Водоёмы отличаются по происхождению и положению в ландшафте, по морфологии, проточности и степени трофности, т.е. являются разнотипными, что обусловлено гидрологическими особенностями экосистем, литологией пород, составом вод питающего бассейна и различной степенью антропогенной нагрузки. Исследования на водоёмах проводились в разные сезоны 2011–2014 гг. Количественные пробы воды объёмом  $0,5 \text{ л}$  отбирались батометром через  $0,5\text{--}1 \text{ м}$  по глубине. Измерения спектральной прозрачности воды в области спектра  $400\text{--}800 \text{ нм}$  проводились спустя  $1\text{--}3$  часа после взятия проб в лабораторных условиях с помощью двух спектрофотометров – СФ-46 и ПЭ-5400УФ с погрешностью, равной  $0,5\%$ . Пробы с придонного горизонта брались на расстоянии  $15\text{--}20 \text{ см}$  от донного ила для предотвращения его взмучивания. Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах водорослей фитопланктона определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТу 17.1.4.02-90 и методическим рекомендациям. Погрешность определения концентрации хлорофилла составила не более  $10\%$ . Количество и размеры частиц взвеси определялись с помощью счётной камеры Нажотта объёмом  $0,01$  и  $0,05 \text{ мл}$  с использованием светового микроскопа Nikon Eclipse 80i.

Результаты вычислений показателя ослабления света  $\epsilon$  на разных глубинах исследуемых озёр по данным сезонных измерений спектральной прозрачности воды показали, что максимальные его значения имеют место в пробах воды, отобранных в придонном слое водоёмов. В ходе исследований сезонной изменчивости показателя ослабления света в поверхностном слое озёр было установлено, что наибольшие значения  $\epsilon$  практически во всём изучаемом спектральном диапазоне наблюдаются весной и в конце летнего периода, наименьшие – зимой, до вскрытия льда (см. рис. 2–4). Среднее значение показателя ослабления света  $\epsilon$  на характерной длине волны  $\lambda=430 \text{ нм}$  за исследуемый период 2011–2014 гг. составило для оз. Бол. Островное  $25,3 \text{ м}^{-1}$ , для озёр Лапа и Красиловское –  $5,2 \text{ м}^{-1}$  и  $7,4 \text{ м}^{-1}$ , соответственно.

Среднее значение прозрачности, измеренной с помощью диска Секки за исследуемый период составило для оз. Бол. Островное  $35 \text{ см}$ , для озёр Лапа и Красиловское –  $95 \text{ см}$  и  $90 \text{ см}$ , соответственно.

Полученные значения по температуре воды для исследуемых озёр свидетельствует о том, что данные по показателю ослабления света отражают все фазы годового гидротермического цикла водоёмов (периоды весеннего и летнего нагревания, а также осеннего и зимнего охлаждения).

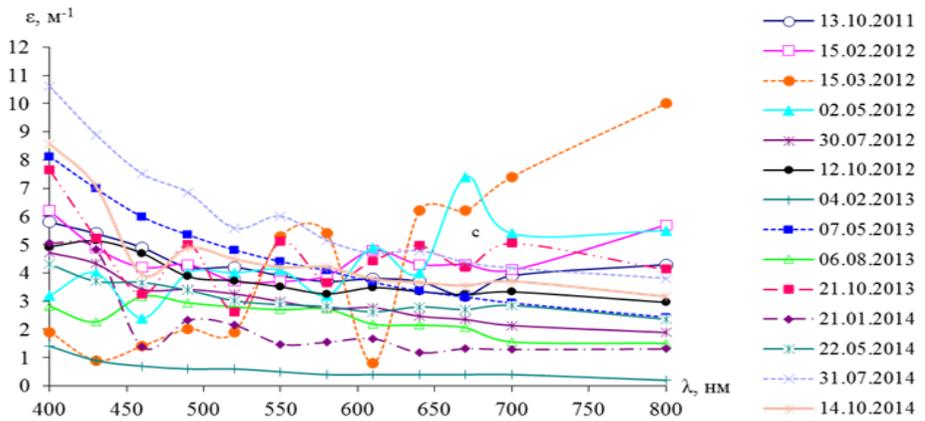


Рис. 2. Сезонное изменение  $\varepsilon$  от  $\lambda$  для оз. Лапа

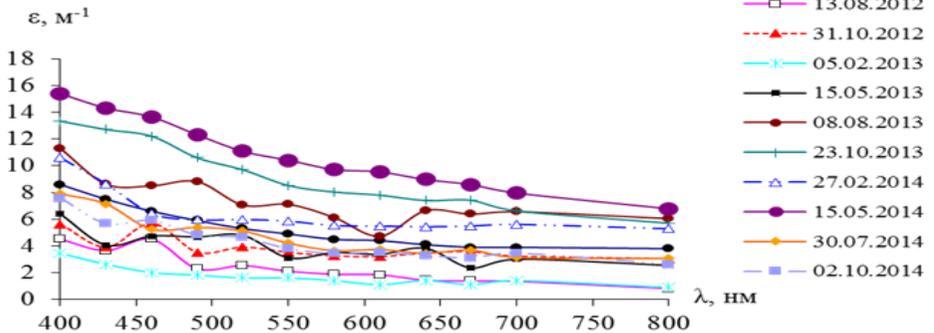


Рис. 3. Сезонное изменение  $\varepsilon$  от  $\lambda$  для оз. Красилковское

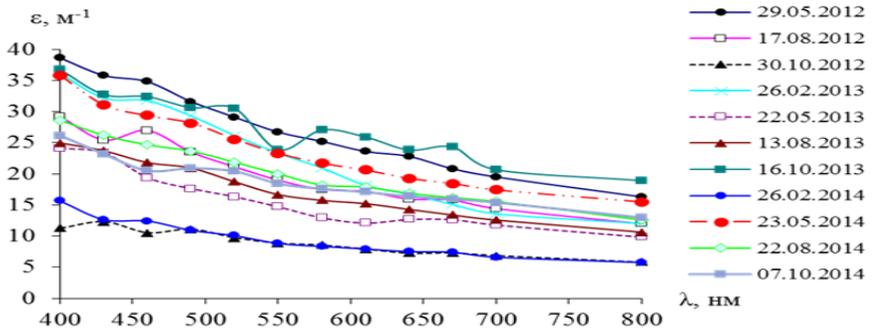
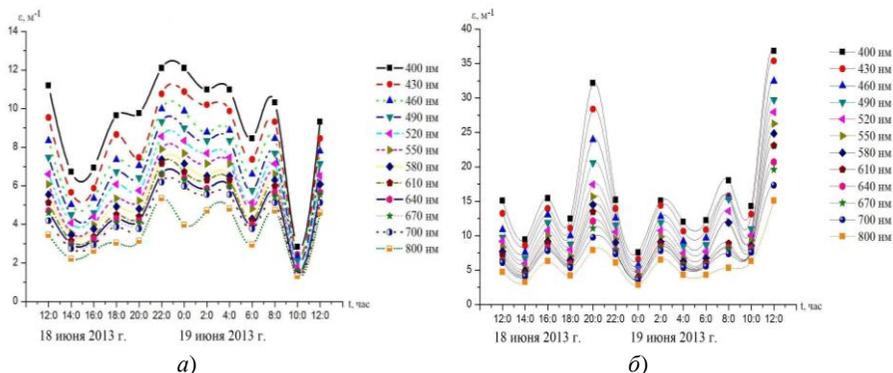


Рис. 4. Сезонное изменение  $\varepsilon$  от  $\lambda$  для оз. Бол. Островное

В сезонной динамике содержания хлорофилла в озёрах наблюдалась картина, характерная для других озёр умеренной зоны, когда максимум обилия фитопланктона приходится на весенне-летний период. Зимой в условиях ледостава и мощного снежного покрова количество фитопланктона снижается до минимума и величины первичной продукции становятся близки к нулю. В результате проведённых исследований обнаружено, что между спектральной прозрачностью озёр и концентрацией хлорофилла "а" существует обратная зависимость, которая может быть представлена в виде аппроксимационной кривой, удовлетворяющей закону Бугера. Среднее значение концентрации хлорофилла "а" в поверхностном слое озёр за исследуемый период 2011–2014 гг. составило для оз. Бол. Островное  $36,0 \text{ мг/м}^3$ , для озёр Лапа и Красиловское –  $11,3 \text{ мг/м}^3$  и  $24,8 \text{ мг/м}^3$ , соответственно.

В июне 2013 г. на оз. Красиловское были проведены *суточные исследования* динамики спектрального показателя ослабления света  $\epsilon$ , концентрации хлорофилла "а"  $C$  и температуры воды  $T$  на разных глубинах водоёма. Отбор проб в пелагиальной части озера осуществлялся каждые два часа для определения значений  $\epsilon$  и  $T$  и каждые шесть часов – для значений  $C$ . Максимальные значения показателя ослабления света  $\epsilon$  в поверхностном слое озера зарегистрированы в полдень (12-00), в 22-00 и в полночь (00-00) 18 июня, но с резким падением в 10-00 часов 19 июня (см. рисунок 5а). В придонном слое водоёма (на границе раздела вода – донные отложения) наибольшие значения показателя ослабления отмечены в 20-00 18 июня и в полдень 19 июня. Резкий минимум наблюдался в полночь (см. рисунок 5б).

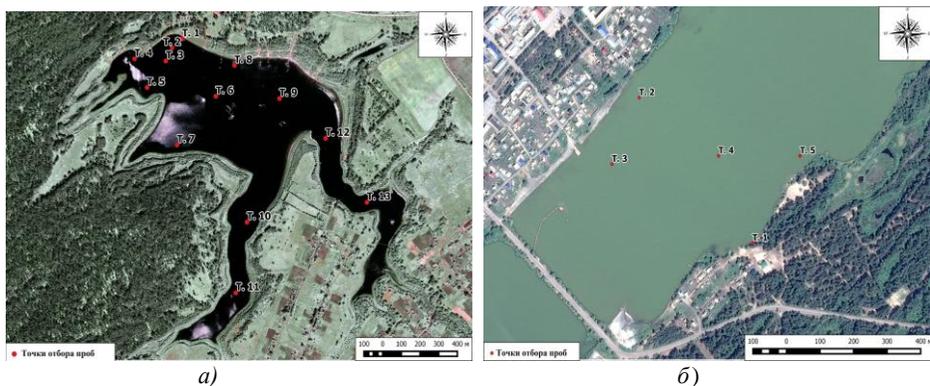


**Рис. 5.** Суточная динамика спектрального показателя ослабления света  $\epsilon$  в поверхностном (а) и придонном (б) слоях озера Красиловское

Суточные наблюдения на оз. Красиловское показали, что кривая динамики показателя ослабления света в придонном слое во время наблюдений в шести временных интервалах находится в противофазе и в шести – в фазе с кривой изменения этого параметра в поверхностном слое. Наибольшая концентрация хлорофилла "а" в поверхностном слое в течение суток отмечена ранним утром – 6:00, равная  $21,1 \text{ мг/м}^3$  и в полдень –  $18,4 \text{ мг/м}^3$ , а в течение дня и ночью значения  $C$  понижались. Суточное изменение хлорофилла определяется чередованием низкой и высокой интенсивности света и колебанием температуры воды. Неравномерное вертикальное распределение температуры воды  $T$  в озере летом связано с прямой термической стратификацией, что

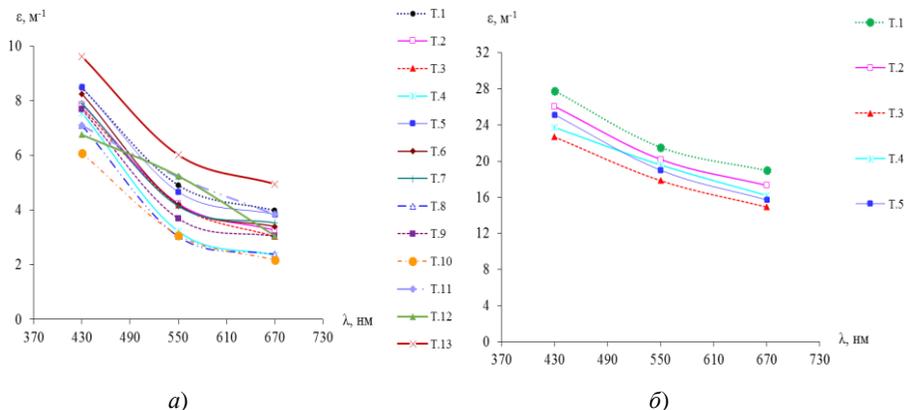
характерно для водоёмов умеренных широт. При этом максимальные значения в поверхностном слое отмечены в 18-00 часов 18 июня и в полдень 19 июня, минимальные – в 8-00 19 июня. В придонном слое наибольшие значения зафиксированы в полдень и вечером (20-00) 18 июня и в 4-00 19 июня.

Осенью 2014 года на озёрах Красиловское (2 октября) и Бол. Островное (7 октября) были проведены *исследования по пространственному распределению* показателя ослабления света и концентрации хлорофилла "а" в поверхностном слое двух водоёмов. На рис. 6 указаны точки отбора проб воды на озёрах Красиловское (Т.1–Т.13) и Бол. Островное (Т.1–Т.5). Для данного случая было обработано 18 проб воды и проведено 72 серии измерений спектральной прозрачности в диапазоне длин волн 400–800 нм до и после фильтрации проб озёрной воды через фильтры с диаметром пор 0,22 мкм.



**Рис. 6.** Карта-схема озёр Красиловское (а) и Бол. Островное (б) с точками отбора проб

На рис. 7 приведены результаты измерений показателя ослабления света на трёх длинах волн – 430, 550 и 670 нм в различных точках отбора проб на озёрах.



**Рис. 7.** Значения показателя ослабления света  $\epsilon$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  в различных точках в поверхностном слое озёр Красиловское (а) и Бол. Островное (б)

Из рисунка 7 видно, что наибольшие значения показателя ослабления света  $\epsilon$  приходится на длину волны  $\lambda=430$  нм. Это связано с тем, что в видимой области спектра находятся два максимума поглощения природной водой: первый – это область спектра 400–450 нм, которая соответствует полосе поглощения гуминовыми соединениями и второй – это максимум поглощения света хлорофиллом "а" в районе 430–440 нм. На длине волны  $\lambda=550$  нм значения  $\epsilon$  больше, чем при  $\lambda=670$  нм. Это можно объяснить повышенным содержанием органо-минеральной взвеси, которое подтверждается результатами расчётов автора по спектральному вкладу основных компонентов озёрной воды в общий показатель ослабления света. В результате анализа пространственного распределения показателя ослабления света  $\epsilon$  на длине волны  $\lambda=430$  нм на оз. Красиловское было установлено, что значения  $\epsilon$  варьировали в пределах от 6,1 до 9,6 м<sup>-1</sup>. Величины  $\epsilon$  мало отличались во всех точках водоёма, за исключением точки Т.13, где зафиксировано максимальное значение  $\epsilon$ , равное 9,6 м<sup>-1</sup>. Это можно объяснить тем, что точка Т.13 находится в непосредственной близости от села Красилово (на юго-востоке), где озеро используется для хозяйственно-бытовых и рекреационных целей местными жителями. По сравнению с предыдущим водоёмом, на оз. Бол. Островное были зафиксированы наиболее высокие значения показателя ослабления света  $\epsilon$  при  $\lambda=430$  нм значения параметра изменялись в пределах от 22,7 до 27,8 м<sup>-1</sup>, что примерно в два раза превышает подобные величины оз. Красиловское.

В этих же тринадцати точках отбора проб оз. Красиловское, на всех, кроме точки Т.11, зарегистрированы значения концентрации хлорофилла "а"  $S_{chl}$ , превышающие 30,0 мг/м<sup>3</sup>. Максимальная величина  $S_{chl}=38,0$  мг/м<sup>3</sup> и соответствует точке Т.3, которая расположена в пелагиальной зоне широтной части водоёма. Данное озеро по содержанию хлорофилла "а" может быть отнесено к объектам высокой степени экологического неблагополучия согласно критериям экологической оценки. Прозрачность воды в оз. Красиловское, измеренная в точке Т.3 с помощью диска Секки 2 октября 2014 г., была 105 см, что свидетельствует о значительной толщине фотического слоя до 3 м.

На пяти точках оз. Бол. Островное зарегистрированы высокие концентрации хлорофилла "а". Почти на всех обследованных точках (кроме точки Т.4) значения  $S_{chl}$  превышают 40,0 мг/м<sup>3</sup>, что позволяет отнести озеро к классу объектов высокой степени экологического неблагополучия. В точке Т.1 (литоральная зона водоёма) зафиксирована максимальная величина концентрации хлорофилла – 51,1 мг/м<sup>3</sup>. Данные по содержанию  $S_{chl}$  на оз. Бол. Островное также значительно выше, чем на оз. Красиловское. Оптическая прозрачность по диску Секки на оз. Бол. Островное 2 октября 2014 г. составила 35–40 см.

Анализ пространственного распределения показателя ослабления света в поверхностном слое воды двух озёр Алтайского края показал, что водоёмы отличаются не только гидробиологическими характеристиками, но также и оптическими. Следовательно, ослабление света озёрной водой может служить объективным маркером гидрофизических характеристик водоёмов для их экологического состояния.

В **третьей главе в разделе 3.1.** описаны основные компоненты озёрной воды (чистая вода, органо-минеральная взвесь, растворённое органическое вещество, фитопланктон) и их оптические свойства.

В **разделе 3.2.** на основе физической модели поглощения и рассеяния света в природной воде приведена схема технологии расчёта и результаты спектрального вклада компонентов озёрной воды в показатель ослабления света для водоёмов Алтайского края.

С учётом вклада основных компонентов озёрной воды, влияющих на спектральный показатель ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$ , его можно будет записать следующим образом, используя спектральную физическую модель ослабления света, которая впервые предложена О.В. Копелевичем:

$$\varepsilon(\lambda) = \kappa_{chl}(\lambda) + \kappa_{жв}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda) + \sigma_{вз}(\lambda) + \kappa_{чв}(\lambda), \quad (1)$$

где  $\kappa_{chl}(\lambda)$  и  $\kappa_{жв}(\lambda)$  – показатели поглощения хлорофиллом и жёлтым веществом,  $\sigma_{мол}(\lambda)$  – показатель молекулярного рассеяния чистой водой,  $\sigma_{вз}(\lambda)$  – показатель рассеяния органической взвесью,  $\kappa_{чв}(\lambda)$  – показатель поглощения чистой водой,  $\lambda$  – длина волны света. В выражении (1) показатель поглощения хлорофиллом рассчитывался по формуле

$$\kappa_{chl}(\lambda) = \kappa_{уд.chl}(\lambda) C_{chl}. \quad (2)$$

Здесь  $C_{chl}$  – концентрация хлорофилла "а", в мг/м<sup>3</sup>,  $\kappa_{уд.chl}(\lambda)$  – удельный показатель поглощения хлорофиллом, в м<sup>2</sup>/мг, его значения приведены в работе (Оптика океана / Под ред. Мони́на А.С. – Т. 1. Физическая оптика океана. – М.: Наука, – 1983. – 372 с.). Для расчётов  $\kappa_{чв}(\lambda)$  используются табличные данные (Pore R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II Integration cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – 36. № 33. – P. 8710–8723.), а для  $\sigma_{мол}(\lambda)$  – взяты из работы (Оптика океана / Под ред. Мони́на А.С. – Т. 1. Физическая оптика океана. – М.: Наука, – 1983. – 372 с.).

Как видно из выражения (1) спектральное ослабление света описывается с помощью трёхпараметрической модели. Так как  $\sigma_{мол}(\lambda)$  и  $\kappa_{чв}(\lambda)$  принимаются постоянными для различных природных вод (т.е. не зависящими от температуры воды), то изменчивость  $\varepsilon(\lambda)$  определяется изменчивостью концентрации хлорофилла, жёлтого вещества и содержания взвеси, что проявляется по-разному от длины волны падающего света. Физическая модель ослабления света даёт возможность выявить механизм формирования рассеивающих и поглощающих свойств озёрной воды в оптическом диапазоне и оценить для реальных ситуаций различные характеристики этих свойств, для которых отсутствуют или недостаточно экспериментальных данных.

В отличие от ранее указанных работ, где параметр  $\sigma_{вз}(\lambda)$  считался известным по данным спектральных измерений, а параметр  $\kappa_{жв}(\lambda)$  определялся разностью между  $\varepsilon(\lambda)$  и суммой остальных параметров, автором впервые предложен другой подход. Так как в эксперименте определялся параметр  $\kappa_{жв}(\lambda)$ , то спектральный показатель рассеяния взвесью  $\sigma_{вз}(\lambda)$  можно найти из выражения (1) по формуле

$$\sigma_{вз}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [\kappa_{chl}(\lambda) + \kappa_{жв}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda) + \kappa_{чв}(\lambda)]. \quad (3)$$

В результате во всех озёрах основной максимальный вклад в показатель ослабления света вносит взесь. Зимой вклад взвеси варьирует в пределах 54–71%, весной диапазон расширяется от 28 до 92%, летом – от 34 до 90%, а осенью происходит заметное уменьшение вклада взвеси – от 11 до 77%. Жёлтое вещество даёт максимальный вклад в показатель ослабления света весной (вклад взвеси варьирует в пределах 6–59% и осенью – 17–59%). Зимой диапазон значений составил 25–36%, летом – 5–42%. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при  $\lambda=430$  нм во всех водах и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается при  $\lambda=670$  нм, где вклад чистой воды в поверхностном слое оз. Лапа составил 16% (весной), оз. Красиловское – 13% (осенью) и оз. Бол. Островное – 5,8% (зимой). Это обусловлено значительным увеличением показателя ослабления чистой водой  $\varepsilon_{чв}$  на длине волны  $\lambda=670$  нм и различными значениями  $\varepsilon$  для других компонентов в исследуемых озёрах. Вклад хлорофилла в ослабление света максимален летом, его значения варьируют в широком диапазоне от 1 до 35% и осенью – от 1 до 43%. Весной вклад хлорофилла находился в диапазоне 1–17%,

зимой наблюдался минимальный вклад – 0,4–10%. *Молекулярное рассеяние* света чистой водой не вносит ощутимый вклад и составляет 0,1% во всех исследуемых озёрах.

В **заключении** сформулированы *основные выводы* на основе результатов, полученных в работе, в соответствии с задачами и положениями, выносимыми на защиту:

1. Впервые изучен спектральный вклад чистой воды, жёлтого вещества, хлорофилла и органо-минеральной взвеси в показатель ослабления света для трёх разнотипных пресноводных водоёмов Алтайского края (озёр Лапа, Красиловское и Бол. Островное) с помощью разработанной технологии расчёта с использованием модифицированной физической модели рассеяния и поглощения света. В результате получено, что основной максимальный вклад в показатель ослабления света в зависимости от сезона года вносит *взвесь* (значения варьируют в широком диапазоне – от 11,5% осенью до 92% весной). Максимальный вклад *жёлтого вещества* доходит до 59,5% осенью. Значения вклада *хлорофилла* в разные сезоны года находились в пределах 0,9–43,3%, *чистой воды* – от 0,1 до 29,5%. *Молекулярное рассеяние* света чистой водой не вносит ощутимый вклад и составляет 0,1% для всех исследуемых озёр.

2. Впервые получены данные о концентрации и размерном составе взвеси в трёх исследуемых озёрах при помощи разработанного измерительно-вычислительного комплекса на основе метода флуктуаций прозрачности. Измерительно-вычислительный комплекс обладает следующими преимуществами: высокой точностью измерений, быстродействием, относительной простотой конструкции прибора для его реализации и низкой стоимостью.

3. Проведены экспериментальные исследования и определены значения концентраций и размеров частиц органо-минеральной взвеси в изучаемых озёрах с помощью метода флуктуаций прозрачности и метода оптической микроскопии. Показано, что средний радиус частиц, измеренный методом флуктуаций прозрачности, в 1,5–2 раза превышал аналогичный размер, полученный по методу оптической микроскопии. Данное расхождение обусловлено различным временем регистрации размеров частиц взвеси, выполненное с помощью вышеуказанных методов.

Среднее значение радиуса частиц, полученное с помощью метода оптической микроскопии, в поверхностном слое оз. Лапа за исследуемый период составило 1,2 мкм, в озёрах Красиловское и Бол. Островное – 1,6 и 1,4 мкм, соответственно. Среднее значение счётной концентрации, измеренной с помощью камеры Нажотта, составило порядка  $2,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  для оз. Лапа,  $3,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  для оз. Красиловское и  $4,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  для оз. Бол. Островное.

4. Изучены пространственное распределение и сезонная изменчивость спектрального показателя ослабления света в пресноводных водоёмах Алтайского края с использованием технологии расчёта спектрального вклада компонентов и разработанного измерительно-вычислительного комплекса. Выявлены особенности оптических свойств поверхностного слоя исследуемых озёр с помощью спектрофотометрического метода определения спектральной прозрачности воды. Среднее значение показателя ослабления света  $\epsilon$  на характерной длине волны  $\lambda=430 \text{ нм}$  за исследуемый период 2011–2014 гг. составило для оз. Бол. Островное  $25,3 \text{ м}^{-1}$ , для озёр Лапа и Красиловское –  $5,2 \text{ м}^{-1}$  и  $7,4 \text{ м}^{-1}$ , соответственно.

По данным сезонных измерений спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла "а" на разных глубинах озёр обнаружена обратная зависимость величины прозрачности на исследуемых длинах волн от концентрации основного фотосинтетического пигмента, которая может быть представлена в виде

аппроксимационной кривой, удовлетворяющей закону Бугера, что позволяет по данным оптических измерений оценивать биомассу фитопланктона и, в конечном счёте, определять трофический статус водоёма. В результате получено, что трофический статус оз. Лапа можно охарактеризовать, как эвтрофное, оз. Красиловское – эвтрофно-гиперэвтрофное, оз. Бол. Островное – гиперэвтрофное.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК*

1. Исследования спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла в пойменном озере (бассейн Верхней Оби, Алтайский край) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** // Известия АлтГУ. – 2012. – №1/1. – С. 226–228.

2. Исследования спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла с учётом дисперсности гидрозольных частиц водоёма (на примере озера-старицы Лапа Алтайского края) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** // Ползуновский вестник. – 2012. – №2/1. – С. 16–21.

3. Сезонная динамика спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в пойменном озере с учётом дисперсности частиц фитопланктона [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** // Известия АлтГУ. – 2012. – №1/2. – С. 173–177.

4. Суторихин, И.А. Динамика гидрооптических характеристик разнотипных озёр Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Известия АлтГУ. – 2013. – №1/1. – С. 178–183.

5. Суторихин, И.А. Сезонная динамика спектрального показателя ослабления света в озёрах Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Известия АлтГУ. – 2013. – №1/2. – С. 184–188.

6. Исследования концентрации и размеров частиц водной взвеси с помощью оптического метода флукуаций прозрачности [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, У.И. Залаева, **О.Б. Акулова** // Известия АлтГУ. – 2013. – №1/2. – С. 189–193.

7. Суторихин, И.А. Сезонные изменения спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла "а" в разнотипных озёрах [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т.27. – №9. – С. 801–806.

8. Сезонная изменчивость спектрального показателя ослабления света в озере Красиловское в 2012–2014 гг.) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева // Известия АлтГУ. – 2014. – №1/2. – С. 228–232.

9. **Акулова, О.Б.** Суточные изменения спектрального показателя ослабления света и температуры воды (на примере оз. Красиловское) [Текст] / О.Б. Акулова, В.И. Букатый, У.И. Залаева // Ползуновский вестник. – 2014. – №2. – С. 123–126.

*Публикации в других научных изданиях*

1. Исследования прозрачности и концентрации хлорофилла в бессточном водоёме [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** // Ползуновский Альманах. – 2011. – № 1. – С.49–50.

2. Суторихин, И.А. Спектральная прозрачность воды и концентрация хлорофилла в континентальном водоёме [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** //Аэрозоли Сибири, XVIII Рабочая группа: тезисы докладов. Томск. – 2011. – С. 27–28.

3. Суторихин, И.А. Исследования спектральной прозрачности внутренних водоёмов (на примере озера-старницы Лапа Алтайского края) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // ЭФТЖ. – 2012. – Т. 7. – С. 1–5. [Электронный ресурс - <http://eftj.secna.ru>].

4. Спектральная прозрачность природных вод и её связь с концентрацией хлорофилла и дисперсностью гидрозольных частиц (на примере озера-старницы, бассейн Верхней Оби) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** // Материалы XIII международной научно-технической конференции «ИКИ–2012», 28-29 марта 2012 г. – Том 2. – С. 78–82.

5. Сезонная динамика спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в разнотипных озёрах Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, А.В. Котовщиков // Препринт №3. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – 2012. – 50 с.

6. Исследования спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла на разных глубинах водоёма (на примере озера-старницы Лапа Алтайского края) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, **О.Б. Акулова** // Материалы V-го Всероссийского симпозиума с международным участием 10-14 сентября 2012 г. «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоёмах и морских водах», г. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2012. – С. 415–420.

7. Сезонная динамика гидротермических параметров, спектральной прозрачности и содержания хлорофилла внутренних водоёмов Алтая [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, А.В. Котовщиков, А.В. Дьяченко, С.А. Литвиненко // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (в трёх томах), 20-24 августа 2012 г. – Т.1. – С. 144–148.

8. Суторихин, И.А. Сезонные изменения спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла в пойменном озере Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Аэрозоли Сибири, XIX Рабочая группа: тезисы докладов. Томск. – 2012. – С. 80.

9. Суторихин, И.А. Гидрооптические исследования разнотипных озёр Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Ползуновский Альманах. – 2012. – №2. – С. 51–54.

10. Суторихин, И.А. Оценка экологического состояния разнотипных озёр Алтайского края по спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Материалы IV международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов», 28-30 мая 2013 г. Пермь. – 2013. – Т.1. – С. 302–307.

11. Суторихин, И.А. Сезонное изменение спектральной прозрачности озёр Алтайского края с учётом микрофизических и биологических параметров гидрозолей [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Тезисы докладов XIX Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», 1-6 июля 2013 г. Барнаул - Телецкое озеро. – 2013. – С.73–74.

12. **Акулова, О.Б.** Сезонная динамика спектральной прозрачности воды в разнотипных озёрах Алтайского края [Текст] / О.Б. Акулова, У.И. Залаева // Материалы XIII конференции молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку», 7-8 февраля 2013 г. – С.8–14.

13. Залаева, У.И. Исследования концентрации и размеров частиц водной взвеси оптическим методом флуктуаций прозрачности [Текст] / У.И. Залаева, **О.Б. Акулова** // Материалы XIII конференции молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку», 7-8 февраля 2013 г. – С. 32–38.

14. Sutorikhin, I.A. Seasonal dynamics of light attenuation coefficient in different kinds of lakes located in Altai Krai [Text] / I.A. Sutorikhin, V.I. Bukaty, **O.B. Akulova** // Proceedings of VII International Conference «Current problems in optics of natural waters». – St.-Petersburg, September 10-14, 2013. – P. 114–117.

15. Measuring and computer complex used for determining concentration and size composition of solids suspended in water by means of the method of optical transparency fluctuations [Text] / I.A. Sutorikhin, V.I. Bukaty, U.I. Zalaeva, **O.B. Akulova** // Proceedings of VII International Conference «Current problems in optics of natural waters». – St.-Petersburg, September 10-14, 2013. – P. 250–252.

16. База данных гидротермических и гидрооптических параметров водных объектов для оценки экологического состояния озёр с разной антропогенной нагрузкой [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, С.А. Литвиненко // Материалы Всероссийской научной конференции «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» Краснодар, 7-12 октября 2013 г. – С. 391–397.

17. Суторихин, И.А. Экологическая оценка состояния водоёмов по гидрооптическим и гидробиологическим характеристикам (на примере разнотипных озёр Алтайского края) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Материалы Всероссийской научной конференции «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» Краснодар, 7-12 октября 2013 г. – С. 386–391.

18. Суторихин, И.А. Динамика спектральной прозрачности воды разнотипных озёр Алтайского края в разные сезоны [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Международный Научно-исследовательский журнал заочной конференции «Research Journal of International Studies XIII» г. Екатеринбург. – 2013. – №3(10). – Часть 2. – С. 126–128.

19. Метод флуктуаций прозрачности для измерения концентрации и размеров частиц водной взвеси [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, У.И. Залаева, **О.Б. Акулова** // Международный Научно-исследовательский журнал заочной конференции «Research Journal of International Studies XIII» г. Екатеринбург. – 2013. – №3(10). – Часть 2. – С. 128.

20. Суторихин, И.А. Динамика показателя ослабления света на разных глубинах озёр Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Материалы XIV международной научно-технической конференции «ИКИ–2013», 10 апреля 2013 г. – №3(10). – Часть 2. – Том 2. – С. 32–36.

21. Лабораторный комплекс для измерений размеров и концентрации частиц водной взвеси методом флуктуаций прозрачности [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, У.И. Залаева, **О.Б. Акулова** // Материалы XIV международной научно-технической конференции «ИКИ–2013», 10 апреля 2013 г. – Том 1. – С. 207–210.

22. Спектрофотометрический метод определения прозрачности разнотипных озёр для оценки качества воды [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева // Материалы VII Всероссийского гидрологического Съезда Санкт-Петербург, 19-21 ноября 2013 г. – С. 47. [Электронный ресурс - <http://7hydro.ru/index.php/ru/agenda>].

23. Суточная динамика спектральной прозрачности и хлорофилла "а" в надпойменном озере Алтайского края [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева, А.В. Дьяченко, Н.Ю. Сперанская // Аэрозоли Сибири, XX Рабочая группа: тезисы докладов. Томск. – 2013. – С. 80.

24. Рентгенофлуоресцентный анализ донных отложений (на примере озёр Алтайского края и Новосибирского водохранилища) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева, А.А. Тишкин // Аэрозоли Сибири, XX Рабочая группа: тезисы докладов. Томск. – 2013. – С. 80.

25. Сезонная динамика гидрофизических характеристик в озёрах Алтайского края в период 2011-2013 гг. [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева // Ползуновский Альманах. – 2013. – №1. – С. 98–101.

26. **Акулова, О.Б.** Суточная динамика показателя ослабления света на разных глубинах озера Красиловское [Текст] / О.Б. Акулова // Материалы XIV конференции молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку», 6-7 февраля 2014 г. – С. 3–8.

27. Оптические свойства поверхностного слоя озёр юга Западной Сибири в различные сезоны года [Текст] / **О.Б. Акулова**, В.И. Букатый, У.И. Залаева, И.А. Суторихин // Тезисы докладов XX Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». – Новосибирск, 23-27 июня 2014 г. – С.81.

28. Суточная динамика спектрального показателя ослабления света и температуры воды на озере Красиловское [Текст] / И.А. Суторихин, **О.Б. Акулова**, В.И. Букатый, У.И. Залаева // Материалы XV международной научно-технической конференции «ИКИ–2014», 23 апреля 2014 г. – С. 152–155.

29. Суторихин, И.А. Влияние компонентов озёрной воды на спектральное ослабление света (на примере озёр Алтайского края) [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова** // Труды II Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», Барнаул, 25-29 августа 2014 г. – Т. II. – С. 66–70.

30. Суточная динамика спектрального показателя ослабления света, температуры воды и концентрации хлорофилла на озере Красиловское [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева // Труды II Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», Барнаул, 25-29 августа 2014 г. – Т. II. – С. 90–95.

31. Изменение спектрального показателя ослабления света и содержания хлорофилла "а" в разнотипных озёрах Алтайского края в период 2011–2014 гг. [Текст] / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, **О.Б. Акулова**, У.И. Залаева // Труды II Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», Барнаул, 25-29 августа 2014 г. – Т. II. – С. 45–51.

Подписано в печать 20.06.2015  
Формат 60х90/16. Усл. печ. л. – 1  
Тираж 110 экз. Заказ №22  
Типография ООО «АРБАТ»  
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 52  
(385-2) 380-806, 366-580, 253-050  
[www.arbat-it.ru](http://www.arbat-it.ru) / [www.printaltai.ru](http://www.printaltai.ru)