

УДК 551.463.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ, ОСНОВАННОЕ НА АНОМАЛЬНО СЛАБОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВИДИМОЙ ЯРКОСТИ ГРАНИЦЫ КРУГА СНЕЛЛИУСА ОТ ЕЁ МУТНОСТИ

А. А. Мольков \*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возможностей применения изображения круга Снеллиуса для оценки оптических свойств воды. За основу исследования взят алгоритм оценки показателя поглощения на базе аналитической модели круга Снеллиуса, предложенной в предыдущей работе. Апробация алгоритма была выполнена на примере вод Горьковского водохранилища, где фиксируются высокие концентрации растворённого органического вещества и наблюдается обильное цветение сине-зелёных водорослей. В работе представлена методика регистрации изображения круга Снеллиуса, а также приведены практические результаты оценки показателя поглощения в трёх спектральных каналах, имеющие хорошее согласие с результатами сопутствующих измерений.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество океанологических приборов, предназначенных для измерения оптических свойств воды. Наибольшее распространение получили компактные настольные спектрометры, дополненные широкополосным источником света и кюветой с образцом жидкости или проточной системой. Их преимуществом является хорошая точность восстановления ряда первичных гидрооптических характеристик в широком спектральном диапазоне с высоким пространственным разрешением. Однако зачастую применение таких систем подразумевает непродолжительные измерения и требует присутствия оператора. Совершенно иной подход, способный привести к схожим результатам и обеспечить непрерывные продолжительные измерения, например для задач спутникового мониторинга, может быть реализован на основе системы подводного видения. Для реализации этой идеи достаточно оптического приёмника с набором сменных узкополосных светофильтров, размещённого на некоторой глубине под углом  $48,75^\circ$  к вертикали и регистрирующего угловое распределение яркости естественного источника света — небосвода. Ключевым элементом полученного таким образом изображения является искажённая волнением кромка небосвода, или так называемый круг Снеллиуса [1]. На оптических глубинах меньше единицы резкость границы круга Снеллиуса велика, а искажение её формы зависит от локального распределения уклонов поверхности, т. е. волнения. С увеличением глубины резкость границы падает тем быстрее, чем больше мутность воды. Таким образом, величина размытия границы круга Снеллиуса зависит от двух различных физических механизмов, которые, тем не менее, удаётся разделить при решении каждой из обратных задач — восстановлении как характеристик волнения, так и оптических свойств воды. В работах [2, 3] показано, как оценивать дисперсию уклонов поверхности и восстанавливать частотные спектры ветрового волнения независимо от оптических свойств воды. Одновременно с этим в работе [4] представлены результаты теоретического исследования возможности оценки показателей поглощения и рассеяния через

---

\* a.molkov@inbox.ru

параметры размытия границы круга Снеллиуса в предположении, что известен параметр, характеризующий волнение, а именно дисперсия уклонов поверхности. Результаты первичной апробации предложенных алгоритмов с учётом корреляционных связей [5] для одной длины волны, 532 нм, изложены в статье [6]. Более широкому экспериментальному исследованию возможностей восстановления некоторых первичных гидрооптических характеристик по изображению круга Снеллиуса, в том числе для других спектральных каналов, посвящена данная работа.

## 1. АЛГОРИТМЫ

Как уже упоминалось выше, подробное описание математической модели случайной реализации круга Снеллиуса и его статистически среднего (накопленного) изображения дано в работах [4, 6]. Здесь это описание не приводится; укажем только на использованные при этом приближения и предположения, чтобы обозначить границы применимости рассматриваемой модели.

1) Изображение формируется с помощью идеальной системы видения, осуществляющей регистрацию углового распределения яркости света на заданной глубине  $Z$ , при этом эффектами обратного рассеяния света в воде пренебрегается.

2) Оптические свойства воды описываются показателями преломления  $m$ , поглощения  $a$  и рассеяния  $b$ , индикатрисой рассеяния  $x(\gamma)$  и её дисперсией  $d_x$ .

3) Глубина погружения фотоприёмника должна удовлетворять условию  $d_x b Z \ll \cos \vartheta_{Sn}$  ( $\vartheta_{Sn} = \arcsin(1/m) \approx 48,75^\circ$ ), при котором угловая ширина области размытия границы круга Снеллиуса не превышает  $30^\circ \div 50^\circ$ .

Резюмируя, можно утверждать, что предложенная модель круга Снеллиуса адекватно описывает его изображения, полученные в реальных условиях с помощью фотоаппарата, веб- или видеокамеры на глубинах не более глубины видимости белого диска, в прибрежных морских водах или водах внутренних водоёмов, в условиях развитого ветрового волнения с выделенным направлением или в условиях шторма (идеальный вариант).

При условии выполнения пунктов 1–3 можно получить простое выражение для расчёта углового распределения яркости накопленного изображения круга Снеллиуса  $L(\vartheta, Z)$ , которое представляется в виде произведения двух функций:

$$L(\vartheta, Z) = A(\vartheta, aZ) [L(\vartheta, Z)]|_{a=0}, \quad (1)$$

где первая

$$A(\vartheta, aZ) = \exp(-aZ / \cos \vartheta) \quad (2)$$

учитывает влияние поглощения на изображение круга Снеллиуса, а вторая,  $[L(\vartheta, Z)]|_{a=0}$ , описывает структуру изображения круга Снеллиуса в гипотетической водной среде без поглощения. По результатам численного моделирования было установлено, что графики функции  $[L(\vartheta, Z)]|_{a=0}$ , построенные для разных глубин, пересекаются при значении  $\vartheta = \vartheta_{Sn}$ . Это означает, что, согласно приведённым формулам, рассеяние света в воде не оказывает влияния на видимую яркость границы круга Снеллиуса и, следовательно, её яркость  $L(\vartheta_{Sn}, Z)$  ослабляется с глубиной только из-за поглощения. Поэтому если считать, что ослабление видимой яркости границы круга Снеллиуса полностью определяется множителем  $A(\vartheta, aZ)$  формулы (1), то показатель поглощения воды выражается в виде [4]

$$a = \frac{\cos \vartheta_{Sn}}{Z_2 - Z_1} \ln \frac{L(\vartheta_{Sn}, Z_1)}{L(\vartheta_{Sn}, Z_2)} \quad (3)$$

через яркость света под углом к вертикали  $\vartheta_{Sn}$  на двух различных глубинах  $Z_1$  и  $Z_2$ .

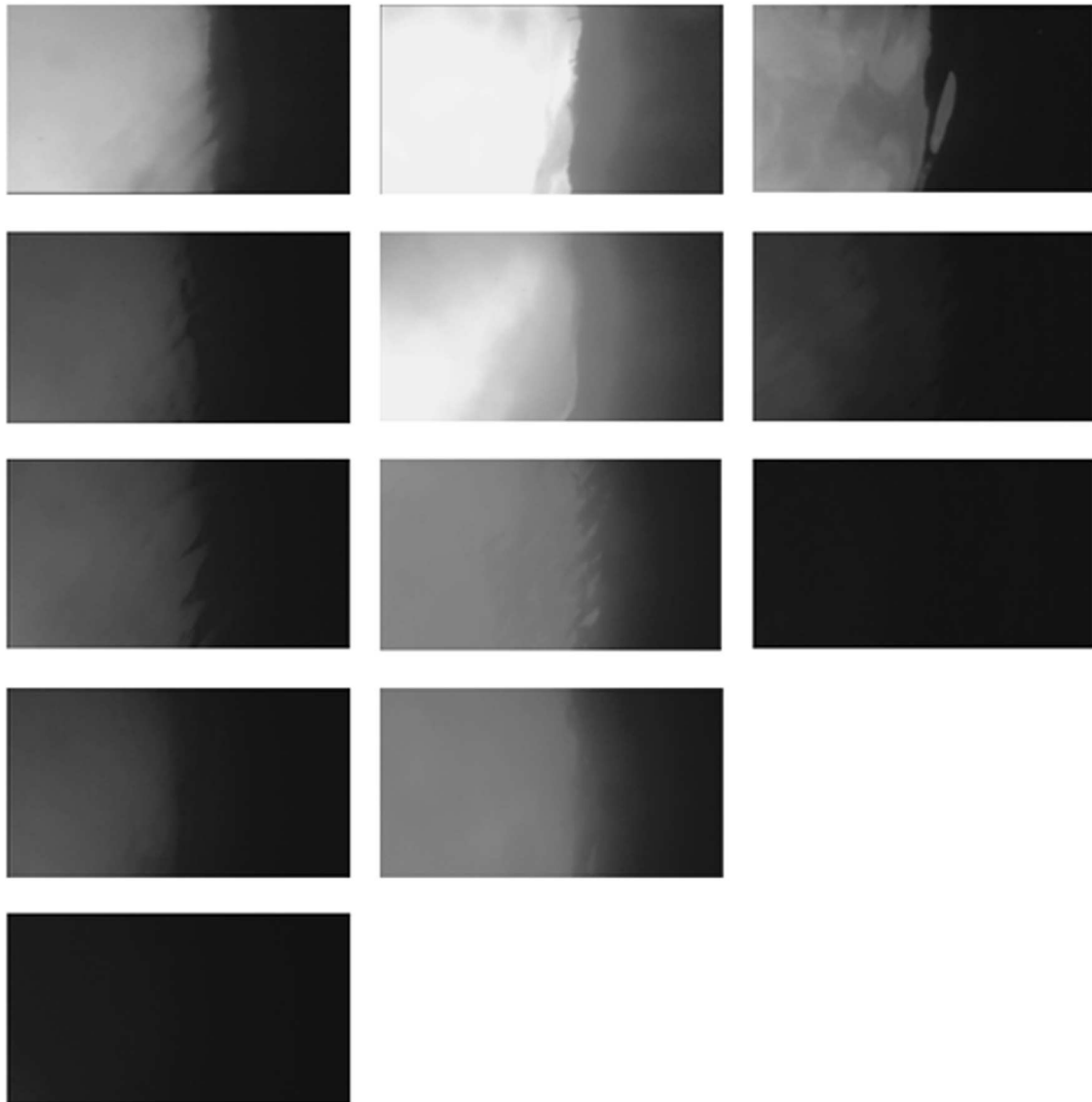


Рис. 1. Изображение границы круга Снеллиуса в трёх светофильтрах — зелёном (1-й столбец), красном (2-й столбец) и синем (3-й столбец) — на разных глубинах: 0,50 м (1-я строка); 1,00 м (2-я строка); 1,50 м (3-я строка); 1,75 м (4-я строка); 2,00 м (5-я строка)

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальному исследованию теоретически обнаруженной аномально слабой зависимости видимой яркости границы круга Снеллиуса от мутности воды были посвящены работы, выполненные осенью 2017 года на Горьковском водохранилище. Регистрация подводного изображения границы круга Снеллиуса проводилась с различных глубин с помощью оптической системы, собранной на специальной оснастке. В качестве последней использовалась алюминиевая штанга с длиной 4 м, на погружаемый в воду конец которой крепилась площадка, ориентированная под углом  $\vartheta_{Sn}$ . На площадке фиксировалась вебкамера «Logitech C210» с углом обзора  $30^\circ$ , перед объективом которой располагался сменный светофильтр. В эксперименте было использо-

вано 3 светофильтра — красный ОС14 (полоса  $560 \div 2\,500$  нм, пика нет), зелёный ЗС1 (полоса  $460 \div 620$  нм, пик 530 нм) и синий СС5 (полоса  $380 \div 520$  нм, пик 420 нм). Оснастка с размещённой на ней оптической системой вертикально вывешивалась с борта стоящего на якоре судна на глубину 0,5 м, после чего происходило её дискретное опускание до глубины 2,0 м с шагом 0,25 м (7 горизонтов). На каждом горизонте записывалась яркость взволнованной водной поверхности в течение 60 с, а полный проход по глубине занимал не более 8 мин. Далее все действия повторялись со следующим светофильтром.

Измерения проводились в течение двух дней 13 и 25 октября 2017 года в условиях сплошной облачности при слабом ветре, когда движение облаков было едва заметным. Это давало основания считать, что яркость небосвода оставалась неизменной на протяжении каждой съёмки. При этом оптические свойства воды в указанные дни были различны. Так, 13 октября наблюдалась вода коричневого оттенка, характерная для многих внутренних водоёмов из-за большого количества растворённого органического вещества (порядка 15 мг/л). Глубина видимости диска Секки составляла 2,6 м, что близко к предельной глубине видимости белого диска на Горьковском водохранилище, равной 3,0 м. К 25 октября под действием продолжительного ветрового нагона в районе проведения работ скопилось большое количество сине-зелёных водорослей с концентрацией порядка 7 000 кл/мл. Они были равномерно распределены по глубине ввиду низких температур воды, отсутствия прямого солнечного света и ветрового перемешивания в день проведения эксперимента. Глубина видимости диска Секки упала до 1,6 м.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспедиции были получены видеозаписи с вебкамеры при использовании трёх светофильтров. Методика их обработки заключалась в следующем. Сначала каждая видеозапись дробилась на кадры и формировался массив данных с размером  $p_x \times p_y \times N$ , где  $p_x$  и  $p_y$  — разрешение фотографии по двум направлениям,  $N$  — число кадров. На рис. 1 приведены подводные изображения при использовании трёх светофильтров, наглядно демонстрирующие ослабление яркости границы круга Снеллиуса с глубиной. Видно, что минимальные глубины видимости круга Снеллиуса наблюдаются в синем канале, что типично для вод с большим количеством растворённого органического вещества, сильно поглощающего в ультрафиолетовой и синей областях спектра [7].

Далее определялись координаты пикселя, соответствующего границе круга Снеллиуса, и формировался «сигнал» яркости в трёх каналах как функция времени (номера кадра). Примеры таких сигналов представлены на рис. 2 тонкими линиями, а жирными обозначены прореженные по 15 кадрам (1 с) сигналы. «Ступеньки» в сигналах соответствуют погружению камеры на следующую глубину. При этом наибольшие флуктуации яркости наблюдались на малых глубинах и были вызваны волнением. Для каждой «ступеньки» проводилось усреднение сигнала, после чего строилась зависимость яркости поверхности от глубины.

Результаты обработки всех записей с вебкамеры за 13 и 25 октября представлены на рис. 3. По оси ординат в логарифмическом масштабе отложена яркость поверхности, которая нормирована на значение яркости (граница круга Снеллиуса) на нулевой глубине, полученное путём аппроксимации данных на интервале глубин  $0,5 \div 2,0$  м. По оси абсцисс отложена глубина.

Из рис. 3 видно, что полученные распределения яркости границы круга Снеллиуса хорошо согласуются с экспоненциальным законом спада с глубиной (2), полученным в теории. На основе регрессионного анализа данных за 13 и 25 октября были построены аппроксимации вида

$$A(\vartheta_{Sn}, a_\lambda Z) = \exp(-a_\lambda Z / \cos \vartheta_{Sn}), \quad (4)$$

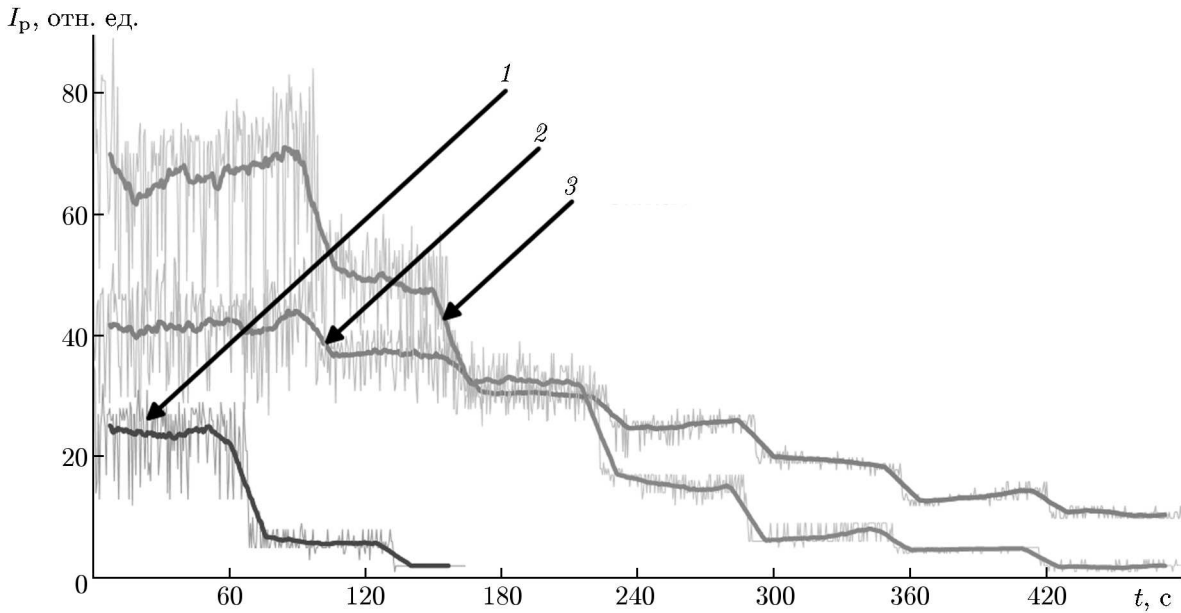


Рис. 2. Временная запись яркости границы круга Снеллиуса (в 8-битной шкале) в трёх каналах (1 — синий канал, 2 — красный канал, 3 — зелёный канал). «Ступеньки» соответствуют переходу на следующую глубину (от 0,5 до 2,0 м с шагом 0,25 м)

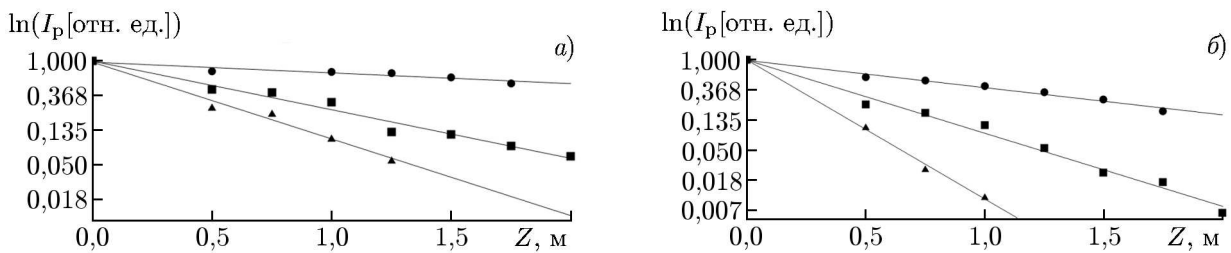


Рис. 3. Ослабление яркости границы круга Снеллиуса с глубиной при использовании трёх светофильтров — красного (символы ●), зелёного (символы ■) и синего (символы ▲) по данным за 13 октября (а) и за 25 октября (б) 2017 года. Прямые линии соответствуют аппроксимациям

Таблица 1. Спектральный показатель поглощения воды по результатам обработки изображений круга Снеллиуса

	13 октября (чистая вода)	25 октября (много водорослей)
$a_{420}$	3,35	7,02
$a_{530}$	2,12	3,68
$a_{650}$	0,47	1,38

где  $a_\lambda$  — спектральный показатель поглощения. Значения  $a_\lambda$  приведены в табл. 1. Интересно отметить, что при наличии водорослей (25 октября) поглощение выросло примерно одинаково во всех трёх спектральных интервалах, а именно в 1,6 раза.

Соответствие полученных значений  $a_\lambda$  реальности требует проверки. В ходе эксперимента мы не проводили прямых измерений показателя поглощения по причине выхода из строя предназначенного для этого мутномера с рабочей длиной волны 650 нм (красный свет) разработки ИПФ РАН [8], но выполнили измерения численности сине-зелёных водорослей с помощью STD-зонда «YSI 6600 v2», оснащённого соответствующим оптическим датчиком. При этом с помощью указанного оборудования за последние годы работ на Горьковском водохранилище мы накопили достаточно большой запас экспедиционных данных, на основе которых были, в частности,

Таблица 2. Сравнение оценок показателя поглощения на длине волны 650 нм по изображению круга Снеллиуса (см. (3)), по численности сине-зелёных водорослей (см. (5)) и глубине видимости белого диска (см. (6))

	13.10 (чистая вода)	25.10 (много водорослей)
$a_{650}$ (3)	0,47	1,38
$a_{650}$ (5)	1,14	1,37
$a_{650}$ (6)	0,910	1,475

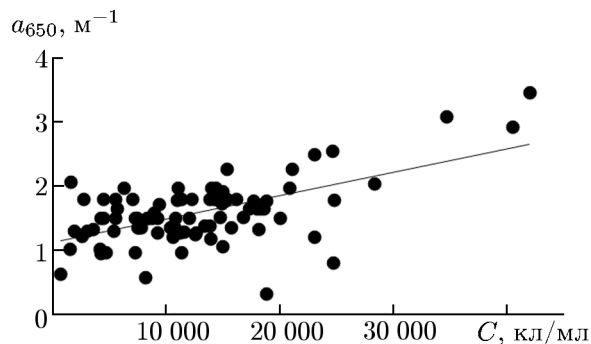


Рис. 4. График зависимости показателя поглощения воды на длине волны 650 нм от численности сине-зелёных водорослей  $C$ . Прямая линия соответствует регрессии (5)

построены регрессии [8] между показателем поглощения на длине волны 650 нм, численностью сине-зелёных водорослей  $C$  и глубиной видимости белого диска  $Z_S$ :

$$a_{650}[\text{м}^{-1}] = 3,648 \cdot 10^{-5} C[\text{ккл/мл}] + 1,118, \quad R = 0,59, \quad (5)$$

$$a_{650}[\text{м}^{-1}] = 2,36/Z_S[\text{м}], \quad R = 0,59, \quad (6)$$

где  $R$  — коэффициент корреляции Пирсона. В табл. 2 приведены результаты сравнения оценок показателя поглощения на длине волны 650 нм по изображению круга Снеллиуса (см. (3)), по численности сине-зелёных водорослей (см. (5)) и глубине видимости белого диска (см. (6)). Видно, что в воде с высоким содержанием водорослей расхождение между тремя оценками не превышает 10%. В более прозрачной воде это расхождение превышает 100%, т. к. регрессия (5), как видно из рис. 4, получена при значениях концентрации водорослей более 2000 ккл/мл, а в период проведения эксперимента (октябрь) их численность составляла порядка 500 ккл/мл.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено экспериментальное подтверждение теоретически обнаруженного эффекта «аномально» слабой зависимости яркости границы круга Снеллиуса от мутности воды на основе данных натуральных измерений, выполненных на Горьковском водохранилище. В частности, анализ накопленных изображений круга Снеллиуса позволил зарегистрировать спад яркости его границы с глубиной по экспоненциальному закону с показателем, равным произведению показателя поглощения и глубины погружения оптической системы, делённой на косинус угла визирования. По углу наклона прямых, проведённых через экспериментальные точки на плоскости логарифм яркости границы круга Снеллиуса—глубина, восстановлены значения показателя поглощения воды, которые находятся в соответствии с его оценками, полученными другим методом. Вопрос точности полученных предложенным методом результатов зависит от многих факторов, связанных как с самой техникой (в первую очередь применение светофильтров с узкой полосой пропускания), так и с условиями наблюдения (например, обеспечение ориентации угла визирования строго на границу круга Снеллиуса, постоянство яркости небосвода и волнения, однородность оптических свойств воды по глубине). Строго говоря, сама задача точного определения показателя поглощения является крайне сложной. Обычно для её решения используют фотометрическую сферу, хотя в последнее время получили распространение портативные спектрометры (например, марки «Ocean Optics»). Тем не менее результаты данной работы показывают перспектив-

ность использования подводных оптических систем в качестве заякоренных подводных станций для получения первичной справочной информации о качестве воды в прибрежных районах, на основе которой при необходимости могут быть организованы более детальные исследования с использованием апробированных подходов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 15–45–02610 и 16–05–01092).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 617.
2. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 5. С. 615.
3. Molkov A. A., Dolin L. S., Kapustin I. A., et al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9999. Art. no. 9991D
4. Долин Л. С. // Труды XIII Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 24–26 мая 2016 года, Санкт-Петербургский научный центр РАН. Санкт-Петербург, 2016. С. 211.
5. Левин И. М., Копелевич О. В. // Океанология. 2007. Т. 47, № 3. С. 344.
6. Долин Л. С., Мольков А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 1. С. 13.
7. Keith D. J. // Encyclopedia of Natural Resources: Water. Philadelphia: Taylor and Francis, 2014. P. 649.
8. Мольков А. А., Капустин И. А., Щегольков Ю. Б. // Труды VIII Международной конф. «Современные проблемы оптики естественных вод», 20–22 сентября 2017 года, Институт Океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Санкт-Петербург, 2017. С. 52.

Поступила в редакцию 8 февраля 2018 г.; принята в печать 30 апреля 2018 г.

### AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE OPTICAL PROPERTIES OF WATER, BASED ON AN ANOMALOUSLY WEAK DEPENDENCE OF APPARENT RADIANCE OF THE SNELL-CIRCLE BORDER ON THE WATER TURBIDITY

*A. A. Molkov*

This work is devoted to an experimental study of the possibilities to use the Snell-circle image for estimating optical properties of water. The research is based on the algorithm for estimating the absorption coefficient on the basis of analytical model of the Snell circle, which was proposed in the previous work. The algorithm was tested using the water samples from the Gorky water-storage reservoir in which high concentrations of dissolved organic matter are recorded and abundant blue-green algae bloom is observed. In this work, we present a technique for recording the Snell-circle images and practical results of estimating the water absorption coefficients in three spectral channels, which are in good agreement with the results of the accompanying measurements.